

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВЕТЕРИНАРНОЇ
МЕДИЦИНИ ТА БІОТЕХНОЛОГІЙ ІМЕНІ С.З. ГИЖИЦЬКОГО
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА АВТОМОБІЛІВ І ТРАКТОРІВ**

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

другого (магістерського) рівня вищої освіти

на тему: «Дослідження міцності рами автомобіля у складних
експлуатаційних умовах»

Виконав: студент групи Ат-62
Спеціальності 274 „Автомобільний транспорт”
(шифр і назва)

Сергій ГЕРА

(ім'я та прізвище)

Керівник: Богдан НЕСТЕР

(ім'я та прізвище)

Дубляни 2025

УДК 629.3.012.54:62-427.8

Гера Сергій Ігорович. Дослідження міцності рами автомобіля у складних експлуатаційних умовах. Кваліфікаційна робота. Львів: Львівський НУВМБ ім. Степана ГЖИЦЬКОГО, 2025. 49с.

Табл.4 ; рис. 19; бібліогр. джерел 20.

У дипломній роботі розглянуто проєктування та чисельний аналіз міцності трубчастої просторової рами баггі, призначеного для експлуатації в екстремальних умовах, із використанням комп'ютерного моделювання та інженерного аналізу. Робота охоплює ключові аспекти: від моделювання у CAD-середовищі до оцінки напружено-деформованого стану та економічної доцільності.

Особлива увага приділена моделюванню рами у SolidWorks Simulation для визначення жорсткісних характеристик та запасу міцності. Проведено порівняльний аналіз п'яти конфігурацій, що варіювалися матеріалом (AISI 1020, AISI 4130) та товщиною стінки. Визначено, що низьковуглецева сталь AISI 1020 є непридатною через критично низький запас міцності $n \approx 1,13$

Оптимальною була обрана конфігурація з хром-молібденової сталі AISI 4130 з товщиною стінки $t=2,5\text{мм}$, яка забезпечила високий запас міцності $n \approx 2,61$ та ідеальну торсійну жорсткість $\Delta L_{\text{макс}} = 1,836\text{ мм}$.

У роботі наведено економічну оцінку витрат на виготовлення, що обґрунтовує доцільність переоплати за високоміцну сталь для забезпечення безпеки та зниження маси. Визначено, що FEA-моделювання у SolidWorks є оптимальним методом верифікації конструкції.

Значна увага приділена охороні праці — охоплено правила ергономічної безпеки при проєктуванні, а також суворі правила безпеки при обробці та зварюванні труб із високоміцної сталі, наведено перелік необхідних засобів індивідуального захисту.

ЗМІСТ

ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ТИПІВ РАМ ДЛЯ АВТОМОБІЛІВ ТИПУ БАГГІ ТА ВИБІР ОПТИМАЛЬНОЇ КОНСТРУКЦІЇ.....	8
1.1. Класифікація несучих систем автомобілів	8
1.1.1. Лонжеронні Рами.....	8
1.1.2. Несучий Кузов	9
1.1.3. Просторова трубчаста рама	11
1.2. Вимоги до матеріалів та критичні показники при проектуванні рами багі.	12
1.2.1. Вимоги до конструкційної сталі	12
1.2.2. Критерії оцінки міцності	13
1.3.1. Домінування торсійної жорсткості.....	14
1.3.2. Аналіз ударних та згинних навантажень	15
1.4. Аналіз можливих варіантів верифікації та перевірки рами.....	16
1.4.1. Експериментальні методи розрахунку жорсткості та міцності.....	16
1.4.2. Аналітичні методи розрахунку жорсткості та міцності.....	18
1.4.3. Комп'ютерне моделювання.....	19
Висновки до розділу	20
РОЗДІЛ 2. МЕТОДОЛОГІЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ЖОРСТКОСТІ ТА МІЦНОСТІ ТРУБЧАСТОЇ РАМИ БАГГІ	21
2.1. Обґрунтування критичного сценарію навантаження та розрахунок сили	21
3.1.2. Порівняння досліджуваних конфігурацій та входні параметри	22
3.1.3. Покрокова методика проведення статичного аналізу в середовищі SolidWorks Simulation	23
Висновки до розділу	25
Розділ 3. Аналіз результатів та оптимізація конструкції рами.....	27

	6
3.1. Аналіз симуляції конфігурації зі сталі AISI 1020	27
3.2. Аналіз симуляції після зміни матеріалу на сталь AISI 4130	31
Висновки до розділу	33
РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ, ТЕХНОЛОГІЧНА ТА ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА ПРОЄКТУ	35
4.1. Безпека та ергономіка під час проєктування у Solidworks	35
4.1.1. Профілактика зорового та опорно-рухового навантаження	36
4.1.2. Безпека даних та програмного забезпечення	36
4.2. Безпека при обробці та зварюванні труб	37
4.3. Техніка безпеки при механічній обробці та монтажі	38
4.4. Заходи пожежної та екологічної безпеки	39
4.4.1. Пожежна Безпека	39
4.4.2. Екологічна Безпека	40
4.5. Інструктаж та надання першої допомоги	40
Висновки за розділом	40
РОЗДІЛ 5. ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА	42
5.1. Економічна ефективність методології дослідження в середовищі SolidWorks Simulation	42
5.1.1. Скорочення часу виведення продукту на ринок	42
5.2. Порівняльний аналіз собівартості матеріалу (AISI 1020 та AISI 4130) ...	43
4.3. Обґрунтування економічної доцільності переплати	44
Висновки до розділу	44
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ	46
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	48

ВСТУП

Сучасна інженерна освіта в Україні стикається з викликом підготовки фахівців, здатних швидко реагувати на актуальні потреби оборони та відновлення. На тлі військової агресії критично зростає попит на спеціалізовані транспортні засоби високої прохідності, які можуть ефективно функціонувати в екстремальних та складних експлуатаційних умовах. Одним із найефективніших прикладів таких машин є легкі позашляхові автомобілі типу баггі, які завдяки своїй конструкції забезпечують високу маневреність, прохідність та ремонтпридатність.

Одним із найбільш критичних елементів конструкції баггі, що безпосередньо впливає на його надійність, прохідність та безпеку екіпажу, є його несуча просторова трубчаста рама (шасі). Рама виконує функцію каркаса жорсткості, поглинача ударних навантажень та основи для розміщення всіх агрегатів. В умовах експлуатації на розбитому асфальті, ґрунтових дорогах та в умовах бездоріжжя, ця конструкція піддається постійним, високим динамічним та асиметричним навантаженням.

Актуальність теми роботи зумовлена необхідністю забезпечення високої міцності та живучості цих машин. Успішність експлуатації баггі значною мірою залежить від торсійної жорсткості (здатності протистояти скручуванню при діагональному вивішуванні) та ударної міцності (здатності витримувати зіткнення та жорсткі приземлення). Це вимагає ґрунтовного інженерного аналізу на етапі проєктування.

Метою роботи є дослідження міцності трубчастої рами автомобіля типу баггі в умовах складної експлуатації шляхом застосування методу кінцевих елементів .

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ТИПІВ РАМ ДЛЯ АВТОМОБІЛІВ ТИПУ БАГГІ ТА ВИБІР ОПТИМАЛЬНОЇ КОНСТРУКЦІЇ

1.1. Класифікація несучих систем автомобілів

Несуча система (рама або кузов) є визначальним елементом конструкції будь-якого транспортного засобу, оскільки вона сприймає всі навантаження від силового агрегату, підвіски, коліс та зовнішніх ударів. Вибір типу рами для автомобіля типу баггі, призначеного для екстремальної та військово-польової експлуатації, має ґрунтуватися на балансі між міцністю, жорсткістю на скручування та масою.

Основні типи несучих систем включають:

1.1.1. Лонжеронні Рами

Ланжеронна рама є однією з найстаріших і найбільш перевірених конструкцій несучих систем в автомобілебудуванні. Вона складається з двох масивних поздовжніх лонжеронів, які з'єднані між собою кількома поперечними балками, формуючи конструкцію, що нагадує сходи. Така архітектура забезпечує видатну міцність на вертикальний згин та стійкість до високих навантажень, що є її основною перевагою.

Саме ці якості зробили лонжеронну раму домінуючою у сфері вантажних автомобілів усіх класів, де необхідна здатність рівномірно розподіляти значні маси вантажу по всій довжині шасі та витримувати екстремальні навантаження на осі. Крім того, лонжеронна рама є стандартом для класичних позашляховиків та пікапів, оскільки вона слугує окремою несучою конструкцією, яка захищає кузов від деформацій, спричинених ударами об перешкоди на бездоріжжі. Така роздільна конструкція також спрощує ремонт, обслуговування та монтаж спеціалізованих надбудов.



Рисунок 1.1 – Загальний вигляд лонжеронної рами

Незважаючи на високу міцність, ключовим недоліком лонжеронної рами є її критично низька торсійна жорсткість. В умовах бездоріжжя, коли колеса діагонально вивішуються, рама значно скручується. Це скручування призводить до неефективної роботи підвіски, погіршує керованість і стабільність автомобіля, що є неприйнятним для високоманеврених транспортних засобів типу баггі. Крім того, велика маса рами негативно впливає на загальну паливну ефективність та динамічні характеристики, через що цей тип конструкції практично не використовується у сучасному легковому та спортивному автомобілебудуванні.

1.1.2. Несучий Кузов

Несучий кузов є домінуючою несучою системою у сучасному легковому автомобілебудуванні, що є прямим наслідком прагнення до мінімізації маси та підвищення аеродинамічної ефективності. У цій конструкції кузовні елементи, панелі та підлога інтегровані в загальну структуру, яка сприймає всі навантаження, забезпечуючи високу питому жорсткість – тобто високу жорсткість на скручування при відносно невеликій

загальній масі. Несучий кузов оптимально працює в умовах експлуатації на асфальтованих дорогах, де основна увага приділяється керованості, комфорту та пасивній безпеці, що реалізується через ретельно спроектовані зони деформації, які ефективно поглинають енергію удару при фронтальних зіткненнях.

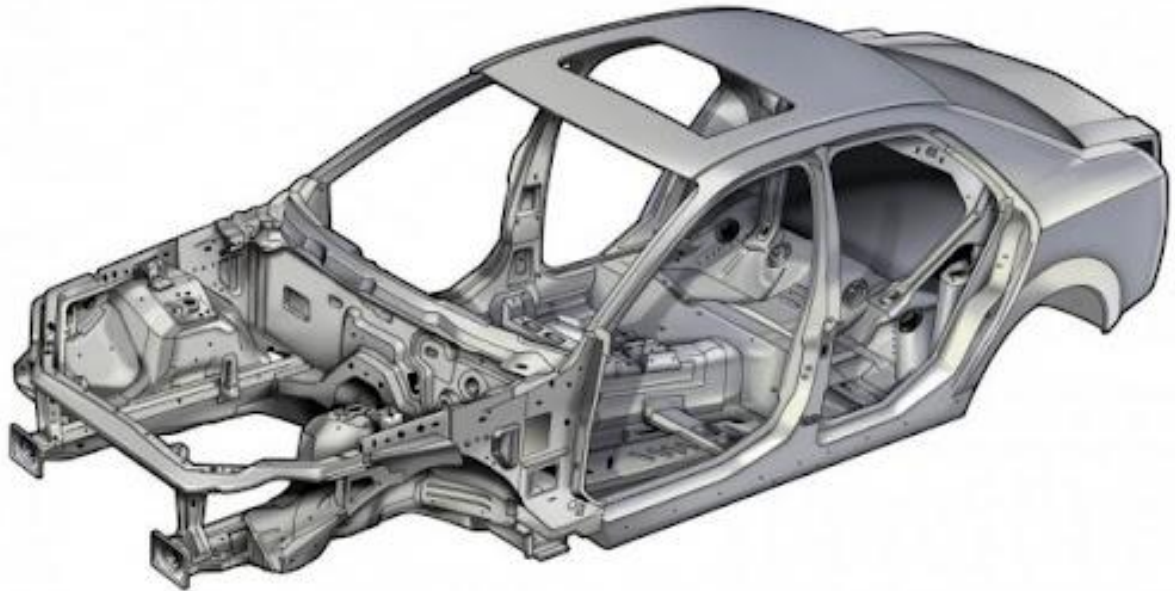


Рисунок 1.2 – Загальний вигляд несучого кузова

Однак, незважаючи на переваги, несучий кузов має суттєві обмеження, що унеможливають його ефективне застосування для автомобілів типу баггі та машин, призначених для складних експлуатаційних умов. По-перше, його міцність на удар значно знижується поза проєкцією основних зон деформації, особливо при бічних та вертикальних ударах, типових для бездоріжжя. По-друге, що є критичним для баггі, несучий кузов не забезпечує необхідної структурної цілісності при перекиданні. У разі жорсткого перекидання, кузов може зазнати незворотних деформацій, які призведуть до стискання життєвого простору екіпажу. Це прямо суперечить вимогам до підвищеної пасивної безпеки, яку має забезпечувати транспортний засіб в умовах високого ризику, що робить просторову трубчасту раму єдиним виправданим вибором для таких цілей.

1.1.3. Просторова трубчаста рама

Просторова трубчаста рама є вершиною інженерної думки у сфері несучих систем для високопродуктивних та екстремальних транспортних засобів, включаючи гоночні боліди, прототипи та баггі. Вона являє собою каркас, зібраний із великої кількості трубчастих елементів, які зварені у єдину, тривимірну конструкцію. Ця конструкція є оптимальним вибором для автомобілів, що експлуатуються в складних умовах, завдяки досягненню найкращого балансу між високою жорсткістю на скручування та мінімальною масою.



Рисунок 1.3 – Загальний вигляд просторової рами

Ефективність просторової рами ґрунтується на принципі триангуляції — розподілі каркаса на безліч жорстких трикутних секцій. Оскільки трикутник є єдиною абсолютно жорсткою геометричною фігурою, елементи рами працюють переважно на осьовий стиск або осьовий розтяг, а не на згин. Це дозволяє конструкції ефективно протистояти поздовжньому скручуванню, яке є критичним на бездоріжжі, коли колеса розташовані на різних рівнях.

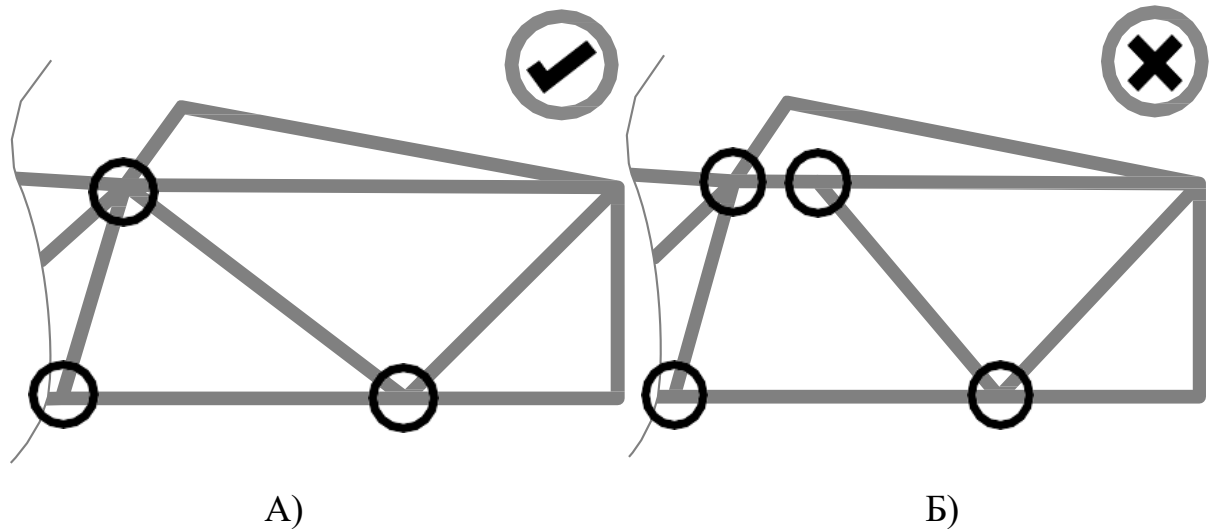


Рисунок 1.4 – Триангуляція елементів рами за схемою вузол-вузол

А) — правильна, Б) — неправильна).

Крім високої інженерної ефективності, трубчаста рама виконує ключову функцію капсули безпеки. Вона формує жорстку оболонку навколо екіпажу, що є життєво важливим при перекиданнях, бічних або вертикальних ударах, які є високим ризиком в умовах екстремальної експлуатації. Рама, виконана з високоміцної сталі, гарантує, що енергія удару буде поглинута та розподілена по каркасу, зберігаючи цілісність життєвого простору. Таким чином, просторова трубчаста рама є єдиною конструкцією, яка задовольняє найжорсткіші вимоги до міцності, жорсткості та безпеки, необхідні для автомобілів типу баггі.

1.2. Вимоги до матеріалів та критичні показники при проектуванні рами баггі.

1.2.1. Вимоги до конструкційної сталі

Правильний вибір матеріалу має вирішальне значення для досягнення необхідної міцності та живучості рами баггі. Для рам, які піддаються високим динамічним навантаженням та ударам, зазвичай використовують високоміцні низьколеговані сталі, які поєднують необхідну міцність зі зварюваністю. Серед поширених марок – сталь AISI 4130 (хромолібденова),

що відповідає українській сталі 30ХГСА (високоміцна, добре зварюється), або конструкційна сталь S355.

Ключовим показником, який визначає опір матеріалу деформації, є межа плинності ($\sigma_{\text{пр}}$) для сталей, придатних для екстремальної експлуатації, ($\sigma_{\text{пр}}$) становить приблизно 355 МПа і вище. Межа плинності визначає максимальне напруження, яке матеріал може витримати без переходу в стан пластичної деформації. Висока межа плинності дозволяє конструкції витримувати значні ударні навантаження і повертатися до початкової форми, що є критичним для довговічності.

Також важливим параметром є геометрія труб. Для забезпечення міцності та технологічності, переважно використовуються круглі труби з мінімальною товщиною стінки 2,0-3,0 мм. Круглий переріз є оптимальним, оскільки він має найвищу жорсткість на скручування та рівномірно розподіляє напруження по всій площі перерізу, незалежно від напрямку прикладення сили.

1.2.2. Критерії оцінки міцності

Для чисельного аналізу міцності методом кінцевих елементів (МКЕ) використовується критерій Мізеса. Цей критерій є основним для пластичних матеріалів, яким є сталь, і дозволяє оцінити еквівалентне напруження (σ_e) у складних навантажених умовах. Еквівалентне напруження об'єднує вплив усіх трьох головних компонентів напружень (розтяг, стиск, зсув) в один скалярний показник.

На основі критерію Мізеса формулюється інженерна умова міцності: конструкція є міцною, якщо максимальне еквівалентне напруження ($\sigma_{e,\text{макс}}$) не перевищує межу плинності матеріалу, поділену на коефіцієнт запасу міцності (n):

$$\sigma_{e,\text{макс}} \leq \frac{\sigma_e}{n} \quad (1.1)$$

Коефіцієнт запасу міцності (n) – це фундаментальний показник надійності, який вводиться для врахування невизначеностей у навантаженнях, властивостях матеріалу, а також неточностей виробництва. Для рам, що працюють в екстремальних умовах, де динамічні навантаження є високими, коефіцієнт запасу міцності зазвичай приймається $n \geq 1,5$ або $n \geq 2,0$. Це гарантує, що навіть при пікових навантаженнях конструкція зберігатиме працездатність без ризику руйнування чи незворотних деформацій.

1.3. Аналіз ключових динамічних навантажень в умовах бездоріжжя

Основна відмінність експлуатації баггі від дорожнього автомобіля полягає у домінуванні динамічних та асиметричних навантажень.

1.3.1. Домінування торсійної жорсткості

Торсійна жорсткість – це здатність рами протистояти скручуванню навколо поздовжньої осі. Це найкритичніша характеристика для баггі, оскільки на бездоріжжі підвіска починає працювати асиметрично, коли колеса однієї діагоналі потрапляють у глибокі вибоїни або наїжджають на перешкоди. Це викликає значний скручувальний момент на рамі.

Низька торсійна жорсткість призводить до ланцюга негативних наслідків:

- Втрата контакту коліс із ґрунтом: Скручування рами може підняти колесо, особливо на діагонально протилежній стороні, що зменшує зчеплення та прохідність.
- Порушення геометрії підвіски: Деформація точок кріплення підвіски змінює кути встановлення коліс (розвал та сходження), що прямо призводить до втрати керованості та зниження стабільності.

- Втомні руйнування: Постійні цикли скручування викликають напруження, що може призвести до швидкого втомного руйнування у місцях концентрації напружень (зварні шви).

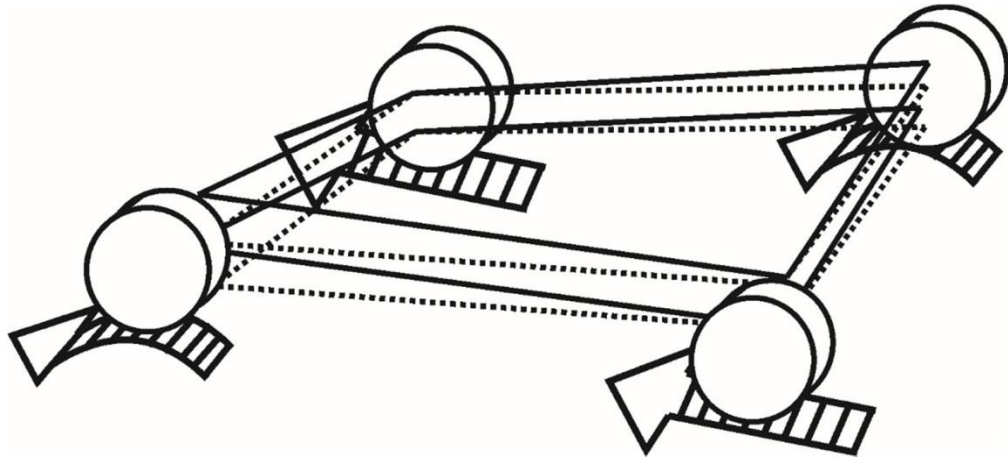


Рисунок 1.5 – Схема повздовжнього скручування

1.3.2. Аналіз ударних та згинних навантажень

Вертикальний згин та удар моделюється як жорстке приземлення після стрибка або наїзд на велику перешкоду. Навантаження, що виникають при ударі, є набагато більшими за статичну вагу і вимагають застосування динамічних коефіцієнтів (K_d) при моделюванні. Для імітації екстремальних умов у розрахунках приймаються значення $K_d \geq 3$. Це динамічне навантаження застосовується до рами, щоб переконатися, що вона здатна витримати критичні вертикальні імпульси без залишкової деформації.

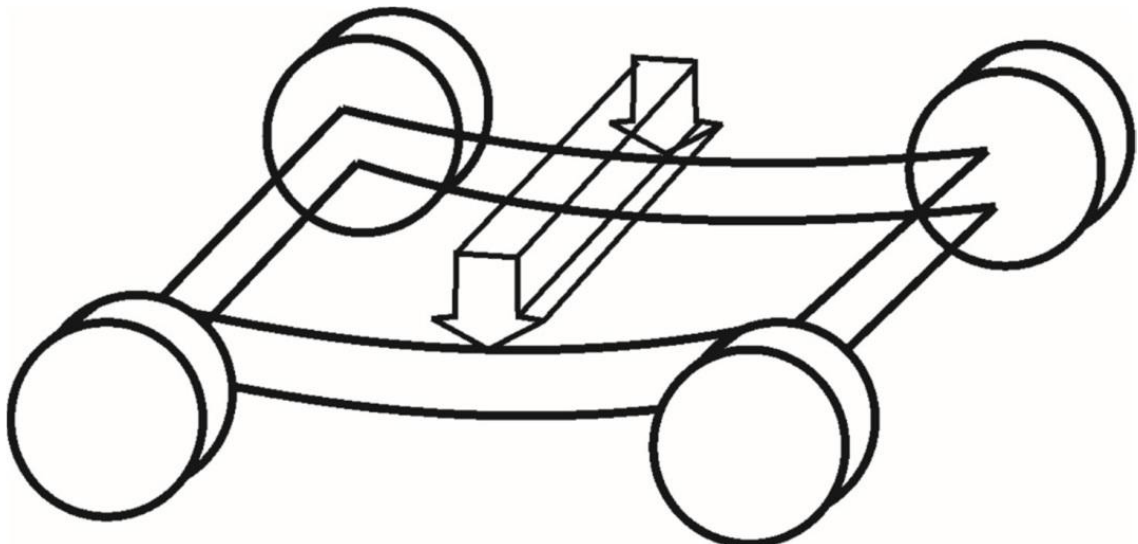


Рисунок 1.6 – Схема вертикального згину.

Бічний Згин (Латеральна деформація): Виникає при бічному ковзанні або зіткненні. Для трубчастої рами життєво важливим є забезпечення жорсткості центральної частини для захисту екіпажу.

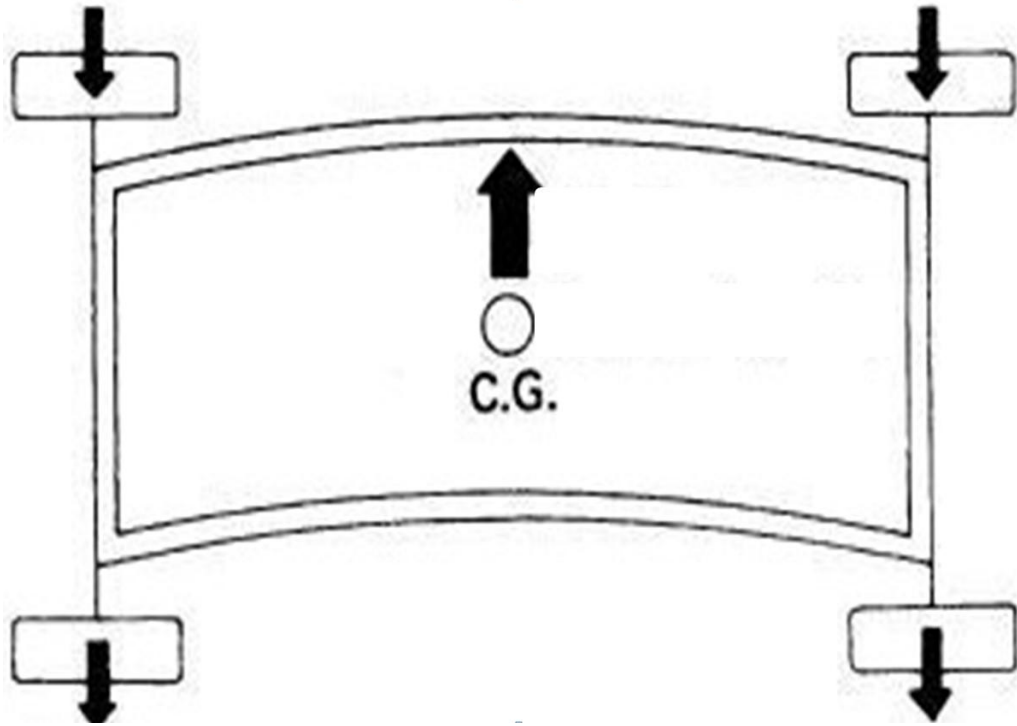


Рисунок 1.7 – Схема бічної деформації

1.4. Аналіз можливих варіантів верифікації та перевірки рами

1.4.1. Експериментальні методи розрахунку жорсткості та міцності

У сучасному інженерному середовищі одним із найбільш достовірних, але водночас ресурсомістких підходів до оцінки міцності просторових конструкцій є експериментальне випробування. Цей метод передбачає виготовлення фізичного прототипу рами та його подальше тестування на спеціалізованих стендах шляхом прикладання реальних механічних навантажень. Найбільш поширеним є торсійний стенд, призначений для оцінки опору рами скручуванню, що є критично важливим для баггі. Стенд працює за принципом жорсткої фіксації однієї частини шасі (зазвичай, задньої підвіски), тоді як до другої частини (наприклад, передньої опори)

прикладається крутний момент ($M_{кр}$) за допомогою гідроциліндра або динамометра.

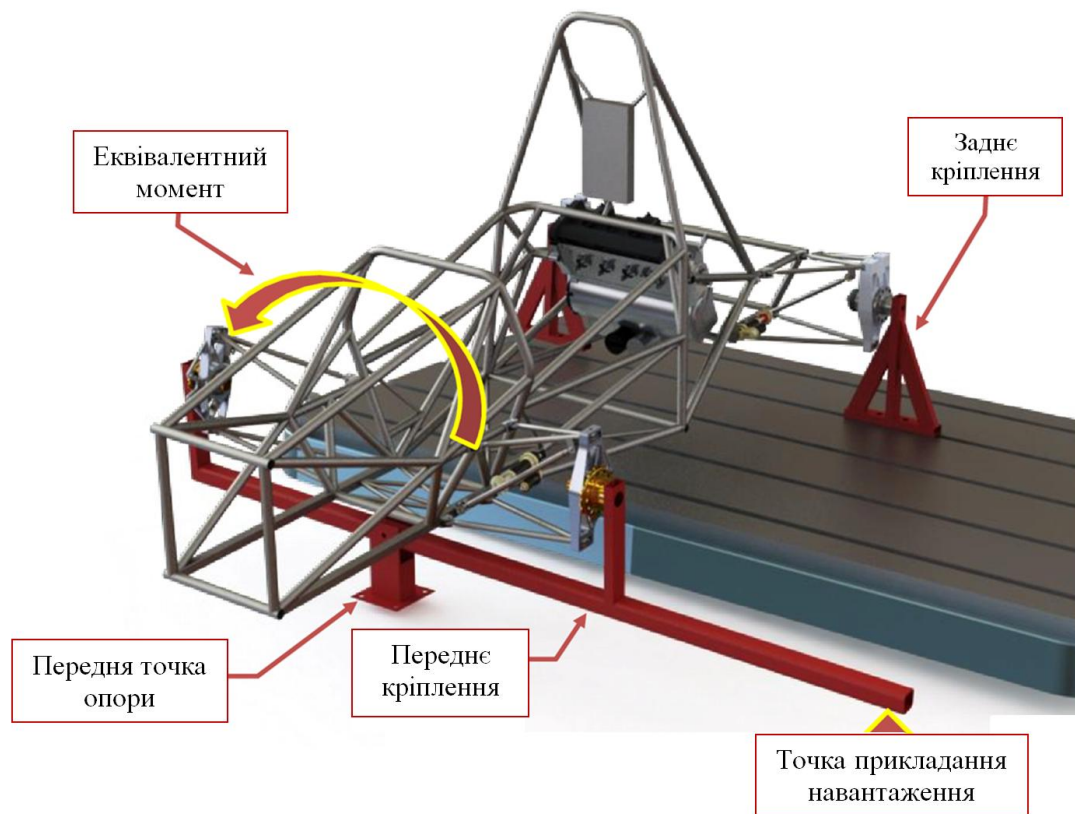


Рисунок 1.8 – Схема фізичного стенду для перевірки міцності та жорсткості просторової рами

Результатом випробування є вимірювання кута скручування θ , що дозволяє розрахувати торсійну жорсткість конструкції (C_T) за фундаментальною формулою:

$$C_T = M_{кр} / \theta \quad (1.2)$$

Вимірювання кута деформації може здійснюватися за допомогою інклінометрів або через вимірювання вертикальних переміщень опор. Перевага цього методу полягає у його беззаперечній достовірності: він враховує всі реальні чинники, такі як геометричні відхилення, неоднорідність матеріалу, а також вплив зварних швів, які є концентраторами напружень. Однак, ключові недоліки – це висока вартість створення прототипу та самого стенду, необхідність професійного обладнання (тензометри, датчики) та

обмежена оперативність, оскільки кожна зміна конструкції вимагає виготовлення нового зразка.

1.4.2. Аналітичні методи розрахунку жорсткості та міцності

Аналітичні методи, що базуються на засадах опору матеріалів, є найбільш традиційним та економічно доступним підходом до оцінки конструкційних властивостей. Вони ґрунтуються на використанні математичних формул і допущень, що дозволяють обчислити напруження, прогини та жорсткісні характеристики окремих, ідеалізованих елементів рами. Аналітичний підхід є незамінним на ранніх етапах проєктування, коли необхідно швидко оцінити поведінку окремого елемента або порівняти альтернативні матеріали. Для розрахунку жорсткісних характеристик трубчастих елементів використовуються базові формули, такі як:

Момент інерції круглого трубчастого перерізу:

$$I = \frac{\pi}{64} \cdot (D^4 - d^4) \quad (1.3)$$

де: D — зовнішній діаметр труби,

$d = D - 2t$ — внутрішній діаметр,

t — товщина стінки.

Полярний момент інерції для розрахунку опору крученню:

$$J = \frac{\pi}{32} \cdot (D^4 - d^4) \quad (1.4)$$

Максимальний прогин при згині балки (симетричне навантаження):

$$\delta_{max} = \frac{FL^3}{48EI} \quad (1.5)$$

де: F — прикладене навантаження;

L — довжина елемента;

E — модуль пружності матеріалу.

Кут закручування при дії крутного моменту:

$$\theta = \frac{M_t L}{GJ} \quad (1.6)$$

де M_t — крутний момент,

G — модуль зсуву матеріалу.

Незважаючи на простоту, аналітичний підхід має суттєві обмеження. Його точність різко знижується при роботі зі складною просторовою геометрією трубчастої рами. Класичні формули не дозволяють точно врахувати тривимірні напруження у вузлах з'єднання, які є найбільш навантаженими зонами, а також не здатні адекватно моделювати складні комбіновані та асиметричні навантаження, характерні для баггі. Таким чином, аналітичні методи слугують швидким інструментом попередньої оцінки, але є недостатніми для фінальної верифікації конструкції.

1.4.3. Комп'ютерне моделювання

Комп'ютерне моделювання, зокрема з використанням методу кінцевих елементів (МКЕ, або FEM), є найбільш сучасним та ефективним підходом для перевірки несучих систем. Цей чисельний метод дозволяє проводити складний інженерний аналіз напружено-деформованого стану конструкції у віртуальному середовищі, використовуючи спеціалізоване програмне забезпечення (наприклад, SolidWorks Simulation, ANSYS або Siemens NX).

Ключова перевага FEM полягає у високій точності результатів, оскільки він дозволяє враховувати складну геометрію просторових з'єднань, нерівномірність навантажень, контактні поверхні та граничні умови, які неможливо формалізувати аналітично. МКЕ-аналіз дає можливість візуалізувати поля напружень (критерій Мізеса) та деформацій, точно виявляючи зони потенційної концентрації навантажень. Це є незамінним для варіативного аналізу — інженер може швидко оцінювати вплив змін на поведінку конструкції, що значно прискорює ітераційний процес проєктування. Водночас, використання FEM вимагає значних обчислювальних ресурсів та високої кваліфікації інженера для коректного накладання граничних умов і вибору сітки елементів. Незважаючи на це, з огляду на складність просторової трубчастої рами баггі, саме метод кінцевих

елементів (МКЕ) визначено як основний інструмент дослідження міцності та оптимізації конструкції у даній дипломній роботі.

Висновки до розділу

На основі класифікації несучих систем встановлено, що просторова трубчаста рама є єдиною оптимальною конструкцією. На відміну від лонжеронної рами (яка має критично низьку торсійну жорсткість) та несучого кузова (який не забезпечує адекватної безпеки при бічних ударах та перекиданнях), трубчаста рама завдяки принципу триангуляції забезпечує найкраще співвідношення високої жорсткості на скручування та мінімальної маси. Вона також функціонує як невід’ємна капсула безпеки для екіпажу.

Для досягнення необхідної живучості та надійності рами необхідно використовувати високоміцні низьколеговані сталі (наприклад, S355 або AISI 4130) з високою межею плинності $\sigma_{\text{пр}} = 355$ МПа. Для фінальної верифікації міцності прийнято використовувати критерій Мізеса, з обов’язковим застосуванням коефіцієнта запасу міцності $n \geq 1,5$ або $n \geq 2$, що гарантує захист від незворотних (пластичних) деформацій при пікових навантаженнях.

Визначено, що основна відмінність баггі полягає у домінуванні динамічних та асиметричних навантажень. Найкритичнішою характеристикою для збереження керованості є торсійна жорсткість. При моделюванні ударних та згинних навантажень (жорстке приземлення, наїзд на перешкоду) необхідно застосовувати динамічний коефіцієнт $K_d \geq 3$ для адекватної імітації екстремальних умов експлуатації.

Серед можливих варіантів верифікації метод кінцевих елементів (МКЕ/FEM) визначено як основний інструмент дослідження, що дозволяє найбільш точно змодельовати складну геометрію просторової рами та комбіновану дію динамічних навантажень, що є неможливим при використанні традиційних аналітичних формул. Таким чином, подальше дослідження буде сфокусоване на чисельному моделюванні та оптимізації торсійної жорсткості обраної конструкції за допомогою МКЕ.

РОЗДІЛ 2. МЕТОДОЛОГІЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ЖОРСТКОСТІ ТА МІЦНОСТІ ТРУБЧАСТОЇ РАМИ БАГГІ

Перевірка міцності та жорсткості просторової рами є ключовим етапом інженерного аналізу, особливо при проєктуванні баггі для доставки вантажу в екстремальних умовах. У межах цієї роботи було обрано метод комп'ютерного моделювання з використанням програмного середовища SolidWorks Simulation, що дозволяє точно оцінити напружено-деформований стан (НДС) конструкції за різних сценаріїв навантаження.

Рішення використовувати SolidWorks зумовлене широкою підтримкою інженерного аналізу методом кінцевих елементів (МКЕ/FEM), доступністю середовища для інженерних розрахунків та можливістю ефективної роботи з балочними елементами.

Для аналізу було взято CAD-модель трубчастої просторової рами, яка була адаптована для потреб баггі. Ця модель містить усі необхідні елементи силової структури: основний каркас безпеки, передню захисну зону, бокову захисну структуру, а також вузли кріплення підвіски та місця для розміщення екіпажу та корисного навантаження.

З метою прискорення етапу проєктування, базова геометрія рами була адаптована з доступних інтернет-ресурсів (GrabCAD). Така практика дозволила зосередити основні зусилля на чисельній оптимізації, а не на первинному моделюванні.

2.1. Обґрунтування критичного сценарію навантаження та розрахунок сили

Для оцінки експлуатаційної надійності рами баггі, призначеного для транспортування вантажу в екстремальних умовах, було обрано найбільш навантажений сценарій – діагональне вивішування. Цей сценарій, що виникає при проходженні глибоких нерівностей, створює максимальний

крутний момент навколо поздовжньої осі рами, що є критичним для оцінки торсійної жорсткості та виявлення зон концентрації напружень



Рисунок 2.1 – Приклад діагонального вивішування автомобіля

Розрахунок динамічного навантаження ($F_{\text{дин}}$):

Максимальна розрахункова маса ($M_{\text{макс}}$): Враховуючи масу баггі (600 кг) та максимальне корисне навантаження (500кг), сумарна маса становить 1100 кг.

Динамічний Коефіцієнт (K_d): Для позашляхової техніки, схильної до сильних ударних навантажень, прийнято $K_d = 3$

1. Розрахункова динамічна сила:

$$F_{\text{дин}} = F_{\text{ст}} \times K_d \approx 5500\text{Н} \times 3,0 = 16500\text{ Н}$$

Таким чином, у симуляції застосовувалося вертикальне навантаження $F_{\text{дин}} = 16500\text{Н}$

3.1.2. Порівняння досліджуваних конфігурацій та вхідні параметри

Дослідження мало порівняльний характер і включало аналіз трьох ключових конфігурацій, які відрізнялися товщиною стінки труб (t). Це

дозволило визначити необхідний мінімальний запас міцності при оптимізації маси рами.

Таблиця 3.1 – Порівняння досліджуваних конфігурацій трубчастої рами за матеріалом, товщиною стінки та розрахунковою масою

Конфігурація	Товщина t (мм)	Матеріал	Межа плинності $\sigma_{\text{пр}}$ (МПа)	Маса рами M (кг)
Модель 1	3	AISI 1020 (аналог Сталь 20)	210	336,8
Модель 2	2,5	AISI 1020 (аналог Сталь 20)	210	297,7
Модель 3	2	AISI 1020 (аналог Сталь 20)	210	258,6
Модель 4	2	AISI 4130 (аналог 30ХГСА)	710	262,4
Модель 5	2,5	AISI 4130 (аналог 30ХГСА)	710	302,3

3.1.3. Покрокова методика проведення статичного аналізу в середовищі SolidWorks Simulation

Чисельне дослідження проводилося в середовищі SolidWorks Simulation методом скінченних елементів.

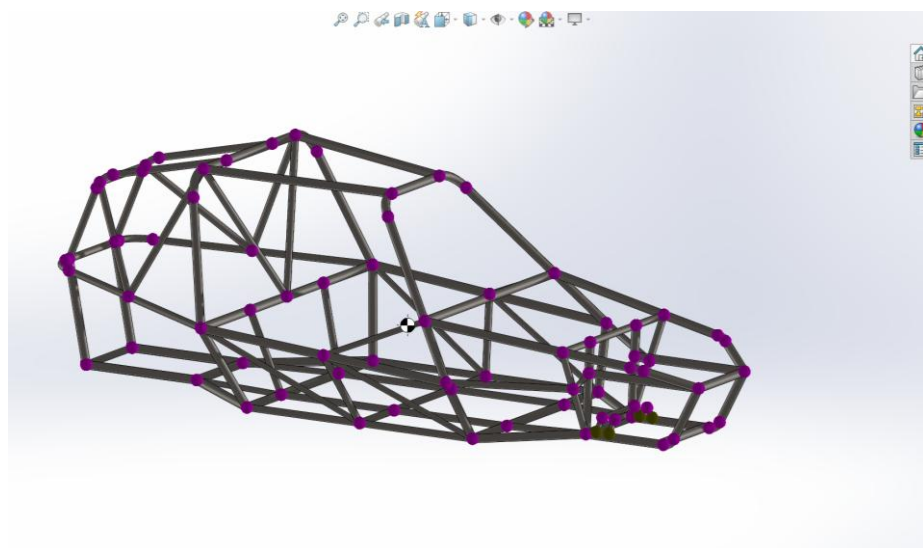


Рисунок 2.2 – Просторова модель трубчастої рами

Усі трубчасті елементи були ідеалізовані як балки (Beam Elements), що значно підвищило швидкість розрахунку просторової ферми без втрати точності. Для коректного моделювання зварних швів використовувалося об'єднання елементів у Joint Group (Група вузлів).

Для імітації діагонального вивішування фіксація була застосована до вузлів кріплення підвіски на передньому правому та задньому лівому куті рами.

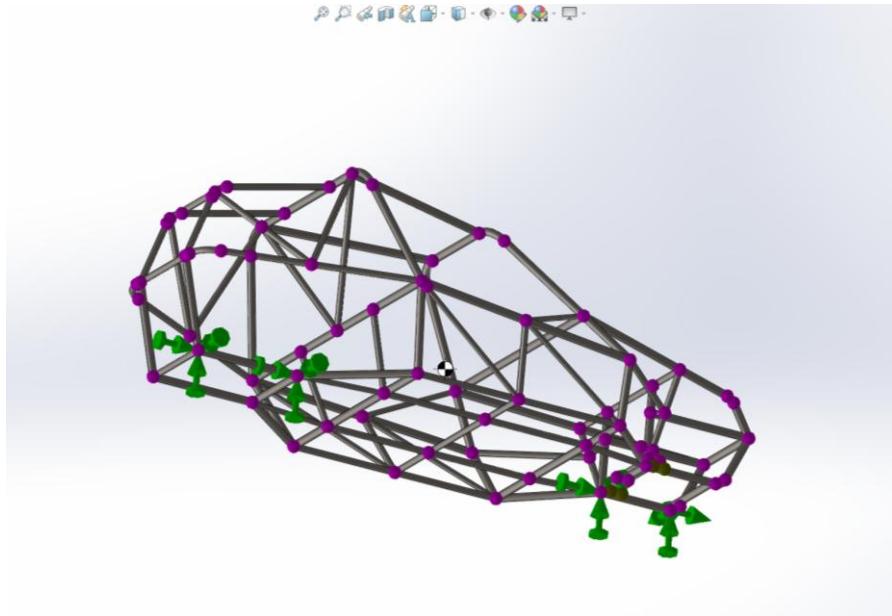


Рисунок 2.3 – Схема фіксації просторової рами

Сила $F_{\text{дин}} = 16500 \text{ Н}$ була прикладена вертикально вниз до вузлів на протилежній діагоналі: передньому лівому та задньому правому кріпленнях підвіски.

Для проведення аналізу було обрано програмне середовище SolidWorks Simulation, що використовує метод кінцевих елементів (МКЕ). Вибір цієї платформи обумовлений її ефективністю в моделюванні та аналізі напружено-деформованого стану (НДС) просторових конструкцій. Важливим методологічним рішенням стала ідеалізація усіх трубчастих елементів як балок (Beam Elements), що значно підвищило швидкість розрахунку просторової ферми без втрати точності інженерного аналізу.

Встановлення коректних граничних умов та навантажень розпочалося з обґрунтування найбільш критичного сценарію — діагонального вивішування. Цей сценарій, що виникає при проходженні глибоких нерівностей, створює максимальний крутний момент навколо поздовжньої осі рами, що дозволяє найточніше оцінити її торсійну жорсткість. Розрахунок динамічної сили ґрунтувався на сумарній масі багті та корисного навантаження 1100 кг з урахуванням динамічного коефіцієнту $K_d = 3$ для техніки, що піддається значним динамічним навантаженням. В результаті, розрахункова динамічна сила, що застосовувалася у симуляції, склала $F_{\text{дин}} = 16500 \text{ Н}$.

Імітація діагонального вивішування була реалізована шляхом фіксації на вузлах кріплення підвіски на передньому правому та задньому лівому куті рами. Навантаження $F_{\text{дин}}$ було прикладене вертикально вниз до вузлів на протилежній діагоналі. Дослідження охоплювало порівняння п'яти ключових конфігурацій (Моделі 1-5), що варіюються за товщиною стінки t (2, 2.5 та 3 мм) та двома різними матеріалами (низьковуглецева AISI 1020 та високоміцна AISI 4130), для оцінки впливу цих параметрів на кінцеву масу рами.

Фінальний аналіз результатів симуляції буде проведений за двома основними критеріями, які визначають придатність конструкції: жорсткість (оцінюється за величиною максимального лінійного зміщення $\Delta L_{\text{макс}}$) та міцність (оцінюється за напруженнями фон Мізеса σ_e та розрахунком запасу міцності n). Обрана методологія дозволяє отримати необхідні дані для обґрунтованого інженерного вибору.

Розділ 3. Аналіз результатів та оптимізація конструкції рами

Метою даного розділу є виконання повного інженерного аналізу міцності та жорсткості розробленої конструкції рами баггі. Кінцева мета — визначення оптимального матеріалу та геометрії труб, що забезпечують необхідний запас міцності ($n \geq 1,5; 2$) та високу торсійну жорсткість (переміщення $\Delta L_{\text{макс}} \leq 3$ мм.) при мінімізації загальної маси.

Усі розрахунки були виконані для критичного сценарію — Static 2 (крутіння рами, діагональне підвішування колеса) з максимальним динамічним навантаженням $F_{\text{дин}} = 16500$ Н.

3.1. Аналіз симуляції конфігурації зі сталі AISI 1020

Для початкового етапу була обрана низьковуглецева конструкційна сталь AISI 1020 (аналог Сталь 20). Цей вибір був зроблений у дослідних цілях, оскільки Сталь 20 є однією з найбільш поширених та доступних марок конструкційної сталі в Україні.

Цей матеріал має низку переваг, включаючи низьку вартість та гарну зварюваність. Проте його обмежена межа плинності (205 МПа) обумовила необхідність проведення чисельного аналізу для встановлення меж застосовності цієї сталі у високодинамічній конструкції.

При використанні мінімально допустимої товщини стінки $t=2,0$ мм конструкція продемонструвала неприйнятні показники:

Максимальне еквівалентне напруження, що виникло у критичних вузлах, склало $\sigma_{e,\text{макс}} \approx 544,3$ МПа. Це значення значно перевищує межу плинності матеріалу. Розрахунковий запас міцності $n \approx 0,38$. Така величина свідчить про миттєве руйнування та перехід матеріалу у пластичну зону при першому критичному навантаженні.

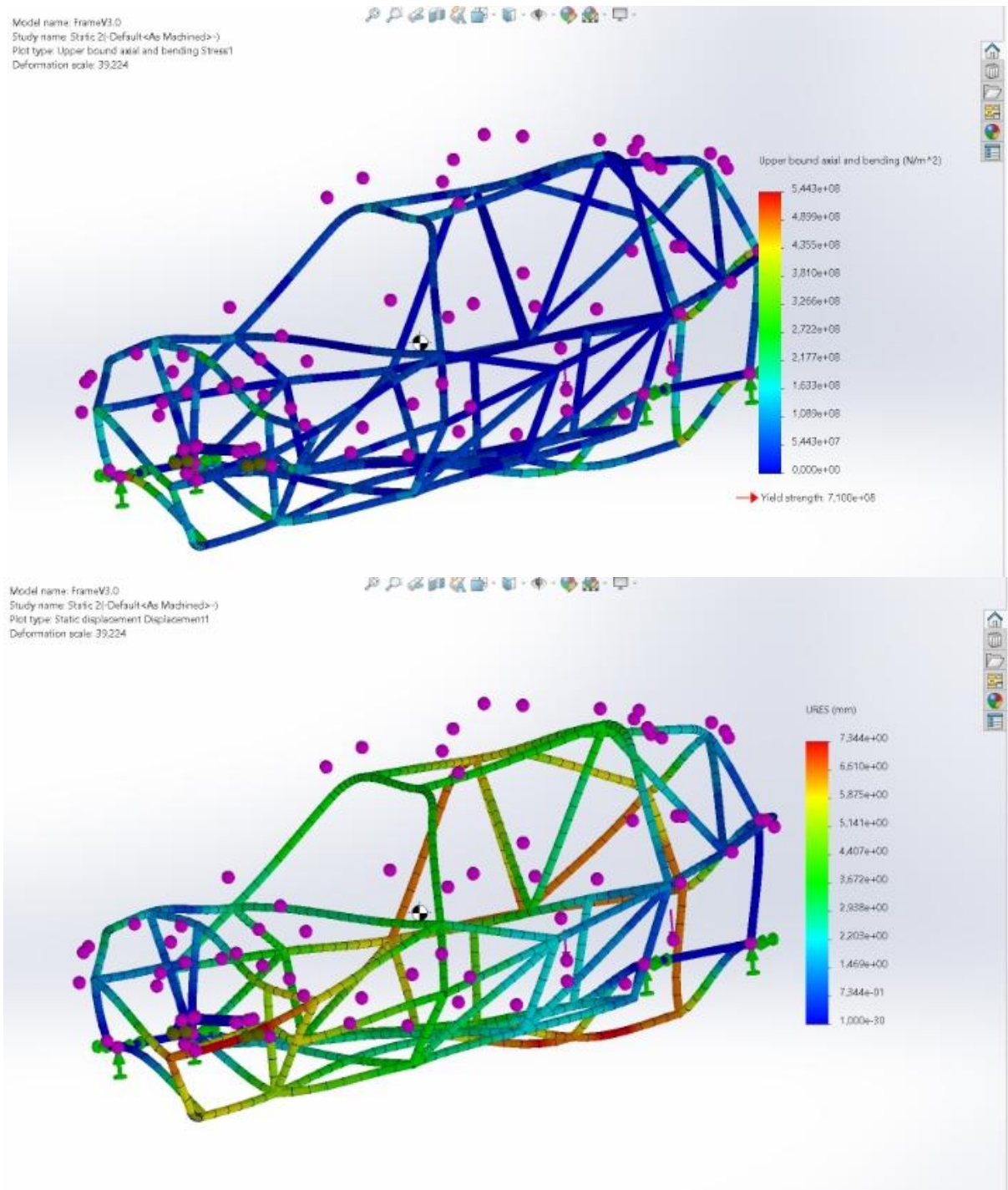


Рисунок 3.1 – Результати чисельного аналізу рами зі сталі марки AISI 1020 та товщиною стінки 2 мм.

Максимальне переміщення склало $\Delta L_{\text{макс}} \approx 7,644$ мм. Така значна деформація свідчить про критично низьку торсійну жорсткість. На практиці це призвело б до неконтрольованої зміни геометрії підвіски та втрати керованості.

Збільшення товщини стінки до $t = 2,5$ мм було кроком до вирішення проблеми за рахунок збільшення моменту інерції перерізу.

Напруження вдалося знизити до $\sigma_{e, \text{макс}} \approx 302,6 \text{ МПа}$. Хоча пікове напруження зменшилося, воно все ще значно перевищує $\sigma_{\text{пр}}$ (205 МПа). Запас міцності залишається неприйнятним $n \approx 0,68$.

Переміщення покращилося, знизившись до $\Delta L_{\text{макс}} \approx 4,864 \text{ мм}$. Незважаючи на покращення, жорсткість все ще недостатня.

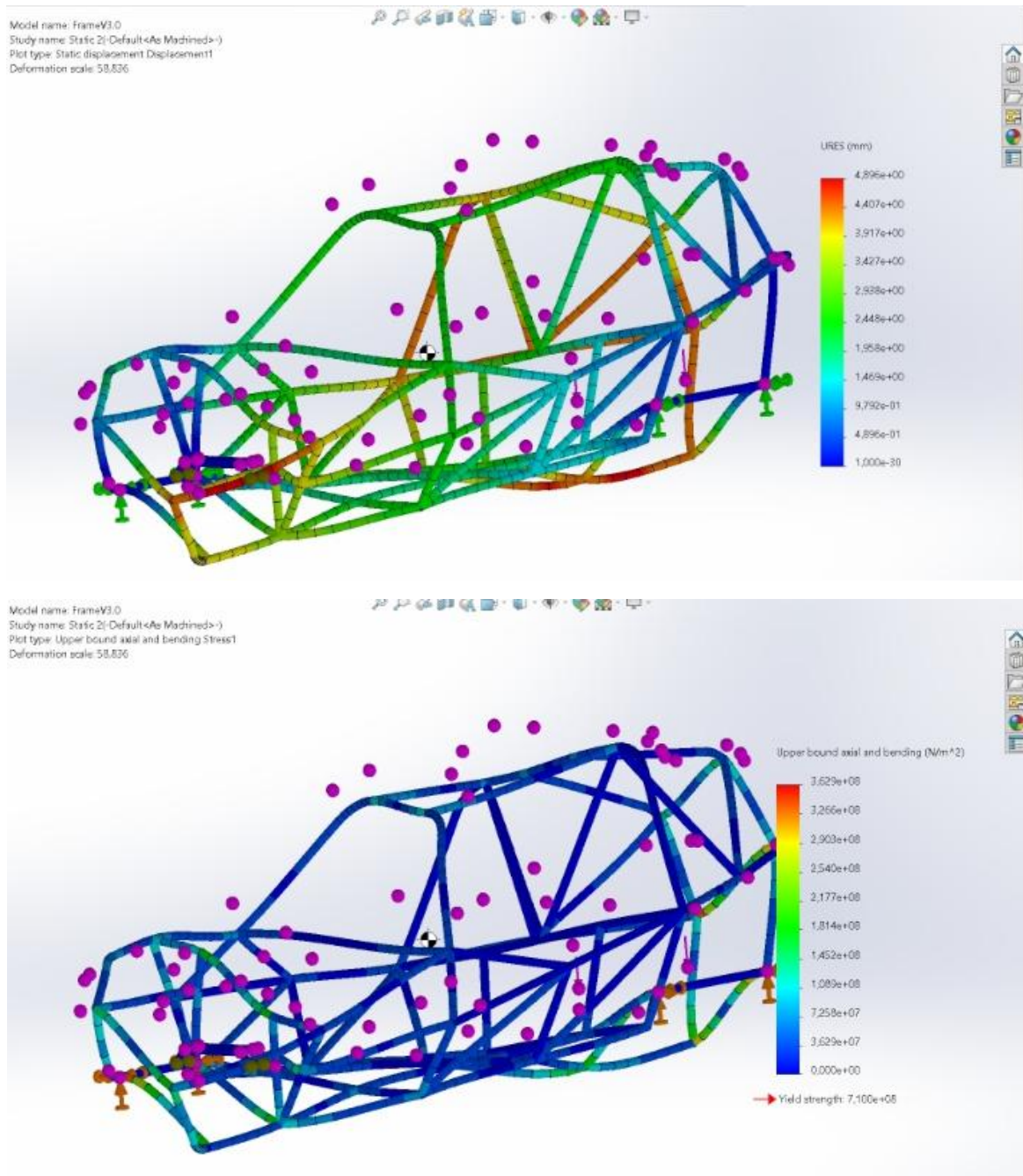


Рисунок 3.2 – Результати чисельного аналізу рами зі сталі марки AISI 1020 та товщиною стінки 2,5 мм.

Тестування максимально можливої товщини $t=3,0$ мм було необхідним для остаточного висновку щодо придатності матеріалу:

Напруження знизилася до $\sigma_{e,\text{макс}} \approx 181,4$ МПа. Це єдиний сценарій, де $\sigma_{e,\text{макс}} < \sigma_{\text{пр}}$. Запас міцності становить $n \approx 1,13$. Хоча формально рама працює у пружній зоні, такий низький запас неприйнятний для забезпечення довговічності та безпеки при динамічних навантаженнях.

Переміщення $\Delta L_{\text{макс}} \approx 2,448$ мм. Цей показник є прийнятним, але досягається ціною суттєвого збільшення маси конструкції.

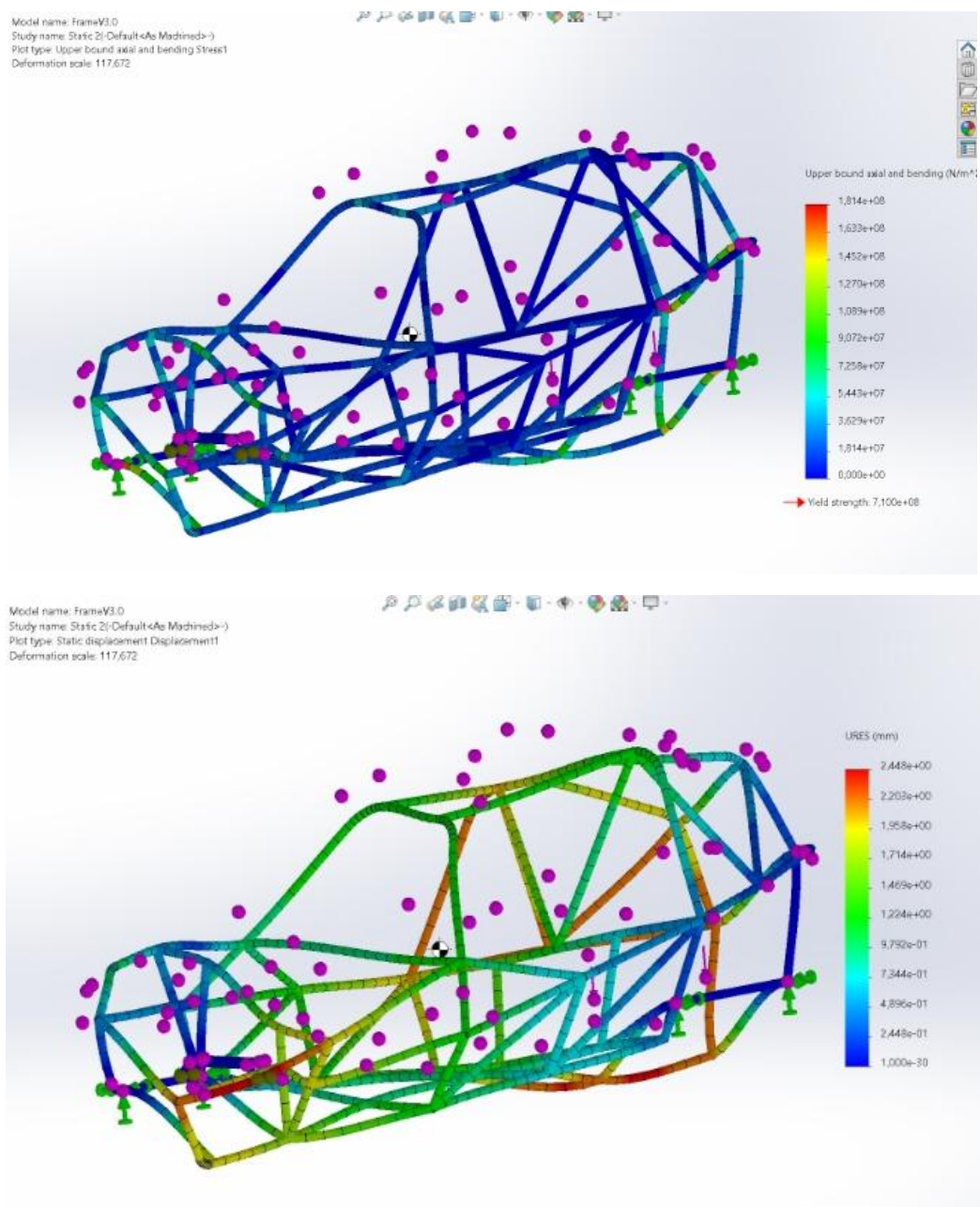


Рисунок 3.3 – Результати чисельного аналізу рами зі сталі марки AISI 1020 та товщиною стінки 3 мм.

3.2. Аналіз симуляції після зміни матеріалу на сталь AISI 4130

Оскільки AISI 1020 не може забезпечити міцність без надмірного збільшення товщини, було прийнято рішення про перехід на хром-молібденову сталь AISI 4130 (аналог 30ХГСА). Цей матеріал має у 3,5 рази вищу межу плинності (710 МПа) при майже ідентичному модулі пружності.

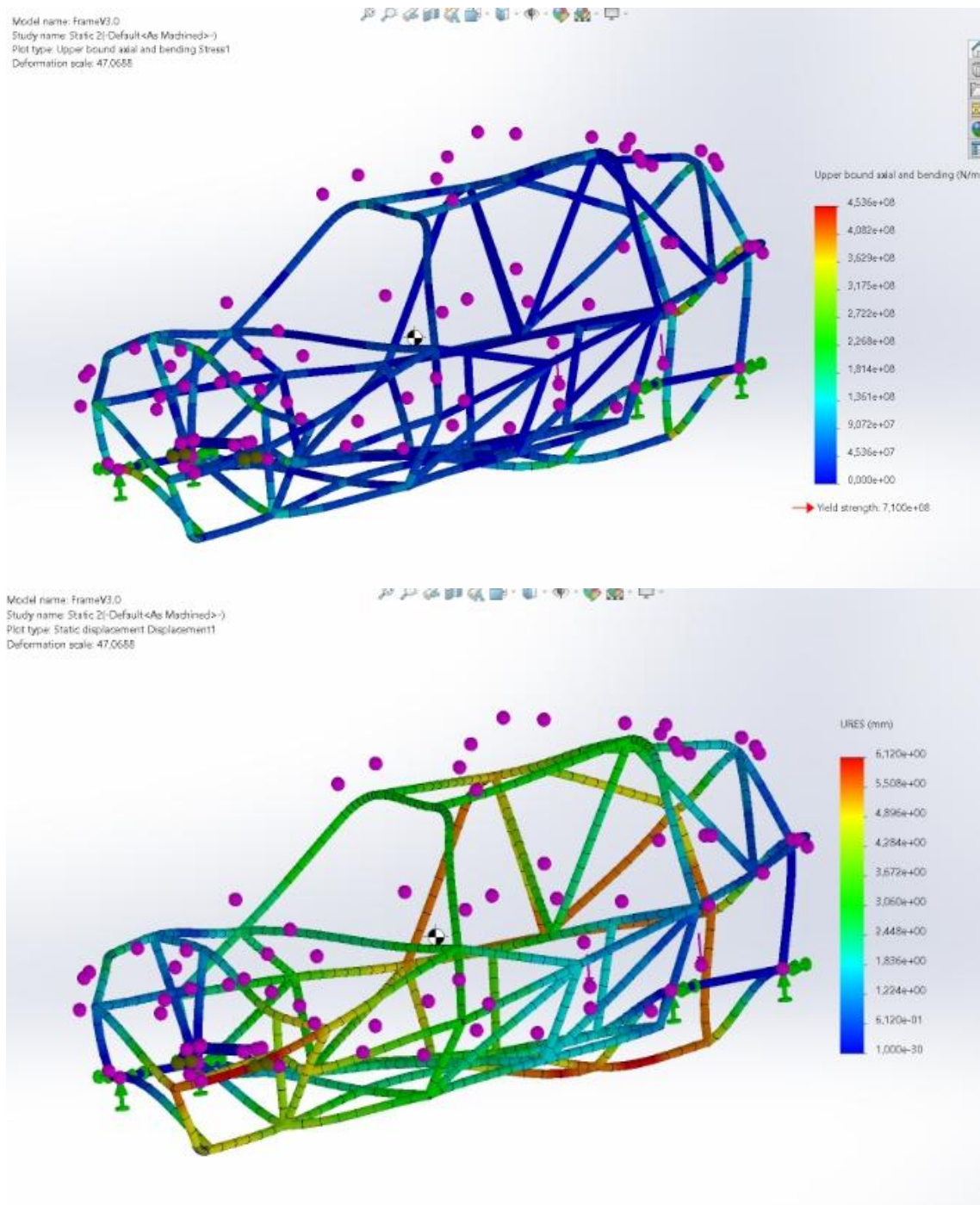


Рисунок 3.4 – Результати чисельного аналізу рами зі сталі марки AISI 4130 та товщиною стінки 2 мм.

Перевірка показала, що AISI 4130 вирішує проблему міцності при мінімальній товщині:

$\sigma_{e, \text{макс}} \approx 430,6 \text{ МПа}$. Запас міцності $n \approx 1,65$. Це задовільний результат, що підтверджує, що матеріал витримує навантаження.

$\Delta L_{\text{макс}} \approx 6,120 \text{ мм}$. Жорсткість залишається недостатньою, оскільки жорсткість залежить від геометрії, а не міцності матеріалу.

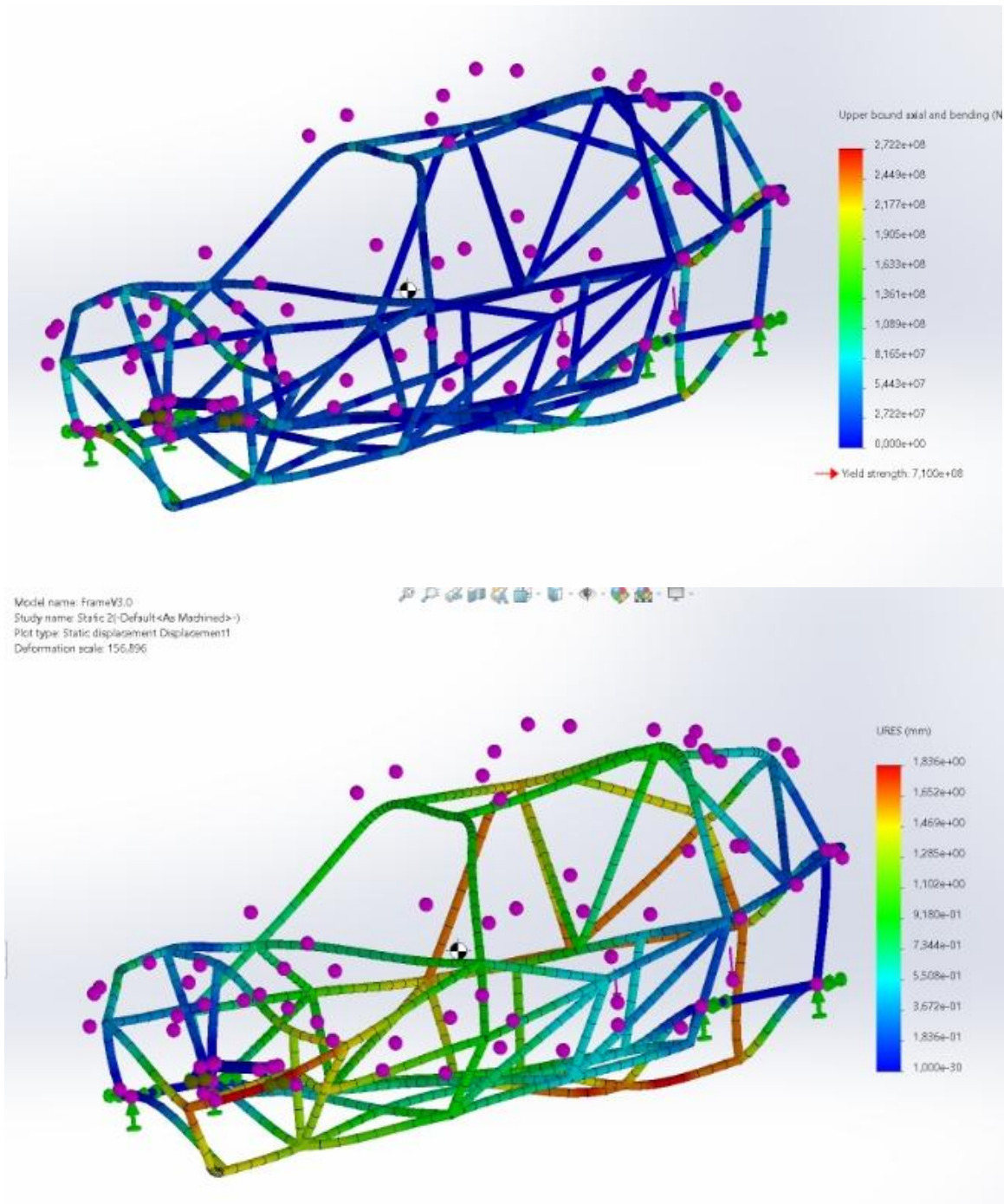


Рисунок 3.5 – Результати чисельного аналізу рами зі сталі марки AISI 4130 та товщиною стінки 2,5 мм.

Конфігурація $t=2,5\text{мм}$ була протестована як оптимальний компроміс, який має забезпечити необхідну жорсткість без переходу до $t=3,0\text{ мм}$.

$\sigma_{e,\text{макс}} \approx 272,2\text{ МПа}$. Запас міцності $n \approx 2,61$. Це надмірний запас, що дає високу гарантію надійності та безпеки.

$\Delta L_{\text{макс}} \approx 1,836\text{ мм}$. Ідеальна торсійна жорсткість досягнута. Переміщення менше, ніж у AISI 1020 ($t=3\text{ мм}$), при меншій товщині стінки.

Таблиця 3.1. Порівняння ключових показників протестованих конфігурацій

Конфігурація	Товщина t (мм)	Запас Міцності n	$\Delta L_{\text{макс}}$ (мм)	Рішення
AISI 1020	2,0	0,38	7,644	Руйнування
AISI 1020	2,5	0,68	4,864	Неприйнятно
AISI 1020	3,0	1,13	2,448	Недостатній n , надмірна маса
AISI 4130	2,0	1,65	6,120	Задовільний n , недостатня жорсткість
AISI 4130	2,5	2,61	1,836	Оптимальна

Висновки до розділу

Проведений чисельний аналіз за п'ятьма різними конфігураціями дозволив повноцінно оцінити реакцію трубчастої рами багті на критичне торсійне навантаження $F_{\text{дин}} = 16500\text{ Н}$. Дослідження підтвердило, що вибір матеріалу та товщини стінки труб має вирішальне значення для забезпечення експлуатаційної надійності та мінімізації маси конструкції.

На першому етапі було встановлено непридатність низьковуглецевої сталі AISI 1020 (аналог Сталь 20) для даної конструкції, незважаючи на її широку доступність. Навіть при максимальному збільшенні товщини стінки до $t=3\text{ мм}$, що забезпечувало прийнятну жорсткість $\Delta L_{\text{макс}} \approx 2,448\text{ мм}$,

матеріал не зміг забезпечити необхідний запас міцності: максимальне напруження $\sigma_{e,\text{макс}} \approx 181,4$ МПа призводило до критично низького запасу $n \approx 1,13$. Це свідчить про те, що для високодинамічної техніки, де потрібен мінімальний запас міцності $n \geq 1,5$, використання AISI 1020 є неприйнятним.

Подальша оптимізація передбачала перехід на високоміцну хром-молібденову сталь AISI 4130 (аналог 30ХГСА) з $\sigma_{\text{пр}} = 710$ МПа. Навіть при мінімальній товщині $t=2,0$ мм цей матеріал забезпечив необхідний запас міцності $n \approx 1,65$. Проте, цей варіант був відхилений через недостатню торсійну жорсткість, що виразилася у великому переміщенні $\Delta L_{\text{макс}} \approx 6,120$ мм.

Остаточним інженерним рішенням була обрана конфігурація AISI 4130 з товщиною стінки $t=2,5$ мм. Цей варіант забезпечив ідеальний баланс між міцністю та жорсткістю: досягнуто надмірного запасу міцності $n \approx 2,61$ та ідеальної торсійної жорсткості з мінімальним переміщенням $\Delta L_{\text{макс}} \approx 1,836$ мм. Таким чином, завдяки оптимізації матеріалу, вдалося досягти високої надійності та жорсткості, зберігаючи при цьому оптимальну масу конструкції.

РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ, ТЕХНОЛОГІЧНА ТА ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА ПРОЄКТУ

Забезпечення охорони праці під час проєктування, виготовлення та експлуатації трубчастої рами баггі є одним з основних аспектів, що визначають безпеку не лише працівників, які беруть участь у виготовленні конструкції, а й самого пілота під час подальшого використання рами в умовах екстремальної експлуатації. Комплекс заходів з охорони праці охоплює весь життєвий цикл виробу — від комп'ютерного проєктування до випробувань готової конструкції. Окрім прямої охорони праці, необхідно інтегрувати вимоги щодо екологічної та технологічної безпеки, щоб забезпечити стійкість та якість виробничого процесу.

4.1. Безпека та ергономіка під час проєктування у Solidworks

Робота інженера-конструктора є переважно інтелектуальною, але тривале перебування у нерухомому положенні та інтенсивне зорове навантаження створюють значні ризики для здоров'я. Тому першочерговим завданням є забезпечення ергономічних та безпечних умов праці на робочому місці.

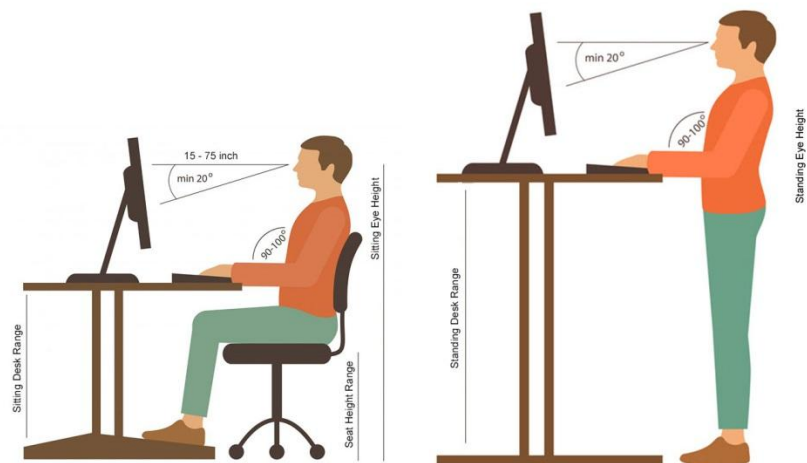


Рисунок 4.1 – Приклад правильно організованого робочого місця
конструктора

Робоче місце інженера, який використовує програмне забезпечення SolidWorks, має бути організоване згідно з вимогами ДСТУ EN 1335 та чинними санітарними нормами.

Необхідне використання ергономічного крісла з регульованою висотою, нахилом спинки та підлокітниками для підтримки поперекового відділу хребта. Стіл повинен мати матову поверхню для запобігання відблискам.

Монітор, як основне джерело візуальної інформації, має розташовуватись на відстані 50–70 см від очей користувача, а його верхній край повинен бути на рівні очей або трохи нижче. Це запобігає нахилу голови вперед і знижує навантаження на шийний відділ хребта.

4.1.1. Профілактика зорового та опорно-рухового навантаження

Тривала робота з CAD-моделями у SolidWorks вимагає високої концентрації, що призводить до втоми очей та м'язової напруги.

Рекомендовано застосовувати міжнародне правило "20–20–20" — кожні 20 хвилин роботи необхідно відводити погляд на 20 секунд на об'єкт, розташований на відстані 20 футів (приблизно 6 метрів). Яскравість монітора повинна бути налаштована відповідно до освітлення у приміщенні.

Рекомендовані регулярні короткі перерви (5–10 хвилин) кожну годину для виконання фізичних вправ, розминки шиї та кистей рук.

4.1.2. Безпека даних та програмного забезпечення

Надійність проєкту безпосередньо залежить від цілісності даних.

Важливо регулярно зберігати результати моделювання (файли .SLDPRT, .SLDASM) на резервні носії (зовнішні диски) або використовувати хмарні сховища (наприклад, SolidWorks PDM або Drive) з можливістю контролю версій. Це запобігає втраті даних у разі апаратного збою або кібератаки.

Користування виключно ліцензійним програмним забезпеченням гарантує стабільність роботи, отримання своєчасних оновлень та захист від шкідливого ПЗ, яке може призвести до непередбачуваних помилок у моделюванні.

4.2. Безпека при обробці та зварюванні труб

Виготовлення трубчастої рами баггі, особливо з високоміцної сталі AISI 4130, передбачає велику кількість операцій з механічної обробки (різання, свердління, шліфування) та зварювання. Кожен з цих етапів супроводжується підвищеним ризиком.

Зварювання — найбільш небезпечний етап виробництва, який поєднує ризики ураження електричним струмом, опіків, впливу ультрафіолетового та інфрачервоного випромінювання, а також отруєння газами.

Робоче місце повинно бути оснащено припливно-витяжною вентиляцією (забезпечення виведення шкідливих випарів) та виготовлене з негорючих матеріалів. Важливо не допускати на робоче місце сторонніх осіб та використовувати захисні екрани або щити для захисту оточуючих від зварювального світла.



Рисунок 4.2 – Робота зварювальника з дотриманням вимог безпеки

Перед початком робіт слід обов'язково перевірити справність зварювального обладнання, цілісність ізоляції кабелів, а також надійність заземлення усіх електричних інструментів та зварювального апарату. Для освітлення замкнутих або герметичних просторів слід використовувати переносне світильне обладнання, щоб уникнути ураження струмом.

Суворе використання ЗІЗ є обов'язковим для кожного працівника, який бере участь у зварювальних роботах.

Таблиця 4.1 – Перелік ЗІЗ при виконання зварювальних робіт

Частина тіла	Засіб захисту	Пояснення
Тіло	Спецодяг (інфрачервонозахистний комбінезон, чоревики, рукавиці)	Від гарячих іскор, дії дуги
Зір	Зварювальна маска зі світлофільтром	Захист від UV/IR, попередження "зайчика"
Дихальні шляхи	Маска-респіратор або витяжна система	Від пилу, газів та аерозолів згідно з інфографікою
Світло	Переносне світильне з напругою ≤ 42 В (≤ 12 В у герметичних просторах)	Перешкоджає ураженню струмом

4.3. Техніка безпеки при механічній обробці та монтажі

Підготовчий етап, включаючи різання, свердління, зачищення та притискання труб, також вимагає дотримання суворих правил безпеки.

До роботи допускається лише справний, перевірений інструмент (різакі, свердла, трубозгиначі). Труби повинні бути надійно зафіксовані у спеціальних пристроях або лещатах, щоб запобігти їх обертанню, зміщенню чи падінню, що може спричинити серйозні травми.

У процесі різання та шліфування обов'язкове використання захисних окулярів або щитків, оскільки утворення металевої стружки та іскор є неминучим. Шліфування має відбуватися у напрямку, що відводить іскри від працівника та горючих матеріалів.

Після різання необхідно видалити задирки та гострі краї (фаски), щоб уникнути порізів під час подальшої роботи з елементами рами.

Під час складання просторової ферми всі елементи мають бути тимчасово зафіксовані (прихватками). Надійність прихваток повинна гарантувати, що рама не розвалиться до фінального зварювання.

Після фінального зварювання з'єднання слід охолоджувати природним способом (на повітрі). Заборонено використовувати прискорене охолодження (водою або стисненим повітрям), оскільки це може призвести до термічного розтріскування матеріалу та погіршення механічних властивостей (особливо для легованої сталі AISI 4130).

4.4. Заходи пожежної та екологічної безпеки

Ризики, пов'язані з роботою з відкритим полум'ям та високотемпературними процесами, вимагають ретельного планування заходів пожежної безпеки, а також мінімізації негативного впливу на навколишнє середовище.

4.4.1. Пожежна Безпека

Робоче приміщення повинно бути обладнане необхідними засобами пожежогасіння, включаючи вуглекислотні або порошкові вогнегасники (придатні для гасіння електрообладнання під напругою та металів), азбестові покривала та ящики з піском.

Обов'язкова наявність схеми евакуації та чітких інструкцій щодо дій у разі пожежі. Особливу увагу слід приділити перевірці стану електромереж та справності вентиляційних систем перед початком робочої зміни.

Необхідно суворо контролювати відсутність горючих та легкозаймистих матеріалів у зоні зварювання та шліфування.

4.4.2. Екологічна Безпека

Металеві відходи (обрізки труб, стружка) повинні збиратися окремо та передаватися на вторинну переробку. Це мінімізує вплив виробництва на навколишнє середовище.

Всі шкідливі гази та аерозолі, що утворюються під час зварювання, повинні ефективно видалятися витяжною вентиляцією та фільтруватися відповідно до екологічних стандартів, запобігаючи забрудненню повітря робочої зони та довкілля.

4.5. Інструктаж та надання першої допомоги

Усі працівники, що беруть участь у виготовленні рами, зобов'язані пройти повний комплекс навчання з охорони праці:

Обов'язкове проведення вступного та первинного інструктажу з охорони праці. Результати фіксуються у журналі реєстрації інструктажів.

Рекомендовано, щоб усі працівники проходили навчання з надання першої домедичної допомоги, особливо щодо специфічних травм, таких як опіки, поранення, або ураження електричним струмом.

На підприємстві повинна бути укомплектована аптечка першої допомоги, а також щит безпеки з наочними інструкціями щодо безпечних методів роботи та дій у непередбачуваних ситуаціях.

Висновки за розділом

У межах реалізації проекту трубчастої рами баггі забезпечення безпеки є невід'ємною частиною технологічного процесу. Комплекс заходів охоплює ергономіку праці, технологічну безпеку та пожежну безпеку. На етапі

проектування критично важливим є забезпечення ергономічних умов роботи інженера, що включає правильне розташування обладнання, гігієну зору (за правилом "20–20–20") та регулярне резервне збереження даних.

Під час виготовлення конструкції основну увагу слід приділити дотриманню вимог безпеки при зварюванні та механічній обробці високоміцних сталей. Працівники повинні бути забезпечені та використовувати засоби індивідуального захисту (ЗІЗ), зокрема зварювальну маску, вогнетривкий одяг та респіратори, а робоче місце має бути обладнане ефективною витяжною вентиляцією та заземленням обладнання. Особливої уваги потребують заходи пожежної безпеки (наявність вуглекислотних вогнегасників та азбестових покривал) та інструктажний процес (ведення журналу інструктажів та навчання персоналу наданню першої допомоги). Таким чином, усі вжиті заходи мінімізують ризики травматизму та забезпечують високу якість виготовлення рами баггі.

РОЗДІЛ 5. ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

5.1. Економічна ефективність методології дослідження в середовищі SolidWorks Simulation

Впровадження методу скінченних елементів (МКЕ) у програмному середовищі SolidWorks Simulation є не лише інженерною, але й ключовою економічною перевагою проєкту.

Традиційний цикл проєктування "Проєктування → Виготовлення → Фізичне Тестування → Коригування" є надзвичайно витратним. Чисельний аналіз дозволив протестувати п'ять різних ітерацій конструкції (зміна матеріалу та товщини стінки) віртуально. Якби ці випробування проводилися фізично, це вимагало б створення та руйнування щонайменше п'яти повнорозмірних прототипів рами.

Собівартість матеріалу для однієї рами з AISI 4130 ($t = 2,5$ мм) становить приблизно 36240 грн. Сумарні витрати лише на матеріал для п'яти прототипів перевищили б 180000 грн. До цієї суми необхідно додати витрати на зварювальні роботи (праця висококваліфікованих зварників), лабораторні випробування (стенди для торсійних тестів) та утилізацію зруйнованих конструкцій.

Використання SolidWorks Simulation дозволило уникнути створення та руйнування чотирьох неоптимальних прототипів. Натомість, всі виявлені проблеми (критично низький запас міцності $n < 1,0$ у AISI 1020 та недостатня жорсткість у AISI 4130 $t = 2,0$ мм) були виправлені на етапі моделювання.

5.1.1. Скорочення часу виведення продукту на ринок.

Економічна ефективність методології також вимірюється часом. Моделювання дозволяє миттєво оцінити чутливість конструкції до зміни параметрів. Це дозволило скоротити цикл оптимізації з місяців до днів,

забезпечуючи швидке переведення проєкту з фази розробки до фази виробництва. Таким чином, витрати на програмне забезпечення та робочий час інженера-аналітика виявилися на порядки меншими, ніж потенційні втрати від затримок у виробництві та високих витрат на фізичне тестування.

5.2. Порівняльний аналіз собівартості матеріалу (AISI 1020 та AISI 4130)

Фінальний економічний вибір полягав у порівнянні технічно неоптимального, але дешевого варіанту (AISI 1020, $t = 3,0$ мм) та технічно оптимального (AISI 4130, $t = 2,5$ мм).

Для відображення ринкової реальності в Україні, у розрахунках використано середні цінові показники українських аналогів:

AISI 1020 $\approx$ Сталь 20 (низьковуглецева сталь).

AISI 4130 $\approx$ Сталь 30ХГСА (хром-кремній-марганцева сталь, "Хромасіл") — високоміцний конструкційний матеріал.

Таблиця 5.1 – Зведена таблиця порівняння параметрів конфігурацій

Показник	Одиниця	AISI 1020 $t=3$ мм	AISI 4130 $t=2,5$ мм
Український Аналог	-	Сталь 20	Сталь 30ХГСА
Технічна придатність	-	Недостатній $n \approx 1,13$	Оптимальна $n \approx 2,61$
Маса рами M	кг	336,8	302,3
Середня ринкова ціна сировини C_m	грн / кг	≈ 45	≈ 120

Розрахунок собівартості матеріалу рами

1. Собівартість для AISI 1020 ($t = 3,0$ мм):

$$B_{1020} = 336,8 \text{ кг} \cdot 45 \text{ грн/кг} = 15156$$

2. Собівартість для AISI 4130 ($t = 2,5$ мм):

$$B_{4130} = 302,3 \text{ кг} \cdot 120 \text{ грн/кг} \approx 36276$$

4.3. Обґрунтування економічної доцільності переплати

Різниця в собівартості матеріалу становить ≈ 20000 грн, що є збільшенням на 134%. Незважаючи на це, переплата є економічно обґрунтованою з наступних причин:

Конфігурація з AISI 1020 ($t = 3,0$ мм) не відповідає ключовій інженерній вимозі (запас міцності $n < 1,5$), що означає її повну небезпечність та непридатність для серійної експлуатації. Фактично, 20000 грн. — це мінімальна ціна, необхідна для перетворення непрацюючої, потенційно аварійної конструкції на надійний виріб.

Використання AISI 4130 дозволило знизити товщину стінки (з 3,0 мм до 2,5 мм), що призвело до зменшення маси рами на $\approx 34,5$ кг. Це є критичним показником для гоночної та позашляхової техніки:

Значно вищий запас міцності ($n = 2,61$ проти $n = 1,13$) та краща жорсткість ($\Delta L_{\text{макс}} = 1,836$ мм проти 2,448 мм) гарантують, що конструкція з AISI 4130 витримає значно більшу кількість циклів навантаження без появи втомних тріщин. Це мінімізує ризики катастрофічних поломок під час експлуатації, що у довгостроковій перспективі робить високоміцну сталь економічно вигіднішою.

Висновки до розділу

Використання програмного забезпечення SolidWorks Simulation для інженерного аналізу методом скінченних елементів забезпечило значну економію ресурсів. Цей метод дозволив віртуально протестувати п'ять ітерацій конструкції, уникнувши дороговартісного створення та руйнування фізичних прототипів. Такий підхід суттєво скоротив цикл "Проектування $\rightarrow$ Тестування", мінімізувавши витрати на матеріали, зварювальні роботи та лабораторні випробування, що є критичним фактором для стартапів та НДДКР.

Хоча собівартість матеріалу для технічно оптимальної конфігурації AISI 4130 $t=2,5$ мм виявилася вищою порівняно з неоптимальною AISI 1020 $t=3,0$ мм, ця переплата є технічно обов'язковою. Конфігурація з AISI 1020 не відповідає ключовій інженерній вимозі (запас міцності $n < 1,5$), що означає її непридатність для безпечної експлуатації.

Переплата за високоміцний матеріал компенсується значною експлуатаційною економією та підвищенням продуктивності. Використання AISI 4130 дозволило зменшити масу рами на 34,5 кг при одночасному підвищенні запасу міцності n 1,13 до 2,61 та покращенні жорсткості $\Delta L_{\text{макс}}$ з 2,448 мм до 1,836 мм. Зниження маси прямо впливає на підвищення продуктивності, зменшення зносу підвіски, та зниження експлуатаційних витрат протягом життєвого циклу баггі.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ

Для аналізу напружено-деформованого стану конструкції був успішно застосований метод скінченних елементів у середовищі SolidWorks Simulation. Цей метод дозволив змодельовати найбільш критичний сценарій — діагональне вивішування — з розрахунковим динамічним навантаженням $F_{\text{дин}} = 16500 \text{ Н}$, що забезпечило достовірність результатів дослідження.

Чисельний аналіз п'яти конфігурацій довів, що використання найбільш поширеної в Україні низьковуглецевої сталі AISI 1020 (аналог Сталь 20) є неприйнятним. Навіть при максимальній товщині стінки $t=3 \text{ мм}$, ця сталь забезпечила запас міцності $n \approx 1,13$, що є критично низьким і не відповідає вимогам безпеки

Технічно оптимальним вибором для конструкції трубчастої рами баггі визнана хром-молібденова сталь AISI 4130 (аналог 30ХГСА) з товщиною стінки $t=2 \text{ мм}$. Ця конфігурація досягла ідеального балансу між міцністю та жорсткістю:

- Запас міцності: $n \approx 2,61$, більш ніж достатньо для забезпечення довговічності та безпеки.
- Торсійна жорсткість: Максимальне зміщення $\Delta L_{\text{макс}} = 1,836 \text{ мм}$ відповідає високим вимогам до керованості

Хоча перехід на високоміцну сталь AISI 4130 призвів до збільшення собівартості матеріалу на 20000 грн. порівняно з неоптимальною AISI 1020, ця переплата є технічно необхідною та економічно доцільною. Використання AISI 4130 дозволило зменшити загальну масу рами на 34,5 кг та забезпечити неперевершений рівень безпеки та довговічності, що компенсує первинні витрати за рахунок зниження експлуатаційних витрат.

У розділі "Охорона Праці" були розроблені детальні заходи для мінімізації ризиків на виробництві, включаючи ергономічні вимоги для інженера, а також суворі правила безпеки при зварюванні легованих сталей

(використання ЗІЗ, вентиляція та контроль термічного режиму), що є обов'язковою умовою для якісного виготовлення рами баггі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДСТУ EN ISO 15607:2019. Технічні вимоги та атестація процедур зварювання металевих матеріалів. Загальні правила. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2019.
2. ДСТУ 3757-98. Безпека у надзвичайних ситуаціях. Технологічна безпека. Загальні положення. Київ: Держстандарт України, 1998.
3. ISO 3834-2:2005. Quality requirements for fusion welding of metallic materials — Part 2: Comprehensive quality requirements. International Organization for Standardization, 2005.
4. ISO 630-3:2012. Structural steels — Part 3: Technical delivery conditions for fine grain structural steels. International Organization for Standardization, 2012.
6. Ванденберг Г. О., Мельник В. В. Комп'ютерне моделювання та розрахунки конструкцій: Навч. посібник. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2015.
7. Фініков А. Н., Заїка В. Т. Міцність матеріалів та основи конструювання: Навч. посібник. К.: Аграрна освіта, 2010.
8. Світлицький В. А. Механіка машин. Том 1. Основи розрахунку та проектування. К.: Вища школа, 2003.
9. Глущенко В. В., Дзядик В. Г. Основи охорони праці: Навч. посібник. К.: Аграрна освіта, 2018.
10. Geres, J. M., & Goodno, B. J. Mechanics of Materials. 8th ed. Cengage Learning, 2014.
11. Shigley, J. E., Budynas, R. G., & Nisbett, J. K. Shigley's Mechanical Engineering Design. 10th ed. McGraw-Hill Education, 2015.
12. Haug, E. J. Computer-Aided Kinematics and Dynamics of Mechanical Systems. Vol. I: Basic Methods. Allyn and Bacon, 1989.
13. SAE J1058. Welding of Automotive Structures. Society of Automotive Engineers, 2018.

14. Аналітичний огляд методів підвищення торсійної жорсткості рам позашляхових транспортних засобів. / В. І. Коваленко, С. В. Микитин // Вісник машинобудування та транспорту. — 2018. — № 4. — С. 45–52.
15. Оцінка напружено-деформованого стану трубчастих рам транспортних засобів методом скінченних елементів. / С. Р. Левченко, М. О. Дубенко // Автомобільний транспорт: Зб. наук. пр. — 2019. — Вип. 44. — С. 110–118.
16. Дослідження впливу товщини стінки труб на жорсткість просторової ферми баггі. / П. А. Захаров // Сучасні проблеми машинобудування. — 2022. — № 2. — С. 78–85.
17. Технологічні особливості зварювання легованих сталей (AISI 4130 / 30ХГСА) в умовах одиничного виробництва. / О. А. Петренко // Зварювальне виробництво та споріднені технології. — 2021. — № 1. — С. 20–25.
18. Економічна ефективність застосування високоміцних сталей у легкових конструкціях. / І. О. Бєлов // Економіка та організація виробництва. — 2020. — № 3. — С. 55–61.
19. Comparative study of chassis rigidity for off-road vehicles using FEM simulation. / M. F. Al-Sayed // International Journal of Vehicle Design. — 2017. — Vol. 75, No. 3.
20. Static and fatigue analysis of a tubular space frame chassis for all-terrain vehicle. / A. S. Kumar // Materials Today: Proceedings. — 2021. — Vol. 46, Part 15.