

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

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**«Аналіз міцності та вибір матеріалу важеля тяги
підвіски вантажного трициклу»**

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

Шифр КвРМТВА. 22143.01.14.00

Виконав студент 4 курсу група МТВА-22-1


Підпис

Валерій МЕЛЬНИКОВ

Керівник к.т.н., доцент каф. ТАМ


Підпис

Сергій ПОСОНСЬКИЙ

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

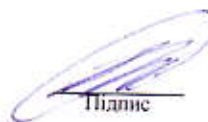

Підпис

Олег БАБАК

До захисту допускаю:
Завідувач кафедри ТАМ

11.06.2026 р

Дата


Підпис

Олександр ДИХА

Хмельницький, 2026

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

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

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ТАМ


Диха О.В.
15.04 2026 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Мельникову Валерію Валерійовичу

Прізвище, ім'я, по батькові

1. Тема роботи: *«Аналіз міцності та вибір матеріалу важеля тяги підвіски вантажного трициклу»*

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

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

2. Строк подання студентом проекту (роботи) на кафедру 12.06.2026 р.

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

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

1) *Аналіз транспортних велосипедів та їх підвісок.*

2) *Метод моделювання.*

3) *Аналіз результатів моделювання важеля підвіски.*

4) *Висновки, рекомендації*

5. Перелік графічного матеріалу (презентація):

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

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

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

7. Дата видачі завдання 15.04 2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва розділу кваліфікаційної роботи	Строк виконання	Примітка
1	<i>Аналіз транспортних велосипедів та їх підвісок</i>	14.04.26	вик
2	<i>Метод моделювання</i>	16.05.26	вик
3	<i>Аналіз результатів моделювання важеля підвіски</i>	26.05.26	вик
4	<i>Оформлення роботи, висновки.</i>	12.06.26	вик
5	<i>Захист кваліфікаційної роботи</i>	14.06.26	

Студент


Підпис

Валерій МЕЛЬНИКОВ

Керівник кваліфікаційної роботи


Підпис

Сергій ПОСОНСЬКИЙ

тему
ванта
списку
сторін
сторін
рисун

оснащ
Перед
перева
констр
Зниже
дозвол

підтве
Макф
трансп
прове
праце

напру
матер
статич
показ
негат

на ос
EduPa
харак
забез
елеме

ВАЖ
ДЕФО
МОД
4340.

РЕФЕРАТ

Студент групи : МТВА-22-1 Мельников В.В.

Структура та обсяг пояснювальної записки. Кваліфікаційна робота на тему «Аналіз міцності та вибір матеріалу важеля тяги підвіски вантажного трициклу» складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел, який налічує 16 найменувань, розміщених на 2 сторінках, та 1 додатку розміщених на 13 сторінках. Роботу викладено на 64 сторінках, з них 56 сторінки основного тексту, на яких розміщено 27 рисунків і 11 таблиць.

У роботі розглядається концепція прототипу вантажного велосипеда, оснащеного підвіскою типу Макферсон із поперечними важелями. Передбачається, що застосування даного типу підвіски може мати суттєві переваги для транспортного велосипеда, зокрема за рахунок зменшення маси конструкції та більш ефективного використання конструктивного простору. Зниження маси велосипеда при перевезенні вантажів меншої ваги потенційно дозволяє збільшити дальність його руху.

Основною проблемою запропонованого прототипу є відсутність підтверджених даних щодо міцності поперечного важеля підвіски Макферсона за умов максимального експлуатаційного навантаження транспортного велосипеда. У зв'язку з цим виникає необхідність у проведенні міцнісного аналізу даного елемента з метою оцінювання його працездатності та надійності.





За результатами аналізу встановлено, що максимальні ефективні напруження за критерієм фон Мізеса є значно нижчими за межу текучості матеріалу, що свідчить про достатній запас міцності важеля тяги за умов статичного навантаження. Чисельний аналіз методом скінченних елементів показав відсутність небезпечних деформацій і переміщень, які могли б негативно вплинути на роботу підвіски.

У роботі також проведено обґрунтований вибір матеріалу важеля тяги на основі багатокритеріального аналізу з використанням бази даних CES EduPack. За сукупністю міцнісних, масових та експлуатаційних характеристик обрано низьколеговану нормалізовану сталь AISI 4340, яка забезпечує необхідну надійність та відповідає вимогам до конструктивного елемента транспортного велосипеда.

Ключові слова: ПІДВІСКА ТРАНСПОРТНОГО ВЕЛОСИПЕДА, ВАЖІЛЬ ТЯГИ, МЕТОД СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ, НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАННИЙ СТАН, ЕФЕКТИВНІ НАПРУЖЕННЯ, САД-МОДЕЛЮВАННЯ, ВИБІР МАТЕРІАЛУ, НИЗЬКОЛЕГОВАНА СТАЛЬ AISI 4340.

ЗМІСТ

ВСТУП	5
1 АНАЛІЗ ВАНТАЖНИХ ВЕЛОСИПЕДІВ ТА ЇХ ПІДВІСОК	8
1.1 Загальна характеристика електричного вантажного велосипеда.	8
1.2 Варіанти конструкції підвіски велосипедів.	12
1.3 Важіль поперечної тяги.	23
1.4 Подвійні важелі підвіски.	25
1.5 Підвіска Макферсона.	27
2 МЕТОД МОДЕЛЮВАННЯ	29
2.1 Визначення та аналіз проблеми.	29
2.2 Теорія – механіка.	30
2.3 Теоретичні основи вибору матеріалу.	31
2.4 Теоретична частина САПР.	34
2.5 Теорія – будівельна механіка МКЕ.	34
2.6 Метод скінченних елементів (МСЕ).	35
3 АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ МОДЕЛЮВАННЯ ВАЖЕЛЯ ПІДВІСКИ	36
3.1 Статика, центр ваги.	36
3.2 Аналіз матеріалів.	41
3.3 Будівельна механіка.	46
3.4 Результати розрахунку.	51
3.4.1 Сили, що діють на тягу.	52
3.4.2 Вибір матеріалу.	52
3.4.3 САД-модуляція важеля керування	54
3.4.4 Аналіз концентрації напружень.	55
3.4.5 Загальний аналіз результатів.	58
ВИСНОВКИ	61
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	62
ДОДАТКИ	64

КвРМТВА. 22143.01.14.00				
Зм	Арк	№ Докум.	Підпис	Дата
Виконав		Мельников		
Перевір.		Посонський		
Н.контр.		Бабак		
Затвер.		Диха		
Аналіз міцності та вибір матеріалу важеля тяги підвіски вантажного трициклу			Літера	Аркуш
				4
			ХНУ, МТВА-22-1	
			Аркушів	64

ВСТУП

Транспортна галузь постійно розвивається, намагаючись знайти швидкі та екологічно чисті рішення для перевезення вантажів у міському русі. Зазвичай товари перевозяться за допомогою вантажівок. Недоліком перевезення вантажів вантажівкою є те, що це призводить до викидів вихлопних газів, високого ризику дорожньо-транспортних пригод та затримок через обмежений рух коли певні вулиці та дороги перешкоджають досягти кінцевого пункту призначення [1]. «Останній кілометр» – це термін, що використовується в логістиці та пояснює процес між останнім етапом перевезення товарів до кінцевого пункту призначення [2]. Останній етап вантажу, що перевозиться в міському русі, може бути замінений транспортними велосипедами, якщо його навантаження не перевищує навантаження вантажівки. Максимальне навантаження, яке може витримати транспортний велосипед, становить 300 кг, без урахування водія та шасі.

Транспортні трицикли мають багато переваг перед вантажівками в міському русі. Ці трицикли не викидають викидів і тому є більш екологічними. Щодо розміру, транспортні трицикли менші, що означає більше місця на вулицях для інших учасників дорожнього руху, а отже, зменшує ризик аварій [1].

Товари можна доставляти більш гнучким та швидшим способом, використовуючи велосипедні доріжки, де дозволено рух транспортних велосипедів.

Starke ECB AB з торговою маркою Starke Cycles – це приватна компанія з виробництва велосипедів, заснована у 2016 році [2]. Їхня бізнес-концепція полягає у виробництві та розробці екологічно чистих електричних велосипедів для перевезення вантажів. Продаж цих велосипедів здійснюється переважно дочірній компанії MOVEBYBIKE, яка була заснована у 2012 році тими ж людьми, що й Starke Cycles.

					КвРМТВА. 22143.01.14.00	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

MOVEBYBIKE була заснована з метою перевезення вантажів за допомогою електричних велосипедів плавним та екологічним способом порівняно з вантажівками [1].

Постановка проблеми. Компанія Starke Cycles раніше випустила два покоління транспортних велосипедів і зараз працює над третім прототипом [2]. У першому прототипі компанія хотіла розробити транспортний велосипед з потужним електродвигуном, який би міг витримувати навантаження 300 кг. Компанія також хотіла створити контейнер для доставки, який міг би вмістити два піддони ЄС і був би зручним для водія під час завантаження та розвантаження. Одна з ідей для водія, щоб він міг зручно завантажувати та розвантажувати вантаж, полягає у використанні так званої функції «накочування, згортання», де лебідка, яка використовує трос для підйому та спуску вантажної платформи. У цьому прототипі була відсутня система підвіски коліс. Замість системи підвіски коліс компанія використала задню вісь, на яку спиралася вантажна платформа. У компанії були проблеми із задньою віссю, яка зламалася через втому, і вона хотіла знайти рішення у другому прототипі, яке могло б вирішити цю проблему.

Прототип не відповідав вимогам ЄС (EU 168/2013 L1e-A) [3] щодо максимальної ширини один метр, щоб мати змогу їздити велосипедною доріжкою.

У другому прототипі компанія вирішила використовувати систему підвіски. Щоб зменшити вагу та захистити завантажені вантажі на транспортному велосипеді, система підвіски та інші деталі були виготовлені з алюмінію та листового металу [2].

У даній роботі пропонується прототип вантажного велосипеда (трицикла) з системою підвіски з подвійними поперечними важелями (підвіску Макферсона). Є припущення, що використання підвіски Макферсона відіграватиме значну роль для транспортного велосипеда з точки зору ваги та простору. Завантажений велосипед вантажами, що важать

					КвРМТВА. 22143.01.14.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		6

менше, зможе проїхати далі. Проблема в цьому прототипі полягає в тому, що невідомо, чи зможе поперечний важіль підвіски Макферсона витримати максимальне навантаження транспортного велосипеда.

Успішний прототип означатиме, що транспортні трицикли зможуть їздити довше завдяки зекономленій вазі завдяки цьому рішенню порівняно з подвійними поперечними важелями. Транспортний велосипед з поперечним важелем звільнить більше місця та важитиме менше.

Метою роботи є аналіз напружено-деформованого стану важеля тяги підвіски транспортного велосипеда (трициклу) та обґрунтування вибору матеріалу конструкції на основі порівняння спрощених інженерних розрахунків і чисельного аналізу методом скінченних елементів.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно було виконати такі завдання:

1. Проаналізувати конструкцію важеля тяги підвіски та визначити характер і схеми прикладання навантажень.
2. Виконати спрощений ручний розрахунок ефективних напружень методом скінченних елементів на основі ідеалізованої розрахункової моделі.
3. Побудувати CAD-модель важеля тяги та провести чисельний аналіз напружено-деформованого стану з використанням методу скінченних елементів.
4. Порівняти результати спрощених розрахунків і МСЕ-аналізу та оцінити запас міцності конструкції.
5. Провести вибір матеріалу важеля тяги за багатокритеріальним підходом з урахуванням міцнісних, масових і експлуатаційних вимог.

					КвРМТВА. 22143.01.14.00	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 АНАЛІЗ ТРАНСПОРТНИХ ВЕЛОСИПЕДІВ ТА ЇХ ПІДВІСОК

1.1 Загальна характеристика електричного вантажного велосипеда.

Електричні вантажні трицикли стають дедалі популярнішими у міській логістиці, приватному бізнесі та комунальному господарстві. Завдяки простій конструкції, невисокій вартості експлуатації та можливості пересування у зонах, недоступних для автомобілів, вони є ефективною альтернативою традиційному моторизованому транспорту.

Електричний трьохколісний вантажний велосипед - це транспортний засіб, що поєднує механічний велосипедний привід з електродвигуном і має три колеса для підвищеної стійкості. Основною його особливістю є наявність вантажної платформи або кузова, призначеного для перевезення товарів, інструментів або обладнання.

Триколісна конструкція забезпечує стабільність під час руху та зупинок, що особливо важливо при перевезенні важких або габаритних вантажів. Електричний привід значно зменшує фізичне навантаження на водія, дозволяючи долати більші відстані та підйоми без значних зусиль.

Такі трицикли можуть розвивати швидкість до 25...35 км/год залежно від потужності двигуна та законодавчих обмежень конкретної країни. Запас ходу зазвичай становить від 30 до 80 кілометрів на одному заряді акумулятора.

Електричний трьохколісний вантажний велосипед складається з кількох основних вузлів, кожен з яких виконує важливу функцію.

Рама є основою всієї конструкції. Вона зазвичай виготовляється зі сталі або алюмінієвих сплавів, що забезпечує необхідну міцність та витривалість. Рама повинна витримувати значні навантаження, особливо у вантажній частині.

					КвРМТВА. 22143.01.14.00	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Колісна система включає одне переднє та два задніх колеса або навпаки - два передніх і одне заднє. Найпоширенішою є конфігурація з двома задніми колесами, між якими розташовується вантажна платформа. Така схема забезпечує кращу стабільність і рівномірний розподіл ваги.

Електродвигун може бути розміщений у втулці колеса або в центральній частині (каретковий двигун). Потужність двигуна зазвичай коливається в межах від 250 до 1000 Вт, що дозволяє адаптувати велосипед до різних умов експлуатації.

Акумуляторна батарея найчастіше виготовляється на основі літій-іонних елементів. Вона знімається для зручного заряджання та має систему захисту від перевантаження і перегріву.

Система керування включає контролер, дисплей та органи управління на кермі. Водій може обирати режими допомоги, контролювати рівень заряду батареї та швидкість руху.

Принцип роботи електричного трьохколісного вантажного велосипеда полягає у поєднанні м'язової сили водія та електричної допомоги двигуна. Під час обертання педалей система датчиків активує електродвигун, який допомагає руху велосипеда [2].

У деяких моделях передбачено режим повністю електричного руху без використання педалей, що особливо зручно при перевезенні важких вантажів або для людей з обмеженими фізичними можливостями.

Експлуатація такого велосипеда не потребує спеціальних навичок. Технічне обслуговування зводиться до перевірки гальмівної системи, стану акумулятора, ланцюга та шин. Витрати на обслуговування значно нижчі, ніж у автомобілів або мотоциклів [2].

Переваги електричних трьохколісних вантажних велосипедів. Однією з головних переваг є екологічність. Відсутність шкідливих викидів сприяє зменшенню забруднення повітря у містах та зниженню рівня шуму.

					КвРМТВА. 22143.01.14.00	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Економічна вигода також є суттєвим чинником. Заряджання акумулятора коштує значно дешевше за використання пального, а ремонт та обслуговування потребують мінімальних витрат.

Маневреність і доступність дозволяють використовувати такі трицикли у вузьких вулицях, пішохідних зонах та місцях із обмеженим рухом автомобілів.

Крім того, електричні вантажні трицикли сприяють покращенню фізичної активності користувачів, адже навіть за наявності електроприводу водій залишається залученим до процесу руху.

Сфери застосування. Електричні трьохколісні вантажні трицикли широко використовуються у різних галузях. У міській логістиці вони застосовуються для доставки продуктів, посилок та кореспонденції. Багато кур'єрських служб обирають цей транспорт як ефективну альтернативу автомобілям.

У сфері малого бізнесу такі трицикли використовуються для мобільної торгівлі, перевезення інструментів або обслуговування клієнтів на виїзді. Комунальні служби застосовують їх для прибирання територій, догляду за парками та ремонту інфраструктури.

Також електричні вантажні трицикли набувають популярності серед приватних користувачів для перевезення покупок, дітей або домашніх тварин.

Прикладом вантажного велосипеда може бути триколісний вантажний електровелосипед TIRAS JOB, рис. 1.1, створений на основі сталюї рами DOROZNIK LUX 17" [4]. Рама виготовлена з високоякісної сталі «High Tensile Steel» і має подвійне лакофарбове покриття, яке надійно захищає від подряпин. Конструкція забезпечує пряму посадку трицикліста по «голландському типу», а м'яке пружинне сидло підвищує комфорт під час їзди. Передня сталева ригідна вилка виконує роль ресори, пом'якшуючи удари та навантаження на руки та кермо.

					КвРМТВА. 22143.01.14.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

Замість одного заднього колеса встановлена вантажна корзина розміром 600×900×400 мм (внутрішні габарити), виготовлена зі сталі та закріплена на спеціальній несучій платформі з двома задніми колесами (20", 24" або 26"). Платформа фіксується до рами у двох точках: задніх дропаутів і поблизу каретки, що забезпечує високу горизонтальну жорсткість конструкції.



Рисунок 1.1 – Триколісний вантажний електровелосипед TIRAS JOB.

Корзина міцно закріплюється на платформі чотирма болтами, формуючи основу триколісного електровелосипеда. За потреби корзину можна демонтувати й замінити на інший вантаж або конструкцію, проте при цьому слід зменшити навантаження, оскільки знімається частина жорсткості платформи. Верхня рамка корзины, з'єднана з підсідельним штирем через болтові вузли та ковзаючу втулку, утворює жорсткий трикутник, який рівномірно розподіляє навантаження по всій платформі та рамі. Це забезпечує відсутність зон напруг і деформацій навіть при поїздки по нерівностях із вантажем.

Задні колеса розташовані роздільно, а не на одній осі, що збільшує вантажопідйомність і покращує маневреність. Трансмісія побудована за схемою: передня ведуча зірочка на 38 зубів передає крутний момент на задню зірочку на 21 зуб через передавальний вал, який обертає ведуче колесо

					КвРМТВА. 22143.01.14.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

за допомогою задньої тріскачки. Довжина ланцюга практично така ж, як на звичайному велосипеді, а його натяг регулюється спеціальним механізмом. Передавальний вал із двома зірочками встановлений на промислових підшипниках, закріплених до платформи, і забезпечує надійну роботу навіть під великим навантаженням.

Гальмування здійснюється двома задніми дисковими гальмами та переднім V-брейком, що гарантує безпечне уповільнення навіть з повним вантажем.

Електричний трьохколісний вантажний велосипед є сучасним, екологічним та економічно вигідним транспортним засобом, що відповідає вимогам сьогодення. Його конструкція поєднує простоту, надійність і функціональність, а широкий спектр застосування робить його універсальним рішенням для міського середовища.

З огляду на глобальні тенденції розвитку сталого транспорту, можна стверджувати, що роль електричних вантажних велосипедів у майбутньому лише зростатиме, сприяючи формуванню більш чистих, безпечних та комфортних міст.

1.2 Варіанти конструкції підвіски велосипедів.

Сучасні підвіски велосипедів відрізняються між собою за принципом роботи, рівнем жорсткості та експлуатаційними властивостями. Одні конструкції забезпечують плавніший хід, проте надмірна м'якість може знижувати точність керування та зворотний зв'язок із дорогою. Більш жорсткі рамні рішення, як правило, вирізняються підвищеною міцністю та кращою передачею зусиль під час руху.

Окремі типи підвісок, зокрема одношарнірні системи, мають більшу структурну піддатливість у порівнянні з багатоланковими схемами. Водночас

					КвРМТВА. 22143.01.14.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

певний рівень пружної деформації є необхідним, оскільки під час руху нерівною поверхнею велосипед зазнає змінних навантажень [5].

Підвіски, у яких застосовуються герметизовані підшипники, здатні забезпечити дуже плавну роботу механізмів, однак це зазвичай супроводжується збільшенням маси конструкції. Альтернативним рішенням є використання втулок, які можуть демонструвати подібну ефективність за меншої ваги, тому й надалі залишаються актуальними в багатьох моделях.

Підбір оптимальної конструкції велосипеда є індивідуальним завданням і часто потребує практичного тестування різних варіантів. Саме особистий досвід експлуатації дозволяє обрати рішення, яке найкраще відповідає умовам використання та вимогам користувача. Далі наведено узагальнений огляд шести найбільш поширених типів рамних конструкцій.

1. Одношарнірна підвіска.

Одношарнірна схема є однією з найпростіших і найпоширеніших конструкцій. У такій підвісці основний шарнір розміщується перед кареточним вузлом і дещо вище нього. Завдяки мінімальній кількості рухомих елементів конструкція має малу масу та відзначається конструктивною надійністю.

Розташування осі обертання в нижчій позиції сприяє більш «жвавій» поведінці велосипеда під час руху та зменшує небажані коливання підвіски при педалюванні. Якщо ж шарнір знаходиться занадто високо, це може призводити до збільшення довжини ланцюга під час роботи підвіски, що викликає зворотний поштовх на педалі.

До велосипедів, у яких використовується така схема, належать моделі Santa Cruz Heckler, Orange 5, Diamondback XSL Comp та Santa Cruz Bullit, рис. 1.2.

Переваги: проста та зрозуміла конструкція; мала кількість шарнірних з'єднань; невелика маса; зниження розгойдування під час педалювання.

					КвРМТВА. 22143.01.14.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

Недоліки: ймовірність появи віддачі на педалях; помітний вплив гальмівних зусиль на роботу підвіски.



Рисунок 1.2 – Одношарнірна підвіска.

Доцільно обирати, якщо: пріоритетом є надійність і довговічність, а не максимально точна робота підвіски. Через простоту конструкції така підвіска потребує мінімального обслуговування, що робить її привабливою для користувачів, які не прагнуть часто втручатися в технічний стан велосипеда.

2. Псевдо чотири-важільна підвіска.

Псевдо чотири-важільна схема, рис. 1.3, яку також називають ускладненою одношарнірною підвіскою або одношарнірною конструкцією з коромислом, є розвитком класичної одношарнірної системи. У цій конфігурації головний шарнір розміщується значно ближче до кареточного вузла, зазвичай безпосередньо позаду нього [5, 6].

Задній трикутник рами має додатковий шарнір у зоні верхнього пера, а передача зусиль на амортизатор здійснюється через коромисло. Таке рішення підвищує загальну міцність і торсійну жорсткість рами. Коромисловий механізм дозволяє змінювати передатне відношення під час роботи підвіски, завдяки чому при використанні амортизаторів із більшим ходом досягається плавніша та більш податлива реакція на нерівності.

					КвРМТВА. 22143.01.14.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

Через наявність кількох шарнірів цю конструкцію нерідко плутають із повноцінною чотири важільною підвіскою. Проте ключова відмінність полягає у відсутності шарніра між основною точкою обертання та віссю заднього колеса, який характерний саме для чотириричажних систем.

Прикладами велосипедів із такою підвіскою є Ventana El Ciclón, Kona Dawg, Scott Spark.



Рисунок 1.3 – Псевдо чотири важільна схема.

Переваги: відносно невелика маса; знижений ефект віддачі на педалях.

Недоліки: схильність до розгойдування під час педалювання; помітний вплив гальмівних навантажень на роботу підвіски.

Доцільно обирати, якщо: перевага надається агресивному та динамічному стилю їзди. Така підвіска добре підходить для потужних велосипедів, призначених для активного руху бездоріжжям, де абсолютна плавність не є визначальною. Меншу чутливість конструкція компенсує чітким і прямим відчуттям керування. Водночас збільшена кількість шарнірних з'єднань потребує регулярного технічного контролю.

3. Стандартна чотири важільна підвіска (Horst Link).

Класична чотири важільна підвіска, рис. 1.4, відома як Horst Link, за компоновкою нагадує псевдо чотири важільну схему, однак має принципову конструктивну відмінність. Шарнір заднього трикутника розташовується на

					КвРМТВА. 22143.01.14.00	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

нижньому пері рами - безпосередньо перед віссю заднього колеса та нижче її рівня. Саме таке розміщення суттєво впливає на кінематику роботи підвіски.

Завдяки цій особливості підвіска демонструє високу плавність ходу, а гальмівні зусилля майже не погіршують її ефективність. Робота заднього колеса залишається стабільною навіть під час інтенсивного гальмування. Права на використання конструкції Horst Link належать компанії Specialized, однак багато виробників застосовують її на ліцензійній основі [5, 6].

Серед моделей, що використовують таку схему, можна відзначити Boardman FS, Specialized FSR Stumpjumper, Ellsworth Epiphany.



Рисунок 1.4 – Стандартна чотири важільна підвіска.

Переваги: відносно мала маса конструкції; зменшений ефект віддачі на педалі; стабільна робота підвіски під час гальмування.

Недоліки: схильність до розгойдування при активному педалюванні; необхідність періодичного контролю стану шарнірних з'єднань.

Доцільно обирати, якщо: потрібна ефективніша робота підвіски під час гальмування порівняно з одношарнірними та псевдо чотири важільними схемами. Така конструкція добре підходить для швидкісної та агресивної їзди бездоріжжям, оскільки дозволяє долати перешкоди без втрати зчеплення заднього колеса з поверхнею [5, 6].

					КвРМТВА. 22143.01.14.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

4. Дволанкова чотири важільна підвіска.

Дволанкова чотири важільна система, рис. 1.5, є відносно новим різновидом багатоланкових підвісок. У цій конструкції задній трикутник рами з'єднується з переднім за допомогою двох коротких тяг, що дозволяє формувати так звану плаваючу точку обертання. Під час роботи підвіски положення цієї точки змінюється, істотно впливаючи на траєкторію руху заднього колеса та кінематику всієї системи.



Рисунок 1.5 – Дволанкова чотири важільна система.

Існує кілька реалізацій такої схеми, які відрізняються налаштуваннями та робочими характеристиками. Найпоширенішими серед них є VPP та dw-link.

VPP (Virtual Pivot Point — віртуальна точка обертання).

Концепція віртуальної точки обертання була запропонована компанією Outland Cycles на початку 1990-х років і згодом доопрацьована виробниками Intense Cycles і Santa Cruz, рис. 1.6. У цій схемі два паралельні з'єднання відокремлюють передній і задній трикутники, формуючи спеціальну траєкторію осі заднього колеса.

					КвРМТВА. 22143.01.14.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17



Рисунок 1.6 – Підвіска Santa Cruz.

Особливістю VPP є використання натягу ланцюга як елемента стабілізації, що зменшує розгойдування підвіски під час педалювання, не обмежуючи її активності при русі нерівною поверхнею.

Прикладами велосипедів із такою підвіскою є Santa Cruz Blur, Intense Spider 2 та Santa Cruz Nomad.

Підвіска dw-link, розроблена інженером Дейвом Віглом (Dave Weagle), також базується на використанні двох ланок для ізоляції задньої частини рами. Проте кінематика роботи, зокрема траєкторія осі заднього колеса та силові характеристики, суттєво відрізняються від системи VPP.

Ключовим елементом dw-link є спеціально сформована крива антисквату, рис. 1.7. Конструкція забезпечує високий рівень анти-сквату на початку ходу амортизатора, де це найбільш необхідно для ефективного педалювання, і поступово зменшує його в нижній частині ходу, коли педалювання практично відсутнє. Такий підхід дозволяє знизити віддачу на педалі без погіршення тягових властивостей. Анти-скват - це характеристика підвіски велосипеда або автомобіля, яка описує її поведінку під час прискорення. Вона визначає, наскільки система підвіски протидіє «присіданню» задньої частини при розгоні, спрямовуючи крутний момент коліс на покращення зчеплення з дорогою, а не на стиск амортизатора.

					КвРМТВА. 22143.01.14.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18



Рисунок 1.7 – Підвіска dw-link Turner Flux.

Додатково система оптимізується за рахунок ретельно підібраних передатних співвідношень коромисел, що зберігає активність підвіски в більшості режимів руху та на різних передачах. Варто зазначити, що окремі виробники застосовують власні варіації цієї схеми, а її налаштування можуть змінюватися залежно від конкретної моделі велосипеда.

Прикладами реалізації dw-link є Ibis Mojo, Turner Flux та Pivot Mach 5.

5. Підвіска з технологією Active Braking Pivot (ABP), рис. 1.8.

Технологія Active Braking Pivot (активне гальмування), розроблена компанією Trek, поєднує риси псевдо чотири важільних і класичних чотири важільних підвісок. Ключовою особливістю цієї системи є розміщення заднього шарніра безпосередньо на осі заднього колеса, тобто концентрично з нею. За своєю будовою ABP формально належить до псевдо чотири важільних рішень, однак за поведінкою під час гальмування демонструє характеристики, властиві повноцінним чотири важільним схемам [5, 6].

Амортизатор у цій конструкції механічно відокремлений від переднього трикутника рами та приводиться в дію через коромисловий механізм, пов'язаний як із верхнім, так і з нижнім пером. Така кінематика

					КвРМТВА. 22143.01.14.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

забезпечує плавну й стабільну роботу підвіски в широкому діапазоні умов руху. У поєднанні з концентричним шарніром система АВР суттєво зменшує ефект «brake jack» — небажане розтягування або блокування підвіски під час гальмування.



Рисунок 1.8 – Підвіска Active Braking Pivot (активне гальмування).

Цю технологію можна зустріти на моделях Trek Remedy, Trek Fuel EX, Gary Fisher Roscoe.

Переваги: низький рівень віддачі на педалях; стабільна та передбачувана робота підвіски під час гальмування.

Недоліки: схильність до розгойдування при інтенсивному педалюванні; потреба у спеціальній ексцентриковій системі кріплення задньої осі.

Доцільно обирати, якщо: подобається характер роботи одношарнірних або чотири важільних підвісок, але є бажання отримати додаткові переваги під час гальмування. Система АВР дозволяє зберігати м'яку та активну роботу підвіски навіть при повністю задіяному задньому гальмі [5, 6].

6. Плаваюча трансмісія, рис. 1.9.

Однією з ранніх концепцій повно підвісних велосипедів була система з єдиним заднім трикутником, на якому монтувалася вся трансмісія, включно з кареткою. Цей трикутник кріпився до головної рами за допомогою шарніра. Вважається, що така конструкція знижує віддачу на педалі, оскільки ланцюг

					КвРМТВА. 22143.01.14.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

не піддається значному розтягуванню. Проте на практиці ефективність підвіски сильно змінювалася залежно від положення трицикліста: сидячи чи стоячи. Через це подібні рішення нині застосовуються рідко.



Рисунок 1.9 – Плаваюча трансмісія.

Виробники Mongoose і GT зі своїми системами Freedrive та i-Drive, а також Monolink разом з Maverick, удосконалили цю ідею. У сучасних варіантах каретка кріпиться до ланки між переднім і заднім трикутниками, що дозволяє поєднати переваги різних конструкцій.

Траєкторія руху осі заднього колеса часто нагадує дугу, як у одношарнірній підвісці, проте каретка при стисканні підвіски також зміщується. Взаємодія осі та каретки визначає специфіку педалювання і впливає на віддачу під час різних режимів руху.

Прикладами велосипедів із плаваючою трансмісією є Mongoose Teocali, GT Sensor, Maverick ML8.

Переваги: мінімальна віддача на педалі; стабільність і зменшене розгойдування під час педалювання; специфічна траєкторія осі для поліпшеної активності підвіски.

Недоліки: зниження ефективності підвіски при їзді стоячи; більша вага конструкції; чутливість до гальмівних навантажень.

					КвРМТВА. 22143.01.14.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

Доцільно обирати, якщо: важливо зберегти максимальну активність підвіски на будь-якому рельєфі та відчутти високу чутливість колеса до поверхні. Для отримання оптимальних характеристик система потребує точного налаштування амортизаторів і регулярного догляду за шарнірами.

Чи існує «найкраща» конструкція підвіски?

Насправді, універсальної підвіски, яка була б ідеальною за всіма показниками, не існує. Важливо пам'ятати, що велика частина ефективності системи залежить від самого трицикліста. Особисті вподобання та стиль їзди визначають, яка підвіска буде комфортною та продуктивною саме для вас.

Сьогодні на ринку залишилися конструкції з високими експлуатаційними характеристиками, серед яких можна вибрати відповідну модель. Відомо, що чемпіони змагань використовують різні системи: від найпростіших до складних багатоланкових схем. Наприклад, Стів Піт вигравав чемпіонати на GT i-Drive, GT Lobo (Horst Link) (плаваюча трансмісія), Orange 222 (одношарнірна система) та Santa Cruz V10 (VPP). Це доводить, що ключовим фактором є не сама конструкція, а правильне її налаштування під стиль трицикліста.

При виборі підвіски варто враховувати власні пріоритети. Для когось важлива вага байка, для когось кількість шарнірів чи віддача на педалі. Хтось звертає увагу на поведінку під час гальмування, а інші взагалі не помічають цих нюансів. Сучасні моделі пропонують широкий вибір, тому кожен може знайти підвіску, яка підійде саме йому.

Ще один фактор – передатні відношення. Багато систем підвіски розроблені так, щоб працювати оптимально на «середніх» передачах. Проте під час крутих підйомів або при екстремальних комбінаціях зірочок задня підвіска може реагувати зовсім інакше. Тому важливо тестувати велосипед у різних умовах та на різних передачах.

Вибір заднього амортизатора також істотно впливає на роботу підвіски. Пневматичні демпфери використовуються на більшості сучасних

					КвРМТВА. 22143.01.14.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

велосипедів, крім найдешевших моделей і найпотужніших байків для швидкісного спуску, де застосовуються пружинні амортизатори. Пневматичні амортизатори відрізняються за конструкцією та характеристиками: від базових з фіксованими налаштуваннями до моделей із регульованим демпфером, можливістю зміни основного вагового навантаження та контролю стиснення і відскоку.

Сучасні амортизатори часто оснащені платформними системами демпфування, які пригнічують небажаний рух під час педалювання чи зміщення ваги. Це підвищує ефективність педалювання, хоча іноді зменшує чутливість підвіски на дрібних нерівностях. Деякі моделі також мають можливість блокування, що дозволяє повністю зафіксувати хід амортизатора для підйомів чи руху по рівній поверхні.

Отже, «найкраща» підвіска – це та, яка відповідає вашому стилю, вподобанням та умовам їзди, а також правильно налаштована під вас.

1.3 Важіль поперечної тяги.

Важіль поперечної тяги є важливим компонентом системи підвіски транспортного засобу, який дозволяє амортизатору рухатися вгору та вниз, запобігаючи контрольованому руху вперед та назад. Важіль поперечної тяги зазвичай має трикутну форму, див. рисунок 1.10. У більшості автомобілів важелі поперечної тяги використовуються як на передній, так і на задній підвісці. Зазвичай на кожному колесі є один або два важелі поперечної тяги. Багато передньопривідних автомобілів використовують лише один нижній важіль поперечної тяги (підвіска Макферсона), тоді як позашляховики та вантажівки часто використовують як верхній, так і нижній важелі поперечної тяги (подвійні поперечні важелі).

					КвРМТВА. 22143.01.14.00	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 1.10 – Трикутний важіль підвіски.

Важіль поперечної тяги з'єднує кермо та маточину колеса з рамою транспортного засобу. Він оснащений втулками, див. рисунок 1.11, з боку рами транспортного засобу та кульовим шарніром з боку колеса транспортного засобу, що дозволяє гнучкість та контрольований рух відповідно до дорожніх умов та керування водієм. Втулки важелів поперечної тяги зазвичай складаються із зовнішньої металевої втулки, внутрішньої металевої втулки та міцної гумової втулки. Втулки важливі для керуваності та комфорту їзди.

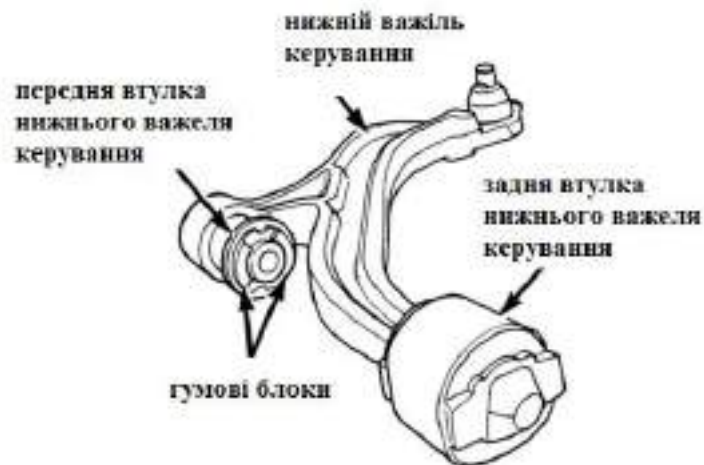


Рисунок 1.11 – Компоненти важеля підвіски [7].

					КвРМТВА. 22143.01.14.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

Система підвіски гасить вібрації, шум і забезпечує плавнішу їзду по нерівностях. Здатність повертатися у вихідне положення, форму та жорсткість зберігається навіть тоді, коли втулки згинаються та рухаються [8].

1.4 Подвійні важелі підвіски.

Подвійні важелі підвіски – це система підвіски, яка використовує два поперечні трикутні важелі, верхній та нижній важелі підвіски. Ці важелі підвіски встановлені на двох кутах рами транспортного засобу та мають кульовий шарнір на протилежному кінці. Між цими важелями та кузовом транспортного засобу розташовані пружини та амортизатори, які поглинають удари та нерівності дорожнього покриття, див. рисунок 1.12. Важелі підвіски в автомобілі повинні не лише виконувати функцію тримача для коліс та передавати сили на підвіску, але й несуть основну відповідальність за поглинання напружень, що виникають під час поворотів, розгону та гальмування. У подвійних важелях підвіски нижній важіль зазвичай довший за верхній, оскільки він забезпечує кращі властивості підвіски та стабільніше проходження поворотів. Якщо важелі мають однакову довжину, це призведе, серед іншого, до надмірного зносу шин через збільшення кута розвалу. Кут розвалу означає нахил коліс всередину або назовні відносно вертикалі.

Розвал вважається позитивним, якщо верхня частина колеса нахилена назовні, і негативним, якщо верхня частина колеса нахилена всередину, див. рисунок 1.13. Позитивний розвал призводить до кращого відчуття дороги в кермі, а негативний розвал – до кращого зчеплення з дорогою, оскільки колеса транспортного засобу будуть вертикальними, коли автомобіль котиться. Сучасні легкові автомобілі зазвичай використовують кут розвалу 0 градусів, щоб отримати найкраще зчеплення. При великому куті розвалу шини зношуються під кутом, серед іншого. Перевагою подвійних поперечних важелів є те, що автомобіль отримує більш плавне керування,

					КвРМТВА. 22143.01.14.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

особливо на нерівних дорогах. Недоліком подвійних поперечних важелів підвіски є те, що їх проектування, виробництво та обслуговування є дорогими порівняно з іншими системами підвіски [9].

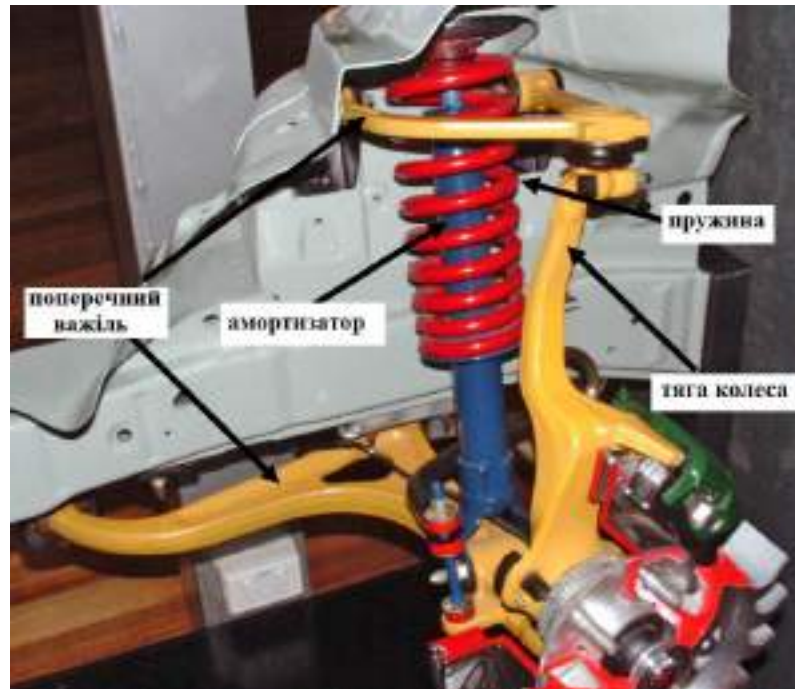


Рисунок 1.12 – Подвійні поперечні важелі [10].



Рисунок 1.13 – Кут розвалу [10].

					КВРМТВА. 22143.01.14.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

1.5 Підвіска Макферсона.

Підвіска Макферсона є подальшим розвитком подвійних поперечних важелів. У цій підвісці використовується лише нижній поперечний важіль. Замість верхнього поперечного важеля нижній кінець амортизатора кріпиться до опорної вісь колеса там, де раніше був верхній поперечний важіль. Верхня частина амортизатора кріпиться до кузова, а не до шасі.

Проста комбінація, з якої складається підвіска Макферсона, дивує автомобільну промисловість, оскільки на розробку цієї підвіски знадобилося так багато часу. Ford представив підвіску Макферсона наприкінці 1940-х років, і на той час вона вже використовувалася на сотнях різних автомобілів від Volkswagen до Alfa Romeo. Стійки Макферсона є домінуючою конструкцією підвіски завдяки низькій вартості виробництва та простій конструкції [10].

Стійки Макферсона, як і подвійні поперечні важелі, можна адаптувати для використання як на задніх, так і на передніх колесах. Багато недорогих автомобілів мали стійки Макферсона в 1980-х роках. Типовий вузол стійок Макферсона базується на трикутній конструкції та включає пружну пружину, стійку, компоненти верхньої стійки, демпфер та пілозахисний кожух. Вузол встановлений між поворотним кулаком та внутрішньою панеллю крила, як показано на рисунку 1.14.

Стійки виглядають як традиційні амортизатори та виконують ту саму функцію амортизації. Вони також зменшують вартість, простір та вагу підвіски. Завдяки кріпленню стійки до поворотного кулака, потреба у верхньому важелі та кульовому шарнірі усувається. Компонентом, який відіграє важливу роль у роботі підвіски та поглинає навантаження, є верхнє кріплення в підвісці Макферсона. Стійка розташована вертикально, що робить всю підвіску дуже компактною. Амортизатор та гвинтова пружина утворюють точку повороту для керування коліс, тоді як сам амортизатор є

					КвРМТВА. 22143.01.14.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

несучою частиною агрегату та тією, що підтримує вагу транспортного засобу [11].



Рисунок 1.14 – Система підвіски Макферсон [10].

Цей тип підвіски має як переваги, так і недоліки. Недоліки підвіски Макферсона полягають у тому, що кузов, тобто підресорена маса, піддається впливу високих сил через те, що підвіска кріпиться до кузова, а не до шасі. Маточина колеса піддається впливу високих сил і повинна бути розрахована таким чином, щоб витримувати це, оскільки колесо не має опору під дією бічних сил. Стає важче ізолювати шум від землі та шин, коли підвіска кріпиться до кузова. Амортизатор, прикріплений до осі колеса, призводить до впливу більших сил на шарнір, що пізніше призводить до дисбалансу колеса та прискореного зносу, що спричиняє нерівномірний знос шин. Переваги підвіски Макферсона полягають у тому, що сама підвіска в поєднанні з осью колеса стає одним компонентом. Ця перевага призводить до вужчої конструкції, що полегшує використання в обмеженому просторі. Вужча конструкція призводить до меншої маси, дешевшої конструкції та легшого обслуговування. Ймовірно, саме тому це найпопулярніша система підвіски у світі [10].

					КвРМТВА. 22143.01.14.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

2 МЕТОД МОДЕЛЮВАННЯ

2.1 Визначення та аналіз проблеми.

Першим кроком у проекті є розуміння того, як працюють системи підвіски, шляхом аналізу літератури. На другому етапі буде проведено дослідження для визначення відповідного металу для тяги. При визначенні відповідного матеріалу тяга повинна пройти аналіз життєвого циклу [12]. Аналіз життєвого циклу показує, як оцінити продукт з екологічної точки зору. Виробництво продукції впливає на навколишнє середовище. Щоб отримати пораду щодо того, як різні варіанти призводять до покращення або погіршення стану навколишнього середовища, вивчаються наслідки змін у продукті. Аналіз життєвого циклу гарантує, що продукт не спричиняє необґрунтовано високого впливу на навколишнє середовище. Інструментом, який використовується для проведення аналізу життєвого циклу, є CES EduPack. Це робиться шляхом попереднього використання програми CES EduPack [13], яка є всеохопною базою даних інформації про матеріали. Розробка нового продукту передбачає не лише пошук нових інноваційних дизайнерських рішень та функцій, але й пошук найбільш підходящого матеріалу для продукту.

Потім тягу необхідно спроектувати в програмі CAD, щоб, можливо, надіслати креслення компанії, яка може виготовити продукт. За допомогою готової моделі CAD можна проаналізувати міцність, щоб дослідити, чи може конструкція та матеріал тяги витримати максимальне навантаження 300 кг, за винятком водія та шасі. Практичні кроки розрахунку методом скінченних елементів (МСЕ) у програмі Solidworks CAD можна пояснити сімома кроками. Розраховується статичний аналіз. Перше, що робиться, це формується повністю визначена геометрія прототипу. Потім починається нове дослідження статичного аналізу. Вибраний матеріал та його дані про

					КвРМТВА. 22143.01.14.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

матеріал розміщуються на геометрії. Застосовуються граничні умови та прикладаються зовнішні навантаження. Аналіз починається за допомогою команди «mesh and run». Нарешті, спостерігається деформована геометрія, показуючи графіки з кривими рівня в кольорі [12-13]. Якщо виявиться, що тяга не відповідає розрахованій силі, то необхідно буде подальше вдосконалення тяги.

2.2 Теорія-механіка.

Механіка є фундаментальною частиною фізики та займається тим, як тіла поведуться, коли вони піддаються впливу сил та рухів [12]. Механічні розрахунки необхідні, щоб мати змогу розрахувати силу, що діє на важіль тяги, та перевірити, чи вона утримується.

Статика – це вивчення рівноваги, яке займається матеріальними системами (наприклад, тілами) у стані спокою. Коли система знаходиться у статичній рівновазі, це означає, що система не прискорюється, а її результуюча сила дорівнює нулю [13]. Силу, що діє на важіль тяги, можна розрахувати, виставивши амортизатор, важіль тяги та одне колесо з транспортного засобу. Сили та моменти, що діють на ці частини, вводяться в рівняння рівноваги для розрахунку. У рівняннях (2.1) та (2.2) є позначення, які означають різні речі.

$$\sum F = ma = 0 \quad (2.1)$$

$$\sum M = 0 \quad (2.2)$$

Сила позначається – F, прискорення – a, m – маса, а M – момент відносно певної точки [14].

					КвРМТВА. 22143.01.14.00	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.3 Теоретичні основи вибору матеріалу.

Під час проектування нового продукту йдеться не лише про пошук нових інноваційних рішень та функцій, але й про пошук матеріалу залежно від бажаних властивостей компонентів.

Матеріали поділяються на основні групи: метали, кераміка, полімери, еластомери, скло та гібриди. На рисунку 2.1 показано карту існуючих груп матеріалів у вигляді кольорових бульбашок.

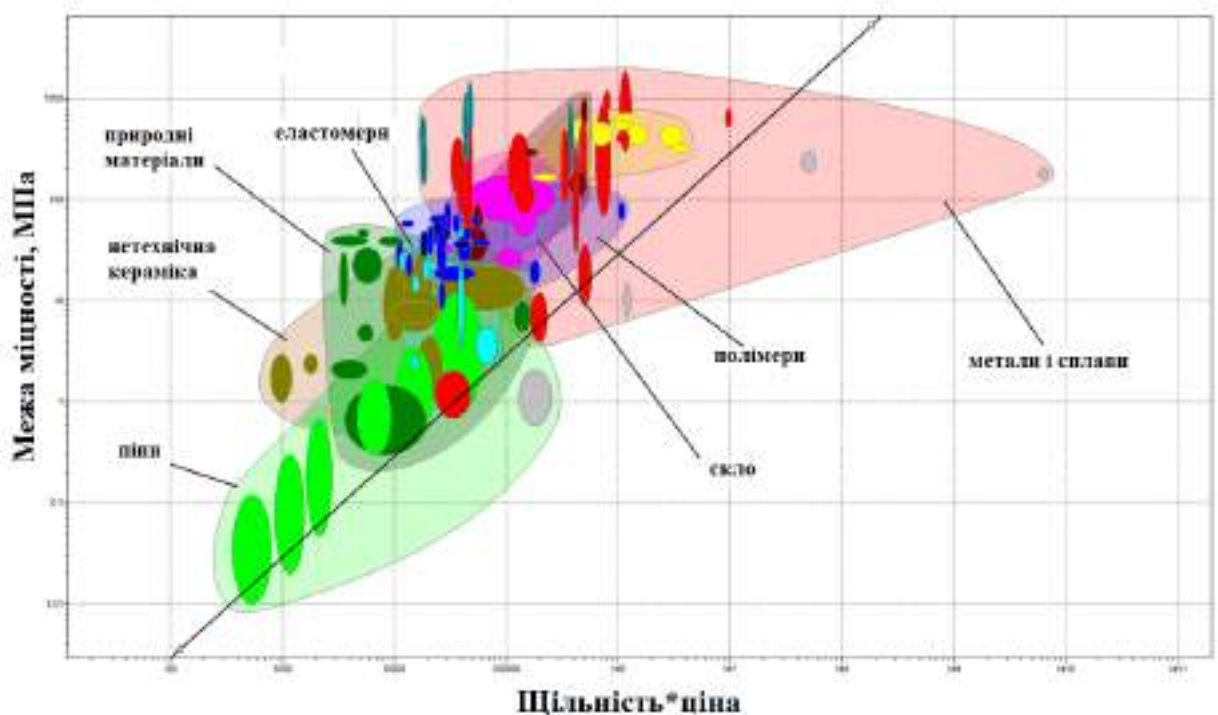


Рисунок 2.1 – Приклад карти матеріалів з різними групами матеріалів.

Вибір матеріалу здійснюється за допомогою бази даних з інформацією про матеріали, і в цій роботі використовується CES EduPack. Для вибору відповідного матеріалу використовується процес вибору матеріалу Ешбі, який поділено на 4 кроки [13]. Кроки показано на рисунку 2.2.



Рисунок 2.2 – Процес вибору матеріалу.

Процес вибору матеріалу, поділений на чотири кроки.

Перший крок – це перетворення вимог до проектування. Вимоги до проектування передбачають перетворення в опис відповідного матеріалу. Перетворення виконується шляхом вираження вимог у вигляді функцій, цілей, обмежень та вільних змінних. Завдання функції – відповісти на питання, що повинен робити продукт. Мета відповідає на те, які властивості слід максимізувати або мінімізувати. Обмеження відповідають на те, які не обговорювані умови повинні бути виконані, а які бажані обговорювані цілі повинні бути виконані, а також параметри вільних змінних, які проектувальник має свободу змінювати. Вибір матеріалу зазвичай є прикладом вільної змінної.

Інформація з вимог до проектування використовується на наступному кроці для виключення матеріалів, які не відповідають вимогам. Матеріали, які не досягають меж, заданих обмеженнями, відсіюються.

					КвРМТВА. 22143.01.14.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

Решту матеріалів потім ранжують за допомогою індексу матеріалу. Індекс матеріалу – це лінійна залежність між двома вибраними параметрами. Наприклад, межа текучості як функція ціни, помножена на щільність. З певним індексом можна намалювати лінійну криву на так званій карті матеріалів. Індекс матеріалу дозволяє оптимізувати вибір матеріалу, оскільки матеріали можна ранжувати за допомогою індексу матеріалу. Таким чином, використовується матеріал, який найкраще підходить для продукту. Індекс матеріалу можна застосувати до тієї ж карти матеріалів, як показано на рисунку 2.1.

Останній крок у процесі вибору матеріалу включає вимоги до матеріалів, які, на основі попередніх кроків, здаються найкращими для досліджуваного продукту. Це робиться для виявлення можливих сильних та слабких сторін матеріалів. Матеріали, що відповідають критеріям, розміщуються в таблиці 2.1 та оцінюються для ранжування. Після вивчення історії найкраще підходящих матеріалів робиться остаточний вибір.

Таблиця 2.1 – Шаблон для ранжування матеріалів за різними критеріями.

Матеріал	Критерій 1	Критерій 2	Критерій 3	Критерій 4	Критерій 5
Матеріал 1	x			x	
Матеріал 2	x		x		
Матеріал 3	x	x	x	x	x
Матеріал 4		x		x	
Матеріал 5	x		x		

2.4 Теоретична частина САПР.

Solidworks – це комп’ютерна програма 3D-САПР, яка використовується для візуалізації важеля з’єднання. САПР розшифровується як «система автоматизованого проектування». Solidworks простий у використанні для створення, публікації, моделювання та управління даними. Це означає, що продукти проектуються краще, швидше та економічно ефективніше [15]. 3D-моделі, створені в Solidworks, можна аналізувати, наприклад, за допомогою методу скінченних елементів, де, серед іншого, можна відобразити розподіл напружень у моделі.

2.5 Теорія – будівельна механіка МКЕ.

Будівельна механіка – це розділ фізики, який описує, як різні матеріали, що мають форму та з’єднуються разом для утворення конструкцій, несуть свої навантаження. Знання про спосіб дії цих конструкцій можна використовувати в творчому процесі, де проектуються стійкі, ефективні, функціональні та виразні будівлі. Розуміння основних структурних механічних елементів, стрижнів, пружин, балок та фундаментів, послідовно нарощується в одному, двох та трьох вимірах. Ці елементи показують, як можна моделювати та аналізувати складні несучі конструкції.

У будівельній механіці метод скінченних елементів (МКЕ) став домінуючим методом для формулювання розрахункових моделей та проведення аналізів. Метод МКЕ припускає, що деформації та сили виражаються через низку дискретних ступенів свободи. Прості елементи розміщуються між ступенями волі, які разом утворюють конструкцію, що моделюється, і де кожен елемент може описувати певний спосіб дії та має певну геометрію. Метод скінченних елементів (МСЕ) надає можливості як

					КвРМТВА. 22143.01.14.00	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

для аналізу складних явищ, геометрій, так і для швидких приблизних розрахунків [15].

2.6 Метод скінченних елементів (МСЕ).

Аналіз міцнісних властивостей буде проводитися за допомогою методу скінченних елементів (МСЕ).

Метод базується на тому, що тіло, яке аналізується, за допомогою МСЕ поділяється на елементи, з'єднані вузлами. Це поділ називається «сіткою скінченних елементів», а процес створення сітки називається «генерацією сітки». Метод використовується для розрахунку розподілу напружень в А-подібному кронштейні при різних навантаженнях. Він також використовується для того, щоб показати, чи буде виріб тріскатися, розтріскуватися чи буде він міцним при певному навантаженні [15].

					КвРМТВА. 22143.01.14.00	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3 АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ МОДЕЛЮВАННЯ ВАЖЕЛЯ ПІДВІСКИ

3.1 Статика, центр ваги.

На рисунку 3.1 показано схематичну діаграму системи підвіски з підвіскою Макферсона, яка складається з важеля та амортизатора. Нормальна сила, сила пружини та сила тяжіння – це лише деякі з сил, що діють на систему і які необхідно розраховувати в умовах статичної рівноваги.

На рисунку 3.2 показано відкритий вигляд системи, де сили та розміри видно на рисунку. Важіль – це тіло з двома силами. У точці контакту В на рисунку 3.3 діють горизонтальна та вертикальна контактні сили, позначені H та V . У точці контакту D також діють горизонтальна та вертикальна контактні сили, позначені H та T . Між контактними силами А та В діє сила пружини, позначена K . На колеса транспортного велосипеда діє нормальна сила N , які повинні бути в рівновазі з силою тяжіння mg . Відомі змінні для довжин a , b , c та кута (β) показано на схемі рисунку 3.2.

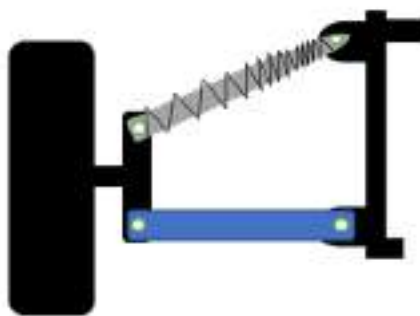


Рисунок 3.1 – Принципова схема системи підвіски Макферсона.

					КвРМТВА. 22143.01.14.00	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

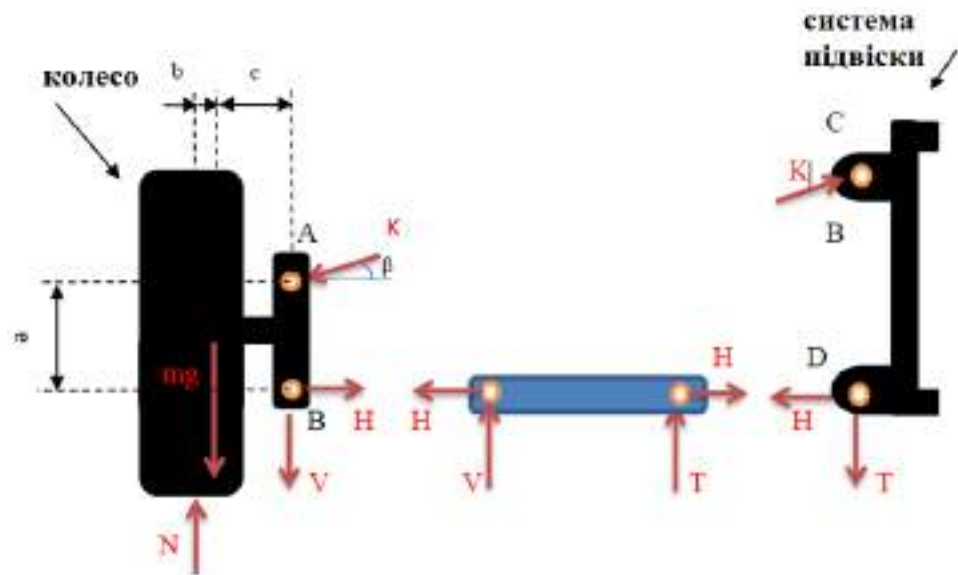


Рисунок 3.2 – Схема системи підвіски Макферсона з силами та розмірами.

Рівняння рівноваги складаються з силами та моментами, отриманими після розгляду системи підвіски. З рівнянь рівноваги потрібно розрахувати силу H , яка діє на важіль тяги. Проблема, яка виникає в статичних розрахунках і яка перешкоджає продовженню для розв'язання сил, полягає в тому, що невідомих змінних більше (4), ніж рівнянь рівноваги (3). Для того, щоб мати змогу продовжити обчислення цієї задачі, потрібно розв'язати невідому змінну. Нормальна сила N є найбільш підходящою змінною для розв'язання, і це робиться шляхом обчислення центру мас для кожного підтіла в транспортному циклі.

Рівняння рівноваги [13]:

Колесо (\uparrow):

$$N - mg - V - K * \sin(\beta) = 0 \quad (3.1)$$

Колесо (\rightarrow):

$$H - K * \cos(\beta) = 0 \quad (3.2)$$

Колесо, момент проти годинникової стрілки навколо (В):

$$K * \cos(\beta) * a + mg * c - N(b + c) = 0 \quad (3.3)$$

$$K = \frac{N(b+c) - mg * c}{a * \cos(\beta)} \quad (3.4)$$

$$H = K * \cos(\beta) \quad (3.5)$$

$$V = N - mg - K * \sin(\beta) \quad (3.6)$$

Нормальна сила N дорівнює силі тяжіння (mg) від циклу перенесення згідно із законом дії та протидії. Сила N визначається шляхом знаходження центрів мас різних частин транспортного велосипеда. Транспортний велосипед поділено на три підчастини: вантаж, рама та водій, а також передні колеса. Рама складається з корпусу, шасі, двигуна, акумулятора та задніх коліс.

Синій блок складається з двигуна та акумулятора. Центр мас підчастин для завантаженого транспортного велосипеда показано на рисунку 3.3, де система координат розташована зліва біля колеса.

Маса різних частин транспортного велосипеда представлена в таблиці 3.1. У таблиці 3.2 показано положення та часткову масу кожної підчастини. При відображенні рисунка 3.3 вводяться сили та складається рівняння рівноваги.

З відомими центрами мас для різних частин тіла, нормальну силу N можна визначити за допомогою рівнянь рівноваги, створених силами та моментами після відпускання транспортного велосипеда.

Нормальна сила (N) – це сума нормальних сил задніх коліс ($N_1 + N_2$), де нормальна сила для правого заднього колеса дорівнює нормальній силі для

					КвРМТВА. 22143.01.14.00	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

лівого заднього колеса. Коли нормальна сила N отримана, повертаються до рівнянь (2.1) та (2.2) вище, щоб розв'язати решту сил.

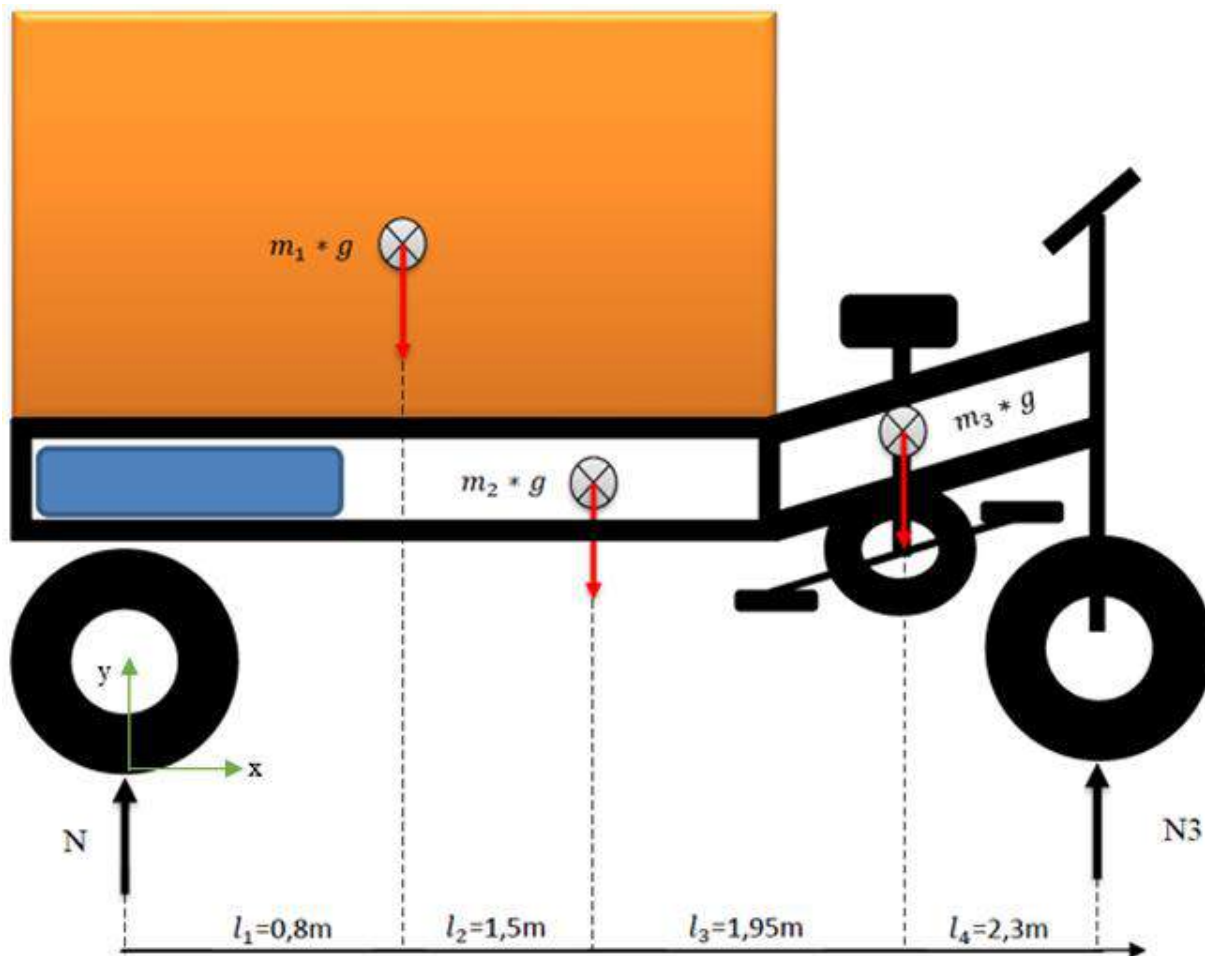


Рисунок 3.3 – Принципова схема завантаженого транспортного велосипеда з центрами мас різних частин.

Рівновага вимагає [13]:

Цикл перенесення (\uparrow):

$$N_1 + N_2 - m_2 g - m_1 g - m_3 g = 0 \quad (3.7)$$

Цикл перенесення, момент проти годинникової стрілки приблизно (N_1):

$$m_1g * l_1 + m_2g * l_2 + m_3g * l_3 - N_2 * l_4 = 0 \quad (3.8)$$

З рівняння (3.8) розв'язок (N_2):

$$N_2 = \frac{m_1gl_1 + m_2gl_2 + m_3gl_3}{l_4} \quad (3.9)$$

Потім (N_2) підставляється в рівняння (3.7), щоб знайти (N_1).

$$N_1 = m_1g + m_2g + m_3g - N_2 \quad (3.10)$$

Таблиця 3.1 – Частини транспортного велосипеда та їх вага.

№	Частини транспортного велосипеда	Вага (кг)
1	Водій	80
2	Колеса	10
3	Шасі	25
4	Кабіна	11
5	Двигун	12
6	Акумулятор	12
7	Вантаж	300

Таблиця 3.2 – Положення центру ваги для частин підкузова та ваги.

№	Навантаження	Довжина (м)	Вага (кг)
1	Вантаж	0,8	300
2	Рама	1,5	60
3	Водій плюс колеса	1,95	90

3.2 Аналіз матеріалів.

Мета полягає в тому, щоб знайти відповідний метал, який можна використовувати в ланці. Важливо дослідити густину та межу текучості, щоб досягти мінімальної маси та високої межі текучості, щоб мінімізувати деформації [13].

Для реалізації чотири етапного процесу вибору матеріалу Ешбі для ланки, потрібно витягти дані про матеріали з бази даних матеріалів CES EduPack. Першим кроком у процесі вибору матеріалу Ешбі є перетворення вимог до конструкції, що наведено в таблиці 3.3. Функція розповідає про те, що повинен робити продукт. Обмеження відповідають вимогам, які необхідно досягти для продукту. Метою продукту є вибір властивостей, які слід максимізувати або мінімізувати на основі обмежень. Вільні змінні - це параметри, які конструкція може змінювати.

Таблиця 3.3 – Матриця перетворення вимог до конструкції.

Функція	Опір деформації при максимальному навантаженні транспортного засобу
Обмеження	Матеріал повинен бути металом.
Мета	Низька вага, висока межа текучості, мінімальна деформація.
Вільні змінні	Вибір матеріалу.

Перетворюючи вимоги до проектування, представлені в таблиці 3.3, як відправну точку, наступним кроком є виключення матеріалів, які не відповідають вимогам. Матеріали, які не досягають меж, задані обмеженнями, відсіюються. Використовуючи таблицю 3.3, можна отримати карту матеріалів через базу даних матеріалів EduPack, яка показує зв'язок між межею текучості та густиною помноженою на ціну. Карта матеріалів обмежена лише металами та показана на рисунку 3.4.

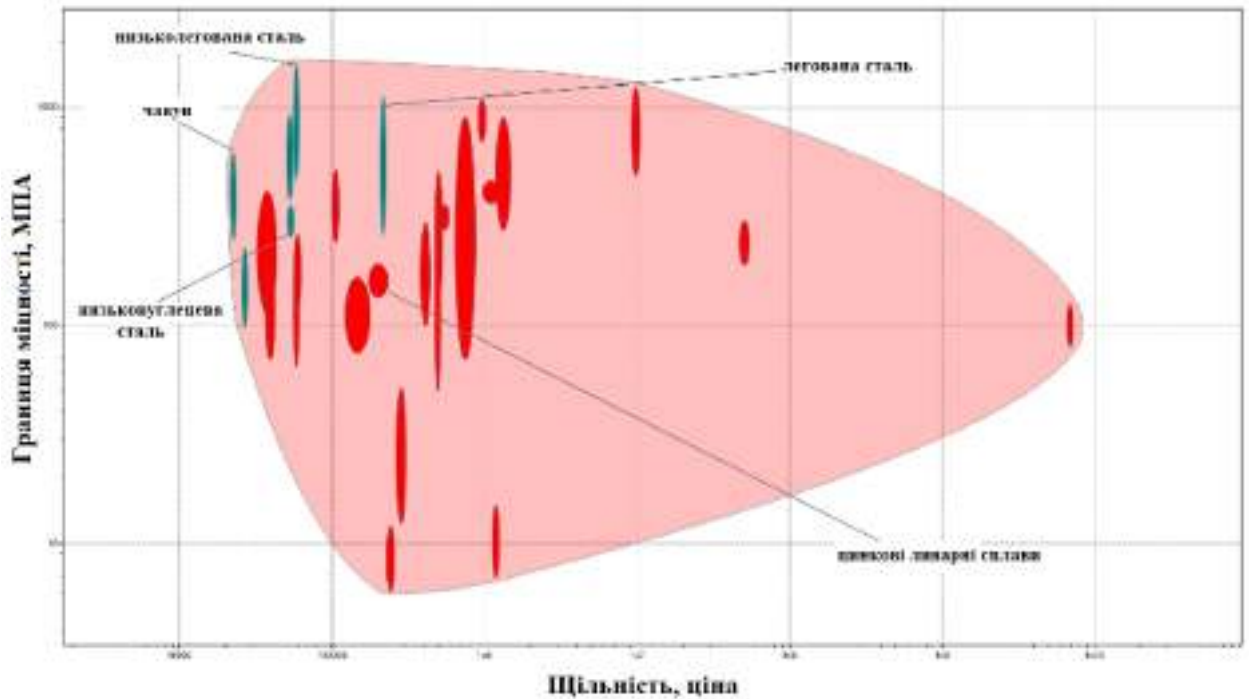


Рисунок 3.4 – Карта матеріалів групи металевих матеріалів.

Вибір матеріалів обмежується за допомогою індексу матеріалу з нахилом 2 (показник степеня в рівнянні 3.17), розрахованого нижче. Лінія з нахилом два застосовується до карти матеріалів, як показано на рисунку 3.5 [16]. Лінія переміщується ближче до області пошуку, і найбільш підходящі матеріали заносять в таблицю 3.4, де дані про матеріали отримані з бази даних матеріалів CES EduPack. Рейтинг матеріалів базується на критеріях ціни, щільності, межі текучості, модуля пружності та придатності для переробки та наведено в таблиці 3.5. Матеріали оцінюються від 1 до 5, де 1 означає менш добре, а 5 – найкраще. Оцінка базується на найважливіших вимогах, у цьому випадку це межа текучості, модуль пружності та щільність. Ціна обмежена 1600 грн/кг. У таблиці 3.4 наведено список змінних з мітками та їхніми назвами, що використовуються в рівняннях 3.12–3.17, і ці мітки будуть використані для визначення індексу матеріалу.

Таблиця 3.4 – Список змінних.

m	Маса
r	Радіус
L	Довжина
ρ	Густина
$F_{кр}$	Критична сила
E	Модуль пружності
I	Момент інерції

$$m = \pi * r^2 * L * \rho \quad (3.11)$$

$$F_{crit} = \frac{\pi^2 * E * I}{L^2} \quad (3.12)$$

$$I = \frac{\pi r^4}{4} \quad (3.13)$$

Підставимо 3.13 у 3.12, щоб отримати F_{crit} :

$$F_{crit} = \frac{\pi^2 * E * r^4}{4L^2} \quad (3.13)$$

З 3.13 та 3.11, отримаємо масу (m):

$$m \geq \left(\frac{4F}{\pi}\right)^{\frac{1}{2}} * (L)^2 * \left(\frac{\rho}{E^{1/2}}\right) \quad (3.14)$$

Індекс матеріалу для круглого поперечного перерізу наведено нижче, у рівнянні (3.15). При мінімальній масі, індекс матеріалу (M) максимізується згідно з рівнянням (3.15).

$$M = \frac{E^{1/2}}{\rho} \quad (3.15)$$

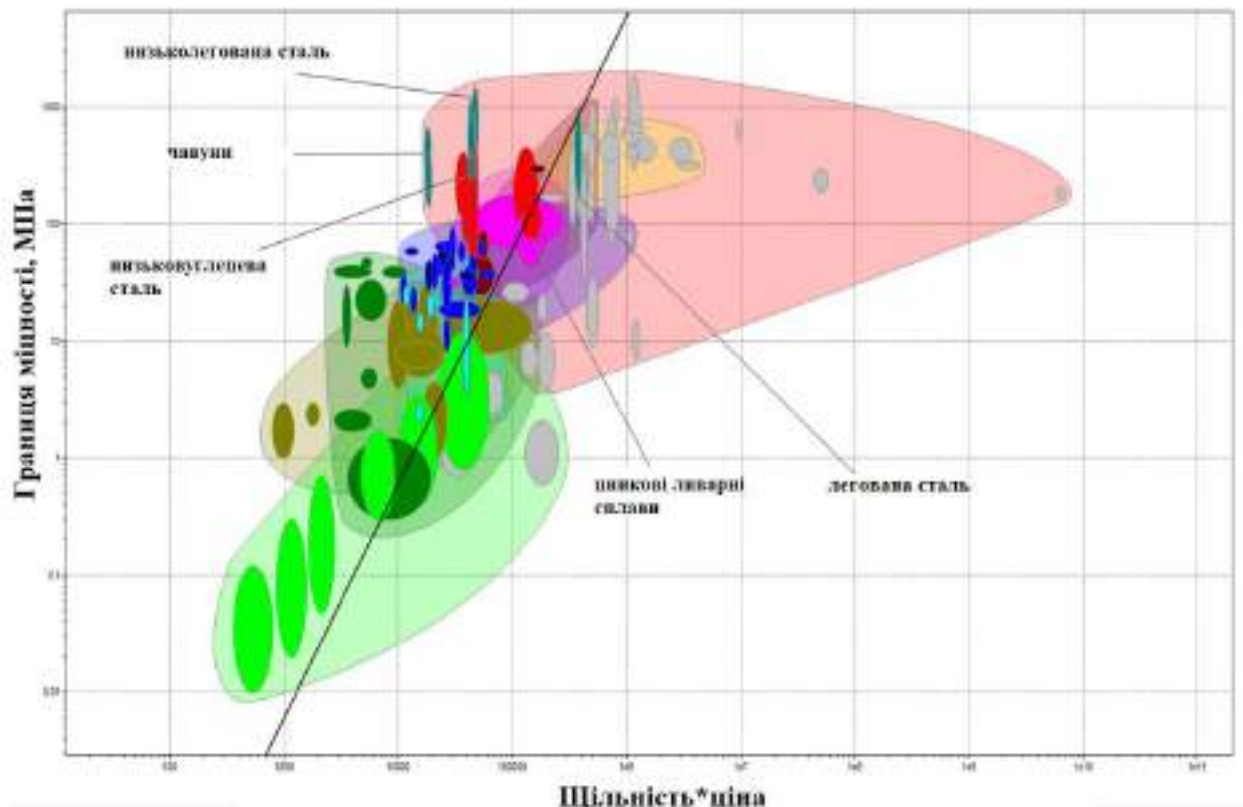


Рисунок 3.5 – Карта матеріалів для п'яти дослідних металів.

На заключному етапі процесу вибору матеріалу проводиться глибше дослідження матеріалу-переможця в базі даних програмного забезпечення CES EduPack. Там вибирається матеріал, який найкраще підходить для виробу, на основі існуючих вимог. Найважливішими критеріями в цьому випадку є межа текучості та щільність. Це робиться для того, щоб мати змогу визначити сильні та слабкі сторони матеріалу [16].

Таблиця 3.5 – Дані про матеріали взяті з бази даних матеріалів CES EduPack [15].

Матеріал	Ціна (грн/кг)	Щільність, (кг/м ³)*10 ³	Модуль пружності, (ГПа)	Границя міцності, (МПа)
Чавун	4,88–5,40	7,05–7,25	165–180	250–680
Низьколегована сталь	11,4–12,38	7,8–7,9	205–217	400–1500
Нержавіюча сталь	92,4–96,8	7,6–8,1	189–210	170–1000
Низьковуглецева сталь	10,60–11,40	7,8–7,9	200–215	250–395
Ливарний цинковий сплав	36,40–52	4,95–7	68–100	80–450

Таблиця 3.6 – Матриця вибору для А-подібного кронштейна з системою оцінювання.

Матеріал	Ціна	Щільність	Модуль пружності	Межа розтягування	Придатний для переробки	Всього
Чавун	5	4	2	4	5	20
Низьколегова на сталь	3	2	5	5	5	20
Нержавіюча сталь	1	3	3	2	5	14
Низьковуглец ева сталь	4	2	4	3	5	18
Ливарний цинковий сплав	2	5	1	1	5	14

Система оцінювання показує, що чавун та низьколегована сталь отримують однакову оцінку, див. таблицю 3.6. Далі у записці пояснюється, чому зрештою обрано один із матеріалів. Решта матеріалу пізніше проходить глибше дослідження, щоб остаточно вибрати найбільш підходящий матеріал для виробу.

3.3 Будівельна механіка.

Тяговий важіль можна порівняти з фермою, що складається з двох стрижневих елементів, де третій стрижневий елемент, розташований горизонтально посередині, не враховується. З третім стрижневим елементом розрахунок стає складнішим, і тому ферма спрощується. Ферма аналізується вручну. Ферма аналізується шляхом обчислення різних часткових моментів, таких як матриця жорсткості елементів, невідомі переміщення та нормальні сили. Схематична діаграма ферми представлена нижче на рисунку 3.6.

Ферма розділена на ступені волі та елементи і показана на рисунку 3.7. Відомі факти (площа, модуль пружності та сила), необхідні для аналізу ферми, наведені в таблиці 3.7. Тягове плече є однорідним, де площа, модуль пружності та довжина однакові, а відмінність полягає в $\nu\bar{x}$ та $\nu\bar{y}$, які є напрямними косинусами та визначаються як скалярний добуток двох напрямних векторів. Ці кроки виконуються для обчислення ефективного напруження фон Мізеса, а потім порівняння результату з ефективним напруженням, отриманим за допомогою моделювання методом скінченних елементів.

					КвРМТВА. 22143.01.14.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

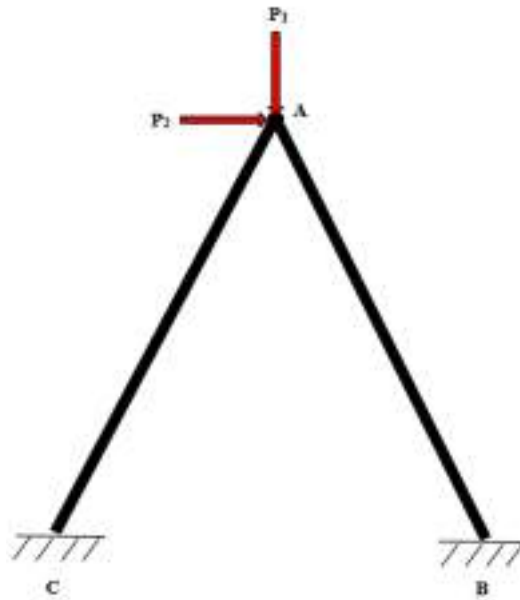


Рисунок 3.6 – Схема ферми.

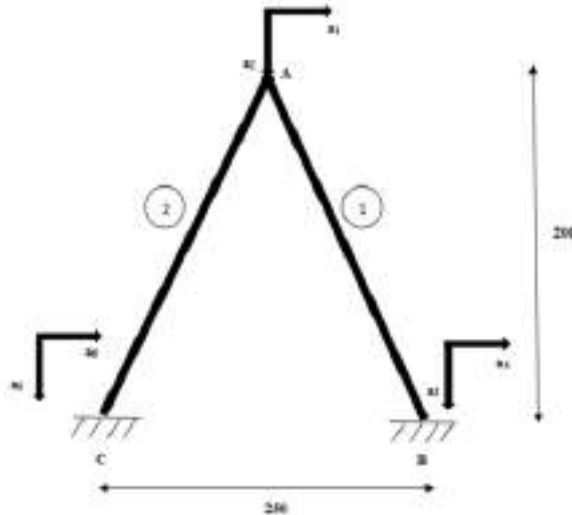


Рисунок 3.7 – Ферма розділена на ступені волі та елементи.

Таблиця 3.7 – Відомі факти.

Змінна	Розмірність
A	m^2
E	ГПа
P_1	кН
P_2	кН

Ферма складається з двох стрижневих елементів, і кожен стрижневий елемент має глобальну матрицю жорсткості елементів K^e . Довжини стрижневих елементів невідомі, але їх можна знайти за допомогою теореми Піфагора. Матриця жорсткості елементів K^e отримується шляхом множення матриць локальної матриці жорсткості елементів K^e та матриці перетворення G . Площа поперечного перерізу однакова для стрижнів і визначається з рівняння (3.17).

Для кожного стрижневого елемента встановлюється взаємозв'язок елементів [13]:

$$a^e = \frac{E^e A^e}{L^e} \quad (3.16)$$

Де A^e для елементів дорівнює:

$$A^e = \pi * r^2 \quad (3.17)$$

Матриця перетворення G для елементів один та два показана нижче.

$$G_1 = \begin{bmatrix} n_{x\bar{x}} & n_{y\bar{x}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & n_{x\bar{x}} & n_{y\bar{x}} \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

$$G_2 = \begin{bmatrix} n_{x\bar{x}} & -n_{y\bar{x}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & n_{x\bar{x}} & -n_{y\bar{x}} \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

Для елементів один та два матриця жорсткості елементів розв'язується за допомогою виразу нижче.

$$K^e = \frac{EA}{L} \begin{bmatrix} C & -C \\ -C & C \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

Де

					КВРМТВА. 22143.01.14.00	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$C = \begin{bmatrix} n_{x\bar{x}}n_{x\bar{x}} & n_{x\bar{x}}n_{y\bar{x}} \\ n_{y\bar{x}}n_{x\bar{x}} & n_{y\bar{x}}n_{y\bar{x}} \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

Матриця жорсткості елементів для елементів один та два показана нижче.

$$K^e = \frac{EA}{L} \begin{bmatrix} n_{x\bar{x}}n_{x\bar{x}} & n_{x\bar{x}}n_{y\bar{x}} & -n_{x\bar{x}}n_{x\bar{x}} & -n_{x\bar{x}}n_{y\bar{x}} \\ n_{y\bar{x}}n_{x\bar{x}} & n_{y\bar{x}}n_{y\bar{x}} & -n_{y\bar{x}}n_{x\bar{x}} & -n_{y\bar{x}}n_{y\bar{x}} \\ -n_{x\bar{x}}n_{x\bar{x}} & -n_{x\bar{x}}n_{y\bar{x}} & n_{x\bar{x}}n_{x\bar{x}} & n_{x\bar{x}}n_{y\bar{x}} \\ -n_{y\bar{x}}n_{x\bar{x}} & -n_{y\bar{x}}n_{y\bar{x}} & n_{y\bar{x}}n_{x\bar{x}} & n_{y\bar{x}}n_{y\bar{x}} \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

Матриця топології:

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 2 & 3 & 4 \\ 2 & 1 & 2 & 5 & 6 \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

Збірка:

З інформацією з матриці топології можна отримати глобальну матрицю жорсткості K шляхом збірки двох матриць жорсткості елементів. Матриця жорсткості складається з матриці, заповненої нулями, а потім коефіцієнти в матрицях жорсткості елементів додаються до позицій у матриці жорсткості, заданій матрицею топології. Ферма має два навантаження P_1 та P_2 , які діють в ступенях свободи один та два.

Глобальні переміщення у фермі:

$$a = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

Задані переміщення без граничних умов.

					КВРМТВА. 22143.01.14.00	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Умови опори:

$$\begin{bmatrix} 3 & 0 \\ 4 & 0 \\ 5 & 0 \\ 6 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

Вузлові навантаження:

Вектор навантаження:

$$f_1 = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

Вектор опорних сил:

$$f_b = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ f_{b,3} \\ f_{b,4} \\ f_{b,5} \\ f_{b,6} \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

Складається система рівнянь для розв'язання відносно невідомих змінних (x означає значення).

Після визначення переміщень розв'язуються опорні сили. Потім нормальні сили обчислюються за рівнянням (3.30).

$$K_a = f_1 + f_b \quad (3.28)$$

$$\frac{EA}{L} \begin{bmatrix} \text{XXXXXX} \\ \text{XXXXXX} \\ \text{XXXXXX} \\ \text{XXXXXX} \\ \text{XXXXXX} \\ \text{XXXXXX} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ f_{b,3} \\ f_{b,4} \\ f_{b,5} \\ f_{b,6} \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

$$N^{(1,2)} = EAB\bar{a}^{1,2} \quad (3.30)$$

Де

$$\bar{a}^{1,2} = Ga^{1,2} \quad (3.31)$$

$$B = \frac{1}{L} [-1 \quad 1] \quad (3.32)$$

Після визначення нормальних сил з рівняння (3.30) головні напруження обчислюються з рівняння (3.33), а потім підставляють їх у рівняння фон Мізеса [13].

$$\sigma_{1,2} = \frac{N}{A} \quad (3.33)$$

$$\sigma_v^{VM} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} \quad (3.34)$$

3.4 Результати розрахунку.

У цьому розділі представлені результати, отримані в ході роботи. Результати представлені у вигляді сил зі статичних та динамічних розрахунків, вибору матеріалу для тяги, САД-моделювання тяги, напружень з розрахунків структурної механіки та моделювання методом скінченних елементів тяги.

					КВРМТВА. 22143.01.14.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

3.4.1 Сили, що діють на тягу.

Сили, розраховані з розділу статички, коли транспортний велосипед знаходиться в статичній рівновазі, спочатку вимагають визначення центру мас транспортного велосипеда. Результат показує, що задні тяги на задніх колесах здатні витримувати вагу 226 кг ваги транспортного велосипеда з максимальним навантаженням 450 кг. Це означає, що тяга на задніх колесах здатна витримувати 113 кг загальної маси. Значення підставляють у рівняння (3.4), (3.5) та (3.6), щоб отримати сили, що діють у точках К, Н та V. Ці сили показано на рисунку 3.2.

$$K \approx 1089 \text{ Н}$$

$$H \approx 770 \text{ Н}$$

$$V \approx 262 \text{ Н}$$

3.4.2 Вибір матеріалу.

Вимога Starke Cycles щодо матеріалів полягає в тому, щоб знайти відповідний металевий матеріал, який можна використовувати в тяговому важелі, де важливо визначити розміри щільності та межі текучості, щоб досягти мінімальної маси та високої межі текучості для мінімізації деформацій. Досліджувані матеріали ранжуються для отримання найкращого вибору. Два матеріали отримують однакову кількість балів, і це чавун та низьколегована сталь, які наведені в таблиці 3.8 нижче. Чавун занадто твердий і крихкий, щоб його можна було формувати молотком, прокаткою або пресуванням. Але оскільки він жорсткий і стійкий до вигину, він може витримувати великі навантаження стиску. Чавун, однак, відносно слабкий на розтяг і руйнується під навантаженням на розтяг з незначним попередженням. При використанні чавуну в холодних умовах ризик

					КвРМТВА. 22143.01.14.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

розтріскування через пошкодження від морозу зростає, і тому чавун буде виключений як рішення для важеля тяги [16]. На відміну від чавуну, низьколегована сталь є кращою альтернативою. Низьколегована сталь, порівняно з чавуном, має тенденцію до зміни форми (пластифікації) перед руйнуванням, оскільки вона має вищу в'язкість до руйнування [16]. Чавун, з іншого боку, більш крихкий і може спричинити раптове руйнування матеріалу без попередження. З низьколегваною сталлю як матеріалом-переможцем, проводиться глибше дослідження матеріалу, щоб знайти найбільш підходящий матеріал з урахуванням критеріїв. У таблиці 3.9 представлені найбільш підходящі матеріали серед низьколегваної сталі.

Таблиця 3.8 – Рейтинг матеріалів.

Матеріал	Ціна	Щільність	Модуль пружності	Межа текучості	Придатність для переробки	Всього
Чавун	5	4	2	4	5	20
Низьколегована сталь	3	2	5	5	5	20

Таблиця 3.9 – Дані про матеріали для різних типів низьколегваної сталі.

Матеріал	Ціна (грн/кг)	Щільність (кг/м ³)10 ³	Межа текучості (МПа)	Модуль пружності (ГПа)
Низьколегована сталь, AISI4340 нормалізована	17,6-19,06	7,83-7,9	205-213	770-950
Низьколегована сталь, AISI4135	14,3-15	7,84-7,87	200-210	483-586
Низьколегована сталь, AISI8620	15,2-16,06	7,8-7,9	201-212	320-400

Дослідження показує дані про матеріали, і на основі цього можна вибрати найбільш підходящий матеріал. Матеріали оцінюються, а потім ранжуються.

Матеріал-переможець був взято з таблиці 3.10, і це була низьколегована сталь, AISI 4340 нормалізована.

Таблиця 3.10 – Рейтинг матеріалів.

Матеріал	Ціна	Щільність	Модуль пружності	Межа текучості	Всього
Низьколегована сталь, AISI4340 нормалізована	1	2	3	3	9
Низьколегована сталь, AISI4135	3	1	1	2	7
Низьколегована сталь, AISI8620	2	3	2	1	8

3.4.3 CAD-модуляція важеля керування.

Важіль змодельовано в Solidworks, і результат показано на рисунку 3.8. Важіль підвіски MacPherson повинен відповідати стандартизованим елементам машини та бути виготовленим з одного матеріалу, щоб мінімізувати вагу та збільшити жорсткість. Тому розроблено CAD-модель. Важіль підвіски кріпиться гвинтами та гайками до кріплень. Між поверхнями, де важіль встановлений у кріпленнях, слід розмістити нейлонові шайби як втулки, щоб уникнути зносу. Зображення А-подібного важеля показано на рисунку 3.9.

					КвРМТВА. 22143.01.14.00	Арк.
						54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

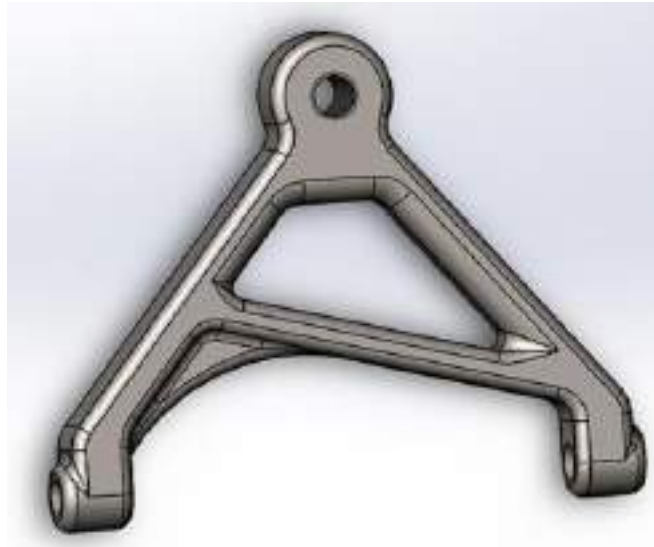


Рисунок 3.8 – CAD-модуляція важеля.



Рисунок 3.9 – Зображення важеля ланки.

3.4.4 Результати розрахунку напружень.

Використовуючи моделювання в інструментах моделювання Solidworks, важіль ланки аналізується, і результат показано на рисунку 3.10. Важіль ланки аналізується, щоб з'ясувати, де виникають концентрації напружень. Напруження, показане в аналізі, є ефективним напруженням фон

					КвРМТВА. 22143.01.14.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

Мізеса. Важіль ланки виготовлено з низьколегованої сталі, нормалізованої за стандартом AISI 4340.

Граничні умови визначені та показані на рисунку 3.11. Нижні порожнисті вали заблоковані (зелені стрілки), оскільки вони прикріплені до шасі. Верхній порожнистий вал піддається стискаючим силам (фіолетові стрілки), які повинні імітувати осьову контактну силу H (770 Н) зі статичних розрахунків.

Червоний колір показує найбільші напруження, а синій – найменші. Масштаб у Н/м^2 (Па). Команда «Mesh and Run» використовується для відображення результату для ефективного напруження фон Мізеса та переміщень, що виникають, див. рисунок 3.10. Результат показує, що найбільші напруження становили близько 3 МПа.

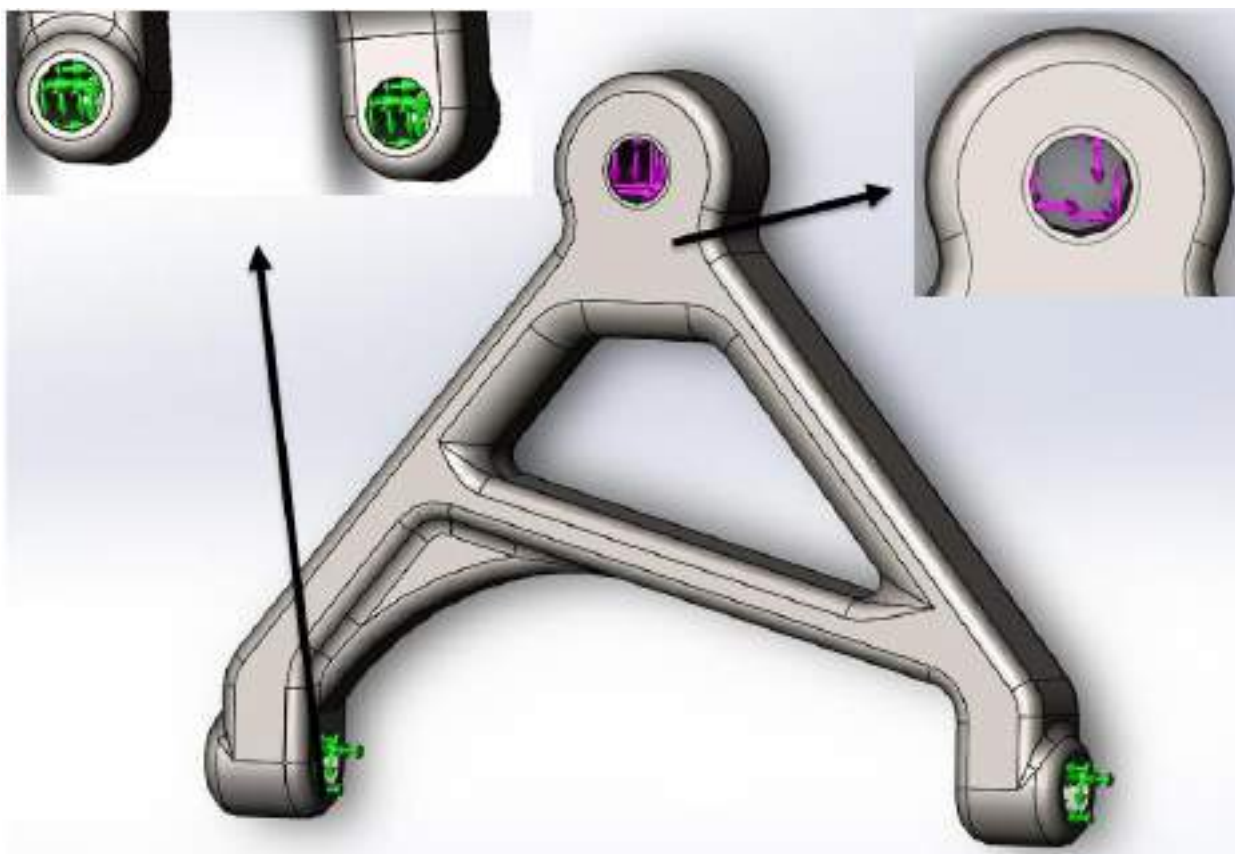


Рисунок 3.10 – Граничні умови визначені вище.

					КвРМТВА. 22143.01.14.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

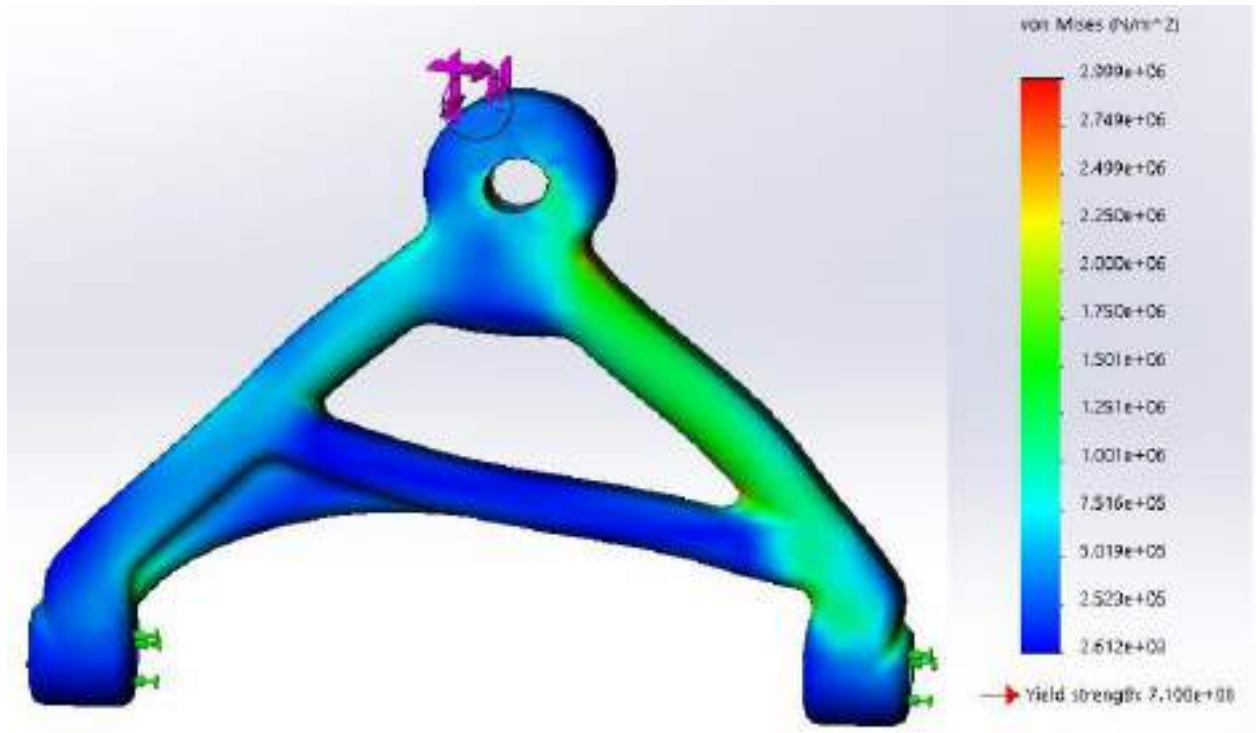


Рисунок 3.11 – Ефективне напруження фон Мізеса, розраховане на важелі ланки.

Коефіцієнт запасу міцності для важеля тяги становить приблизно 200, оскільки межа текучості становить 710 МПа у статичних умовах. Отриманий коефіцієнт запасу міцності застосовується лише тоді, коли велосипед повністю навантажений і не рухається. У динамічних умовах, тобто коли транспортний велосипед рухається, на нього діятимуть значно вищі сили, і, отже, високий коефіцієнт запасу міцності на важіль тяги для роботи в складних умовах.

Ефективне напруження фон Мізеса розраховується за рівнянням (3.34), але спочатку необхідно визначити переміщення (a^1 та a^2) за допомогою матриці жорсткості елементів (3.29).

Визначивши переміщення та площу поперечного перерізу, нормальні сили можна розрахувати за рівнянням (3.30). За відомих нормальних сил головні напруження можна отримати за допомогою рівняння (3.33). За

відомих головних напружень вони підставляються в ефективне напруження фон Мізеса, а результат наведено нижче.

$$a^1 = a^2 = 8,7 * 10^{-7} \text{ м}^{-3}$$

$$A = 7,07 * 10^{-4} \text{ м}^2$$

$$N^1 = N^2 = 639 \text{ Н}$$

$$\sigma^1 = \sigma^2 = 0,9 \text{ МПа}$$

$$\sigma_v^{VM} = 0,9 \text{ МПа}$$

3.4.5 Загальний аналіз результатів.

Результати статичних розрахунків МСЕ (Будівельна механіка).

Механічні розрахунки проводяться для того, щоб побачити, які сили діють на важіль з'єднання у статичному стані під час транспортного циклу. Використовуючи сили, отримані зі статичних розрахунків, ці значення можна ввести в програму Cad для проведення аналізу МСЕ.

У цій роботі використовуються два методи розрахунку для порівняння значення ефективного напруження, і це робиться за допомогою ручного розрахунку за МСЕ та моделювання за МСЕ в САПР. Був проведений спрощений розрахунок за МСЕ, де важіль з'єднання було змодельовано як два стрижні, щоб отримати перше уявлення про те, які навантаження діють.

На наступному кроці проводиться більш складний розрахунок напружень за допомогою скінченних елементів на основі CAD-моделі важеля з'єднання.

Розрахунки за МСЕ дали ефективне напруження, яке знаходилося в тому ж діапазоні, тобто 0,9 Мпа порівняно з аналізом МСЕ, який дав 3 МПа. Це прийнятне значення, навіть якщо розрахунок за МСЕ є спрощеною моделлю реального важеля з'єднання.

					КвРМТВА. 22143.01.14.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58

Аналіз методом скінченних елементів (МСЕ) дав точніший результат, ніж ручні розрахунки, і це пояснюється тим, що аналіз МСЕ в програмі САД поділяє деформації на дискретні ступені свободи. Там розміщуються прості елементи, які разом утворюють важіль, що моделюється. Елементи описують певний режим дії та надають певну геометрію. У будівельній механіці було розраховано середнє значення ефективного напруження, оскільки не всі частини важеля були враховані. Деформована геометрія, де прикладена зовнішня сила, призводить до ефективного напруження фон Мізеса, яке показує, що найбільші напруження становлять близько 3 МПа. Коефіцієнт запасу міцності близько 200 можливий, оскільки межа текучості становить близько 710 МПа. В експлуатації коефіцієнт запасу міцності буде значно нижчим через динамічні навантаження, які впливають на транспортний засіб. Оскільки важко зрозуміти, які навантаження впливатимуть на транспортний засіб у реальному використанні, коли він рухається, враховувалися лише статичні сили. Напруження зростають, як тільки велосипед починає рухатися, і можуть стати справді великими, коли велосипед врізається в щось, потрапляє у вибоїну чи щось інше. У розрахунках методом скінченних елементів спостерігається, що ланка тяги не піддається більшому ризику ні пластичної деформації, ні зміщень, які можуть вплинути на роботу. Це призводить до того, що ланка тяги вважається міцною.

Вибір матеріалу.

Вимога Starke Cycles до матеріалу полягає в тому, щоб важіль тяги складався з певного виду металу. Ще одна вимога полягає в тому, щоб маса була якомога нижчою, а також щоб межа текучості була якомога вищою, щоб мінімізувати будь-які деформації на важелі тяги. Матеріали, що досліджувалися, ранжувалися, щоб знайти найкращий та найбільш підходящий матеріал. Згідно з матрицею вибору, матеріали чавун та низьколегована сталь були найбільш придатними для використання. Вони отримали однакові високі бали в кінці рейтингу. Вибір припав на

					КвРМТВА. 22143.01.14.00	Арк.
						59
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

низьколеговану сталь, оскільки вона мала вищу межу текучості та модуль пружності, ніж чавун. Низьколегована сталь запобігає деформації, відрізняючись від чавуну. Чавун має меншу щільність, але різниця настільки мала, що її ледве помітно. Недоліком чавуну є його крихкість, яка не придатна в таких контекстах, як важіль тяги, оскільки він потім легко ламається. Озираючись назад, було відзначено помилку, що критерій крихкості не враховувався. Якби цей критерій був включений, матеріал чавун можна було б одразу виключити через його високу крихкість. Було проведено глибше дослідження бази даних матеріалів CES EduPack, щоб знайти найбільш підходящий тип низьколегованої сталі. У таблиці 3.9 наведено досліджувані матеріали. Ці матеріали були обрані завдяки своїм властивостям, які є відповідним вибором для продукту. Властивості матеріалів у поєднанні з встановленими критеріями були вирішальними в процесі вибору правильного матеріалу. Досліджувані матеріали мали подібні властивості і всі могли б працювати як рішення. Незважаючи на їхню схожість, матеріал був обраний переможцем за допомогою системи оцінювання, де матеріали ранжуються. Кінцевий результат був дуже близьким за кількістю балів, але де найважливіші критерії були вирішальними в оцінюванні. Матеріал-переможець, низьколегована нормалізована сталь AISI 4340, став переможцем саме завдяки великій різниці в межі текучості порівняно з іншими матеріалами. Інші матеріали були дещо дешевшими за ціною, але межа текучості мала більше значення в оцінюванні, і тому було обрано переможця. Матеріал низьколегована нормалізована сталь AISI 4340 відповідає вимогам міцності та не ламається під максимальним навантаженням транспортного велосипеда, що робить її гідним переможцем у виборі матеріалів.

					КвРМТВА. 22143.01.14.00	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

1. У роботі виконано порівняння спрощеного інженерного розрахунку та чисельного аналізу методом скінченних елементів для визначення ефективних напружень у важелі тяги підвіски транспортного велосипеда. Отримані результати знаходяться в одному діапазоні значень, що підтверджує можливість застосування спрощених моделей на початкових етапах проєктування, тоді як МСЕ-аналіз забезпечує вищу точність за рахунок урахування реальної геометрії та розподілу деформацій.

2. Результати МСЕ-аналізу показали, що максимальні ефективні напруження за критерієм фон Мізеса становлять близько 3 МПа, що є значно нижчим за межу текучості матеріалу. Це свідчить про високий коефіцієнт запасу міцності та відсутність ризику пластичної деформації або небезпечних переміщень важеля тяги за умов статичного навантаження.

3. На основі багатокритеріального аналізу матеріалів обґрунтовано вибір низьколегованої нормалізованої сталі AISI 4340, яка забезпечує необхідну міцність, жорсткість і надійність конструкції та відповідає експлуатаційним вимогам транспортного велосипеда.

					КвРМТВА. 22143.01.14.00	Арк.
						61
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. MOVEBYBIKE. Електронний ресурс: <http://www.movebybike.se/sv/Boka>, 2018-09-10, дата звернення 15.05.2026
2. Starke Cycles. Електронний ресурс: <http://www.starkecycles.com/>, дата звернення 15.05.2026
3. EU Law. Електронний ресурс: <https://eur-lex.europa.eu/TodayOJ>, дата звернення 15.05.2026
4. Електронний ресурс: <https://www.promel.com.ua/info>, дата звернення 15.05.2026
5. Shaik M., Bolagani M., Chadalavada P., Kesan A., Prasad T. Design and Performance Analysis of Electric Bicycles : project work / Dept. of EEE, St. Ann's Coll. of Eng. and Tech., Chirala, India. – 2025, P.113-127.
6. Morchin W. C. Electric Bicycles: A Guide to Design and Use / IEEE Press. Wiley, 2020. – 98 P.
7. Control Arm. Електронний ресурс: https://www.bluestar.com/get_informed/article/the-purpose-of-control-arms-bushings-ball-joints, дата звернення 15.05.2026
8. B. Heissing, M. Ersoy, Chassis Handbook, Vieweg+Tebner, Berlin, Germany, 2011. – 579 P.
9. 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.
10. Бортник Н. В. Удосконалення конструкції передньої підвіски легкового автомобіля Volkswagen Passat B6 : магист. дис. — Тернопіль : Тернопіл. нац. техн. ун-т ім. І. Пулюя, 2024. – 63 с.
11. Trzesniowski M. Suspension System / Wiesbaden : Springer Vieweg, 2023. – XXI, 490 P.

					КВРМТВА. 22143.01.14.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62

12. Поляк І. Є., Борисов О. В., Мацаєнко А. М. Моделювання підресореної частини мобільного транспортного засобу // Системи і технології зв'язку, інформатизації та кібербезпеки. ВІТІ, № 3, 2023. – С. 66-73.

13. Musa A. I., Adeyemi O. O., Adesusi O. M. Mechanistic Modeling and Engineering Evaluation of Bicycle Suspension Systems / Technical Journal, UET Taxila. — Vol. 30, № 3, 2025. – P. 16-23.

14. Вертикальні коливання підресореної частини колісних транспортних засобів під дією випадкових збурень / М. Г. Грубель, О. П. Красюк, М. Б. Сокіл, Р. А. Нанівський // Наукові нотатки: Зб. Наук. Пр. Луцьк, 2014. Вип. 46. С. 112-116.

15. Комп'ютерна графіка SolidWorks: навч. посіб. / Козяр М.М., Фещук Ю.В., Парфенюк О.В. / Видавництво «Університетська книга», 2024. – 252 с . ISBN 978-966-289-191-1.

16. Матеріалознавство та технологія металів : підручник для здобувачів професійної (професійно-технічної) освіти / А. М. Власенко. – Київ : Літера ЛТД, 2019. – 224 с.

					КвРМТВА. 22143.01.14.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		63

ДОДАТКИ

					КвРМТВА. 22143.01.14.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		64