

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВЕТЕРИНАРНОЇ
МЕДИЦИНИ ТА БІОТЕХНОЛОГІЙ ІМЕНІ С.З. ГІЖИЦЬКОГО
КАФЕДРА АВТОМОБІЛІВ І ТРАКТОРІВ

К В А Л І Ф І К А Ц І Й Н А Р О Б О Т А
другого (магістерського) рівня вищої освіти

на тему: **«Оцінка ефективності використання композитних матеріалів в
елементах підвіски спортивного автомобіля»**

Виконав: студент групи Ат-61
Спеціальності 274 „Автомобільний транспорт”
(шифр і назва)

Віталій Хахула

(ім'я та прізвище)

Керівник: Георгій Худавердян
(ім'я та прізвище)

Дубляни 2025

АНОТАЦІЯ

«Оцінка ефективності використання композитних матеріалів в елементах підвіски спортивного автомобіля». – Хахула В. І. – Кваліфікаційна робота. Кафедра автомобілів і тракторів. - Дубляни, -Львівський НУВМБ ім.С.Гжицького, 2025. 54 с. текст. 5 част. 9 рис., 10 табл., 24 бібл.

У роботі проведено детальний аналіз розвитку конструкцій та матеріалів підвіски спортивних автомобілів, що відображає ключові тенденції зниження невіднесеної маси та вирішення проблеми співвідношення міцності до ваги традиційних металевих сплавів. Розглянуто основні властивості композиційних матеріалів (вуглепластик, кевлар, скловолокно) у порівнянні зі сталлю та алюмінієвими сплавами.

Проведено аналіз досліджень та теоретичне обґрунтування вибору елемента для модернізації (наприклад, нижнього поперечного важеля), включаючи визначення максимальних навантажень, що діють на елемент (гальмування, поворот, ударні навантаження).

Запропоновано конструкцію деталі з композиту, визначено оптимальний напрямок волокон та кількість шарів. Проведено порівняльну оцінку ефективності, яка полягає у розрахунку зниження невіднесеної маси та оцінці впливу цього зниження на керованість і плавність ходу автомобіля. Завершено роботу техніко-економічним аналізом, що зіставляє високу вартість виробництва композитів з динамічним та експлуатаційним вигодою у характеристиках.

Ключові слова: композитні матеріали, вуглепластик (CFRP), підвіска спортивного автомобіля, невіднесена маса, скінченно-елементний аналіз (FEA), питома жорсткість.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	3
РОЗДІЛ 1. ЗМАГАННЯ FORMULA SAE/FORMULA STUDENT.....	5
1.1. Історія розвитку та загальні поняття про змагання Formula Student...5	
1.2 Основні вимоги регламенту до конструкції боліда.....6	
1.3 Статичні та динамічні дисципліни9	
1.4 Аналіз конструкцій підвісок спортивних автомобілів типу «Formula Student»12	
ВИСНОВКИ ЗА РОЗДІЛОМ.....	16
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ПІДВІСКИ СПОРТИВНИХ АВТОМОБІЛІВ ТИПУ FORMULA STUDENT	18
2.1 Кінематичний розрахунок підвіски.....18	
2.2 Методика визначення навантажень, що діють на елементи підвіски..20	
ВИСНОВКИ ЗА РОЗДІЛОМ.....	23
РОЗДІЛ 3. ПРОЄКТУВАННЯ ТА РОЗРАХУНОК КОМПОЗИТНОГО ЕЛЕМЕНТА.....	25
3.1 Розробка конструкції деталі з композиту.....25	
3.2. Проведення розрахунків на статичну міцність та втому.....28	
ВИСНОВКИ ЗА РОЗДІЛОМ.....	33
РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ	34
4.1. Шкідливі та небезпечні фактори, які виникають під час роботи з композитними матеріалами.....34	
4.2. Організаційні та технічні заходи щодо забезпечення захисту працівників від шкідливих та небезпечних факторів36	
4.3. Пожежна безпека.....38	
ВИСНОВКИ ЗА РОЗДІЛОМ.....	39
РОЗДІЛ 5. ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА	41
5.1. Економічна ефективність використання композитних матеріалів.....41	

ВИСНОВКИ ЗА РОЗДІЛОМ.....	44
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	45
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	49

ВСТУП

У висококонкурентному середовищі змагань Formula Student боротьба за призові місця вимагає від інженерів постійного пошуку шляхів покращення динамічних характеристик боліда. Ключовим напрямком є зниження маси автомобіля, особливо його непідресореної частини, що безпосередньо впливає на зчеплення шин з трасою та керованість.

Традиційні металеві сплави (сталь, алюміній) в елементах підвіски досягли межі своїх можливостей щодо співвідношення міцності та ваги. Використання полімерних композиційних матеріалів (вуглепластику) відкриває нові перспективи для полегшення конструкції без втрати жорсткості. Тому оцінка ефективності заміни металевих важелів на композитні та розробка технології їх проектування є актуальним завданням для досягнення конкурентних переваг студентської команди.

Робота виконується відповідно до плану науково-дослідних робіт кафедри автомобілів і тракторів ЛНУВМБ ім. С.З. Гжицького та спрямована на впровадження новітніх матеріалів у конструкцію спортивних транспортних засобів.

Метою роботи є підвищення техніко-експлуатаційних показників спортивного автомобіля шляхом розробки та обґрунтування використання композитного нижнього важеля підвіски для зниження непідресореної маси.

Для досягнення мети необхідно вирішити такі завдання:

- Проаналізувати властивості композитних матеріалів (CFRP) у порівнянні з традиційними металами та оглянути існуючі конструктивні рішення в Formula Student.
- Визначити розрахункові навантаження на нижній важіль підвіски у критичних режимах руху (максимальне гальмування, поворот, ударні навантаження).

- Розробити конструкцію композитного важеля та визначити оптимальну схему армування (ламінат) для забезпечення необхідної міцності.
- Провести скінченно-елементний аналіз (FEA) напружено-деформованого стану деталі та перевірити запас міцності за критерієм Цая-Ву.
- Виконати порівняльну оцінку масових характеристик та економічний аналіз доцільності виробництва композитної деталі.

Об'єктом дослідження є процес проектування елементів підвіски спортивного автомобіля з використанням сучасних композиційних матеріалів.

Предметом дослідження є ефективність використання вуглепластику в конструкції нижнього поперечного важеля та його вплив на масові та вартісні показники виробу.

Методи дослідження: теоретичний аналіз (властивості матеріалів); аналітичні розрахунки (динаміка навантажень); CAD-моделювання (геометрія важеля); CAE-аналіз (SolidWorks Simulation для перевірки міцності); техніко-економічний аналіз.

Наукова новизна полягає в обґрунтуванні оптимальної структури ламінату для навантаженого елемента підвіски студентського боліда, що дозволяє забезпечити необхідний ресурс при мінімальній вазі в умовах дрібносерійного виробництва.

Розроблена конструкція композитного важеля дозволяє знизити масу деталі на 58% порівняно зі сталевим аналогом, а результати розрахунків можуть бути використані командою при виготовленні реального прототипу для змагань.

РОЗДІЛ 1. ЗМАГАННЯ FORMULA SAE/FORMULA STUDENT

1.1. Історія розвитку та загальні поняття про змагання Formula Student

Formula Student — це всесвітнє змагання, призначене для студентів технічних вищих навчальних закладів. Правила змагань вимагають від студентів розробити, виготовити, а потім продемонструвати власний монопоїст для аматорського гонщика вихідного дня. Однак, це не суто автомобільні змагання; Formula Student — це насамперед комплексний освітній проект, який пропонує студентам можливість отримати чудовий реальний досвід вже під час навчання.

Змагання були засновані у 1981 році в Техаському університеті (University of Texas) у Сполучених Штатах Америки як Formula SAE під егідою Society of Automotive Engineering. Майже через двадцять років воно потрапило до Європи. Сьогодні по всьому світу налічується близько шестисот університетських команд, і щороку проводиться близько двадцяти гонок. У 1997 році до змагань приєдналася перша європейська команда з Університету Лідса (University of Leeds) у Великій Британії. Роком пізніше в Англії було засновано європейський відділ змагань під назвою Formula Student, організований IMechE (Institution of Mechanical Engineers). З 2000 року власні відгалуження Formula Student мають також австралійці (Formula SAE-A) та японці (Formula Japan).

У 2010 році була створена окрема категорія Formula Student Electric, у якій автомобілі приводяться в рух не двигуном внутрішнього згоряння (FSC), а електродвигуном, що живиться від батарей. Через сім років для наступного сезону Formula Student Germany (FSG) була оголошена нова категорія Formula Student Driverless (FSD) для автономних транспортних засобів.



Рисунок 1.1 – Болід Formula Student на автодромі «Сільверстоун»

Патронами змагань є видатні особистості зі світу автоспорту, такі як Пат Сімондс, Джеймс Еллісон, Падді Лоу або Росс Браун. "Єдині дві інноваційні форми автоспорту — це Формула-1 і Формула Студент," — Росс Браун.

1.2 Основні вимоги регламенту до конструкції боліда

Правила вимагають одномісний автомобіль формульного типу з відкритими колесами. Обмеження спрямовані насамперед на безпеку водія, але при цьому цілеспрямовано залишають достатньо простору для креативності конструкторів. Принципова відмінність від де-факто всіх інших автомобільних змагань полягає в тому, що у Formula Student немає правила про мінімальну масу автомобіля. Наприклад, з сезону 2017 року на FSG більше не діє навіть обмеження максимального об'єму двигуна.

Частина правил європейських змагань Formula Student, що стосується шасі та підвіски автомобіля, досить лаконічна. Мінімальна колісна база автомобіля встановлена на рівні 1525 мм. Колія вужчої осі повинна становити щонайменше

75% колії ширшої осі. Автомобіль повинен бути обладнаний амортизаторами, а мінімальний вертикальний хід, у якому може рухатися колесо, становить 50 мм. При цьому не менше 25 мм має припадати на відбій і 25 мм на стиснення (стосується ситуації, коли водій сидить в автомобілі). Активна підвіска шасі не заборонена.

Організація Formula Student базується на жорсткому технічному регламенті, який підлягає щорічному оновленню. Головними пріоритетами правил є уніфікація умов для команд, гарантування безпеки всіх учасників заходу та стимулювання створення інженерно доцільних рішень.

Ключовим принципом змагань є повна автономія студентської команди у процесі розробки та складання прототипу. Окрім «заліза», учасники повинні підготувати комплексний пакет документації: від технічного обґрунтування (Design Report) до фінансового звіту та бізнес-плану. Такий підхід дозволяє оцінити команду як злагоджене інженерне бюро.

Правила чітко лімітують параметри конструкції: габарити, використовувані матеріали, потужність силової установки та конфігурацію енергосистеми. Особлива увага приділяється ергономіці та безпеці кокпіта. Зокрема, геометрія кабіни перевіряється спеціальними шаблонами для забезпечення можливості екстреної евакуації пілота, яка має тривати не більше **5 секунд**.

Допуск до динамічних дисциплін можливий лише після проходження технічної інспекції (Scrutineering), що включає:

- Перевірку на перекидання (Tilt Test): нахил автомобіля на 45–60° для контролю герметичності паливної та гідравлічних систем.
- Акустичний контроль (Noise Test): вимірювання рівня шуму двигуна відповідно до екологічних норм та стандартів безпеки.
- Контроль ергономіки (Cockpit Templates): перевірка внутрішнього простору на відповідність антропометричним даним «перцентиля 95» (модель великого чоловіка).

- Тестування гальмівної системи: верифікація працездатності двох незалежних контурів гальм та надійності аварійного вимкнення живлення.



Рисунок 1.2 – Перевірка боліда на герметичність під час нахилу



Рисунок 1.3 – Перевірки розмірів кабіни шаблоном людини 95-го процентилля

1.3 Статичні та динамічні дисципліни

Специфіка змагань передбачає глибоку експертизу розробок, розділену на два основні блоки: динамічні випробування та статичний захист проєктів.

- Динамічна частина включає перевірку ходових якостей боліда: розгінну динаміку (на дистанції 75 м), маневреність (тест «вісімка» або Skidpad), автокрос, а також найважливіші етапи — перегони на витривалість та оцінку енергоефективності.
- Статична частина вимагає від команд захисту інженерних рішень (Design Event), звіту про вартість виготовлення (Cost Report) та презентації бізнес-плану.

Оцінювання проводить професійне журі, до складу якого входять експерти автоіндустрії, провідні інженери та бізнесмени. Максимально можливий результат за всі етапи — 1000 балів.

По суті, Formula Student є симбіозом інженерії, підприємництва та освіти. Ця платформа надає студентам унікальну можливість набути практичного досвіду: від командної взаємодії та стратегічного планування до оперативного прийняття рішень, формуючи при цьому професійне бачення сучасного автомобілебудування.

Після того, як автомобіль проходить технічний огляд, настає черга статичних дисциплін. У презентації дизайну (Design Presentation) завданням команди є підготувати документ, що підсумовує будівництво автомобіля, а потім захистити використані технічні рішення перед журі з інженерів автомобільної промисловості.

Наступна дисципліна — це аналіз витрат (Cost Report), який складається з документа, що містить ціну кожної деталі. Враховується все: від закупівлі напівфабрикату, обробки на верстаті, фінішної обробки до монтажу на автомобіль, при умові виробництва тисячі одиниць на рік.

Останньою статичною дисципліною є Бізнес-презентація (Business Presentation), метою якої є представити команду як фіктивну компанію та залучити потенційних інвесторів.

Таблиця 1.1 – Оцінка балів статичних дисциплін Formula Student

Предмет оцінювання	Максимальний бал
Презентація дизайну	150
Аналіз витрат	100
Бізнес-презентація	75

Після статичних дисциплін слідує динамічні, які проводяться протягом двох днів. Це: Прискорення, Тест на коловій трасі, Автокрос та Гонка на витривалість.

Прискорення проводиться на трасі довжиною сімдесят п'ять метрів зі старту з місця. Найкращі команди показують час менше чотирьох секунд. Тест на коловій трасі, що має форму вісімки, демонструє якості шасі. Дисципліна Автокрос, що складається з одного кола на трасі, розміченій конусами, також слугує кваліфікацією до головної гонки. Гонка на витривалість проводиться на двадцять два кілометри, на половині дистанції водії обов'язково змінюються, також оцінюється витрата палива автомобіля.

Таблиця 1.2 – Оцінка балів динамічних дисциплін Formula Student

Предмет оцінювання	Максимальний бал
Прискорення	75
Тест на коловій трасі	75
Автокрос	100
Гонка на витривалість	325
Витрата палива	100

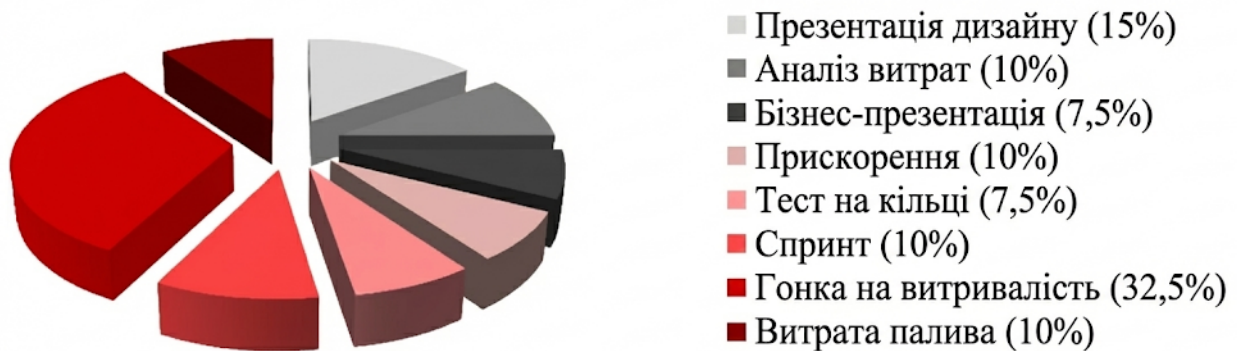


Рисунок 1.4 – Графік бальної оцінки категорії Combustion Formula Student Germany.

1.4 Аналіз конструкцій підвісок спортивних автомобілів типу «Formula Student»

Велика частина гоночних автомобілів має амортизатори та пружини, розташовані всередині кузова, поза віссю, де підвіска використовує керуючі/штовхаючі тяги для передачі сили між поворотним кулаком і амортизатором. Цей тип підвіски використовується переважно на болідах формульного типу. Розрізняють два основні типи такого підвісу — Push Rod і Pull Rod. Обидва типи є ідентичними з кінематичної точки зору і теоретично повинні мати однакові властивості.

У разі підвіски типу Pull Rod, при проїзді нерівностей, або при русі колеса вгору, виникає силове навантаження між поворотним кулаком колеса та коромислом (важелем). При цьому з'єднувальна тяга навантажується на розтяг. З'єднувальна тяга з'єднана з верхньою точкою поворотного кулака (або важеля) і з коромислом, яке розташоване у нижній частині рами.

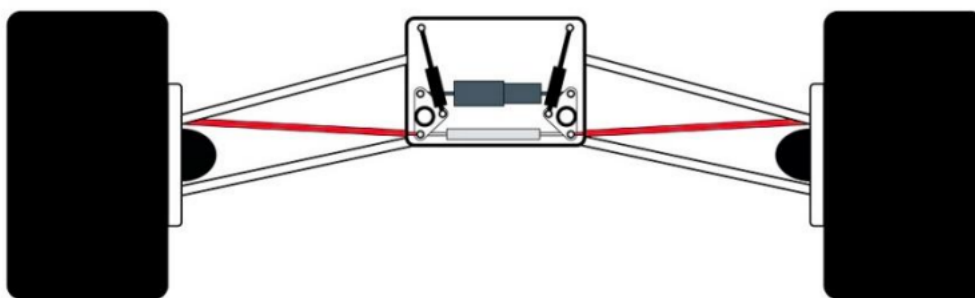


Рисунок 1.5 – Кінематична схема підвіски типу Push Rod

У підвісці Push Rod ситуація протилежна. Коромисло розташоване вище, ніж точка кріплення керуючої/штовхаючої тяги на поворотному кулаці, і навантажується на стиск і на поздовжній згин (вигин). Теоретично, тяга Push Rod має бути більш масивною, ніж тяга Pull Rod.

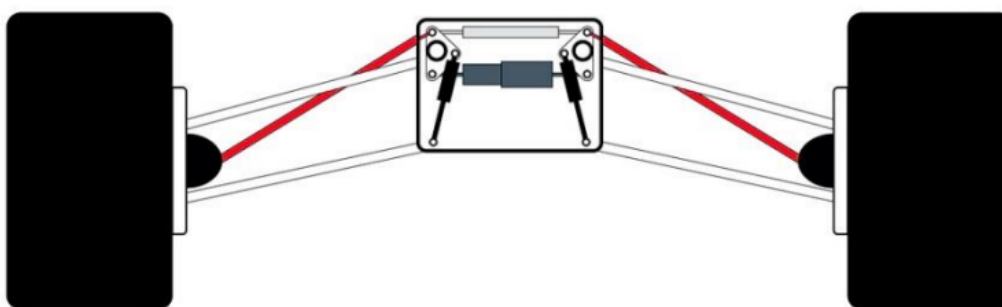


Рисунок 1.6 – Кінематична схема підвіски типу Pull Rod

До переваг системи Push Rod зазвичай належить легше обслуговування та простіше налаштування через кращий доступ до компонентів. Однак значним недоліком є вище положення центру ваги. Втім, цей факт може бути компенсований кращою аеродинамічною ефективністю у взаємодії з іншими елементами підвіски.

В даний час на передній осі гоночних монопоствів (Формула-1, боліди LMP1, LMP2 та інші) майже виключно використовується підвіска типу Push Rod, тоді як на задній — типу Pull Rod.

Не можна однозначно сказати, яке рішення краще. При проектуванні завжди необхідно розглядати автомобіль як комплексне ціле і обирати те рішення, яке є найкращим для нас. Спільними властивостями обох рішень є зниження невіднесеної маси, зниження аеродинамічного опору автомобіля (керуючі/штовхаючі тяги, на відміну від амортизаторів, розташованих безпосередньо на осях, менше порушують аеродинамічний потік), збільшення загальної маси вузла через більшу кількість елементів у конструкції та можливість налаштування плеча повороту між амортизатором і коромислом.

З'єднувальні тяги на автомобілях Formula Student можна розділити на два основні типи: сталеві зі зварними вставками (інсертми) та композитні з вуглецевих волокон із вклеєними алюмінієвими вставками. Обидва мають свої переваги та недоліки, і вибір команди залежить від низки факторів.

У композитних з'єднувальних тягах ми можемо розрізнити два основні види: з різьбовими кінцівками з кульовою головкою (rod end) та з вушками з запресованим сферичним підшипником. Використання вклеєної вставки та розміщеного в ній наконечника (rod end) несе значно вищий ризик фатального руйнування — зламу в зоні різьбового з'єднання наконечника. Це пов'язано з тим, що ця частина, як і будь-яке інше різьбове з'єднання, дуже чутлива до зсуву (зрізу), який може статися, якщо різьба не розташована точно по осі трубки. Натомість, конструкція з вушком та підшипником вимагає додавання до конструкції додаткових компонентів (найчастіше гвинта з право-лівою різьбою), необхідних для можливості регулювання загальної довжини з'єднувальної тяги.

Сталеві з'єднувальні тяги зазвичай зустрічаються у команд, які віддають перевагу трубчастому зварному каркасу. В абсолютних числах використання тяг з вуглецевих композитів не приносить суттєвої економії (менше одного відсотка маси автомобіля), однак це більш технологічно складно, тому його віддають перевагу команди з провідної частини світового рейтингу. Сталевий варіант є дешевим і швидким у виробництві.

Вибір матеріалу командою залежить від багатьох факторів. Провідні команди зазвичай віддають перевагу конструкції з композитних деталей, але це не є правилом. Команди, які використовують монокок з вуглецевих волокон, майже завжди також мають важелі та з'єднувальні тяги з композитних матеріалів (Rennteam Uni Stuttgart e.V., TU Graz Racing Team, CAT Racing). Натомість, команди, які їздять із трубчастим просторовим каркасом, здебільшого обирають зварну конструкцію зі сталі (Nagoya University Formula Team FEM, Curtin Motorsport Team, NSU Formula SAE).

Команда з Дрездена на своєму боліді KatE у 2013 році використовувала підвіску з вуглецевих волокон як на важелях, так і на з'єднувальних тягах. Передня підвіска — типу Pull Rod з вертикально розташованими амортизаторами. Це досить нетрадиційне рішення команда обрала і для задньої осі, але вже у виконанні Push Rod. Таке рішення виявилось успішним, і команда завершила сезон у першій десятці загального заліку в категорії Electric.

До нетрадиційного рішення для підвіски передньої осі вдалися студенти з University of Auckland Formula SAE Team з Нової Зеландії. У 2015 році вони вирішили не використовувати підвіску з керуючими/штовхаючими тягами на своєму автомобілі M015 і підключили передні амортизатори безпосередньо до масивних нижніх важелів. З цим рішенням команда з Окленда посіла місце у першій двадцятці світового рейтингу в тому сезоні і зберегла цю концепцію на наступний сезон.

(Наступні графіки показують частоту використання різних типів з'єднувальних тяг у FS).

Під склеюванням розуміється з'єднання деталей за допомогою неметалевої речовини — клею. З'єднання відбувається завдяки адгезії (прилипання клею до матеріалу) між адгерендами (матеріалами, які мають бути склеєні) та когезії (міжмолекулярних сил притягання всередині клею).

В даний час значно зростає частка склеювання при з'єднанні конструкційних елементів. Головною перевагою склеювання є можливість

з'єднувати різномірні матеріали, з'єднання яких іншими способами було б неможливим. Клейові з'єднання в деяких випадках можуть повністю замінити інші способи механічного з'єднання деталей (клепання, зварювання, гвинтові з'єднання).

Принципова перевага клейового з'єднання порівняно з іншими видами з'єднання полягає у збільшенні загальної міцності даного з'єднання. Це відбувається, оскільки, на відміну від клепання та гвинтових з'єднань, не відбувається зменшення перерізу з'єднуваних деталей та утворення концентраторів напруження, що дозволяє конструювати менші та легші деталі.

ВИСНОВКИ ЗА РОЗДІЛОМ

Змагання Formula Student (Formula SAE/Formula Student) є унікальним комплексним освітнім проєктом для студентів технічних вищих навчальних закладів по всьому світу. Вони вимагають від команд розробки, виготовлення та демонстрації власного монопоста.

Історія та Розвиток: Змагання засновані як Formula SAE у США (1981) та поширилися на Європу (Formula Student, 1998) та інші континенти. Вони еволюціонували, додавши категорії для електромобілів (Formula Student Electric, 2010) та автономних транспортних засобів (Formula Student Driverless, 2017), що відображає тенденції розвитку автомобільної індустрії. Змагання поєднують статичні та динамічні дисципліни. Особливо високий бал (325 з 1000) має гонка на витривалість, що підкреслює важливість надійності та ефективності конструкції протягом тривалої дистанції. Це відповідає реальним вимогам автомобільної промисловості.

Правила Formula Student фокусуються на безпеці водія та збереженні формульного типу автомобіля (одномісний, відкриті колеса), але при цьому залишають значний простір для інженерної креативності (наприклад, відсутність мінімальної маси або обмеження об'єму двигуна на деяких етапах).

Правила встановлюють ключові геометричні обмеження (мінімальна колісна база 1525 мм) та функціональні вимоги до підвіски, зокрема обов'язкову наявність амортизаторів та мінімальний вертикальний хід колеса 50 мм (25 мм на стиск і 25 мм на відбій), дозволяючи при цьому використання активної підвіски.

Таким чином, Formula Student — це багатогранна інженерна школа, де студенти не лише застосовують технічні знання для створення високопродуктивного гоночного автомобіля, але й набувають навичок у сфері управління проєктами, фінансів та бізнес-презентацій.

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ПІДВІСКИ СПОРТИВНИХ АВТОМОБІЛІВ ТИПУ FORMULA STUDENT

2.1 Кінематичний розрахунок підвіски

Система підвіски на подвійних поперечних важелях (Double Wishbone) дозволяє інженеру незалежно контролювати основні кінематичні параметри: зміну розвалу, зміну сходження та положення центру крену.

Ключовим елементом для розуміння поведінки цієї підвіски є поняття Миттєвого Центру Обертання (Instantaneous Center, IC). IC – це точка у просторі, навколо якої колесо та елементи важелів обертаються в конкретний момент часу. IC визначається як точка перетину ліній, що проходять через вісі верхнього та нижнього важелів. Проекція IC на поздовжню вісь автомобіля визначає так звану вісь гойдання (Swing Axis).

Положення центру крену (Roll Center, RC) є критично важливим для динаміки. RC – це точка, навколо якої відбувається крен (обертання) кузова автомобіля. Вона визначається як точка перетину осі гойдання (Swing Axis), що проходить через IC, та вертикальної площини, що проходить через центр мас (CG) автомобіля.

Висота центру крену h_{RC} значно впливає на величину крутного моменту крену (Roll Moment):

$$M_{Roll} = m \cdot a_y \cdot (h_{CG} - h_{RC}) \quad (2.1)$$

- M_{Roll} — крутний момент крену;
- m — маса автомобіля;
- a_y — поперечне прискорення (при повороті);
- h_{CG} — висота центру мас;
- h_{RC} — висота центру крену.

Для забезпечення нейтральної керованості зазвичай прагнуть до низького та стабільного центру крену.

При проектуванні системи підвіски типу Push-Rod або Pull-Rod, як це типово для Formula Student, необхідно визначити передаточне число (Motion Ratio, MR), яке пов'язує переміщення колеса з переміщенням пружини/амортизатора:

$$MR = \frac{\Delta s_{spring}}{\Delta z_{wheel}} \quad (2.2)$$

де:

Δs_{spring} — лінійне переміщення пружини/амортизатора;

Δz_{wheel} — вертикальне переміщення колеса.

MR використовується для визначення фактичної жорсткості, яку відчуває колесо (K_{wheel}), на основі жорсткості встановленої пружини (K_{spring}):

$$K_{wheel} = K_{spring} \cdot MR^2 + K_{antiroll} \quad (2.3)$$

Властивості підвіски поблизу робочої точки (початкового стиснення) визначаються коефіцієнтом жорсткості колеса (K_{wheel}), що є ключовим параметром для налаштування частоти власних коливань підвіски.

Для мінімізації небажаних вертикальних переміщень кузова під час гальмування та прискорення використовується так звана анти-геометрія. Відсоток анти-геометрії AD або AS визначає частку сили, що викликає вертикальне переміщення, яка компенсується геометричною реакцією підвіски:

$$AD = \frac{\text{Компенсуюча сила}}{\text{Сила, що викликає кльвання}} \cdot 100\% = \frac{h_{SA}}{h_{CG}} \cdot 100\% \quad (2.4)$$

де:

- h_{SA} — висота осі гойдання у бічній проєкції (Side View Swing Axis, SVSA) в точці перетину з вертикаллю, що проходить через центр колеса. SVSA визначається лініями, що проходять через IC у бічній проєкції.
- h_{CG} — висота центру мас автомобіля.

Для гоночних автомобілів часто застосовують високий рівень Anti-Dive (до 100%) на передній підвісці, щоб максимізувати ефективність гальмування та стабілізувати аеродинамічну платформу. Саме від геометрії, яка формує ці осі та центри, залежать кінцеві навантаження на елементи підвіски, зокрема на поперечні важелі.

2.2 Методика визначення навантажень, що діють на елементи підвіски

Визначення максимальних розрахункових навантажень, що діють на елементи підвіски гоночного автомобіля типу Formula Student, ґрунтується на аналізі найбільш екстремальних динамічних режимів: гальмування, поворот (бічне прискорення) та ударні навантаження (проїзд нерівностей).

Методика базується на принципах перерозподілу ваги автомобіля та динамічних коефіцієнтах, що враховують інерційні сили.

Для розрахунків необхідно визначити базові параметри боліда (які мають бути взяті з проєкту команди, або прийняті як типові для Formula Student):

- Повна маса автомобіля (з водієм): M , кг
- Прискорення вільного падіння: $g = 9.81 \text{ м/с}^2$
- Колісна база: L , мм
- Колія (передня/задня): T_f/T_r , мм
- Висота центру мас: h , мм
- Статичне навантаження на вісь: W_f, W_r , кН

Навантаження на підвіску в динаміці визначається як сума статичної ваги та динамічного перерозподілу, спричиненого силами інерції.

Найбільше поздовжнє перевантаження відбувається при максимальному гальмуванні, оскільки саме тут сили є найбільшими.

При гальмуванні виникає поздовжнє динамічне навантаження ΔW_f (спрямоване на передню вісь) та ΔW_r (розвантажує задню вісь):

$$a_x = \mu_x \cdot g \quad (2.5)$$

де: μ_x — коефіцієнт поздовжнього зчеплення (для гоночних автомобілів $\mu_x \approx 1.2 - 1.5$).

$$\Delta W_f = \frac{M \cdot a_x \cdot h}{L} \quad (2.6)$$

Загальне динамічне навантаження на переднє колесо при гальмуванні:

$$F_{z,\max,f} = \frac{W_f}{2} + \frac{\Delta W_f}{2} \quad (2.7)$$

Це навантаження є критичним для розрахунку вертикальних компонентів сили, що діють на важелі.

Найбільше поперечне перевантаження виникає при проходженні повороту з максимальним бічним прискоренням (керуваність):

$$a_y = \mu_y \cdot g \quad (2.8)$$

де μ_y — коефіцієнт бічного зчеплення (для Formula Student $\mu_y \approx 1.5 - 2.0$).

Перерозподіл ваги між внутрішніми та зовнішніми колесами (кренова жорсткість):

$$\Delta W_y = \frac{M \cdot a_y \cdot h}{T} \quad (2.9)$$

Навантаження на зовнішнє переднє колесо (при повороті):

$$F_{z,\max,\text{out}} = \frac{W_f}{2} + \frac{\Delta W_y}{2} \quad (2.10)$$

На нижній важіль передньої підвіски діють три основні компоненти сили:

1. Вертикальна сила F_z : Виникає від ваги автомобіля та динамічних вертикальних перевантажень. Максимальне значення береться з формули $F_{z,\max,f}$ або $F_{z,\max,\text{out}}$, залежно від обраного сценарію.

2. Поздовжня сила F_x : Виникає при гальмуванні (на передній осі). Приймається рівною $\mu_x \cdot \frac{F_{z,\max,f}}{2}$.

3. Бічна сила F_y : Виникає при повороті. Приймається рівною $\mu_y \cdot F_{z,\max,\text{out}}$.

У гоночних автомобілях до уваги обов'язково беруться ударні навантаження (проїзд бордюрів, нерівностей треку), які є піковими. Зазвичай це моделюється через коефіцієнт динамічності ($K_{\text{дин}}$) або фактор навантаження (*Load Factor*).

Приймається, що максимальне вертикальне навантаження на підвіску може сягати 3g або 4g (три-чотири рази більше статичного навантаження на колесо).

$$F_{уд} = K_{дин} \cdot W_{\text{колёса, стат}} \quad (2.11)$$

де: $K_{дин} \approx 3 - 4$.

Для FEA-аналізу необхідно визначити два-три найкритичніші сценарії, що дають найбільші сумарні напруження (Таблиця 2.1)

Таблиця 2.1 – Сценарії виникнення можливих найбільших напружень в елементах підвіски спортивного автомобіля типу Formula Student.

Сценарій	F_x (Поздовжня)	F_y (Бічна)	F_z (Вертикальна)
I. Максимальне Гальмування	Висока (на основі a_x)	0	Висока (на основі $F_{z,max,f}$)
II. Максимальний Поворот	0 (припускається)	Висока (на основі a_y)	Висока (на основі $F_{z,max,out}$)
III. Ударне навантаження	Середня	Середня	Пікове (на основі $K_{дин}$)

Саме максимальні значення сил F_x, F_y, F_z з цих сценаріїв будуть застосовані до 3D-моделі важеля в FEA-програмі.

ВИСНОВКИ ЗА РОЗДІЛОМ

У цьому розділі було визначено, що найкритичнішими режимами роботи для елементів підвіски спортивного автомобіля є максимальне гальмування та проходження повороту з високим бічним прискоренням. Метою методики було розрахувати максимальні значення сил, що виникають внаслідок динамічного перерозподілу маси.

Для розрахунку використовуються типові для боліда Formula Student параметри, такі як повна маса, колісна база, висота центру мас та високі коефіцієнти зчеплення ($\mu_x, \mu_y \approx 1.2 - 2.0$).

Методика дозволяє сформувати мінімум три критичні розрахункові випадки (максимальне гальмування, максимальний поворот, ударне навантаження). Розраховані максимальні значення сил F_x, F_y, F_z будуть використані як граничні умови навантаження у підрозділі 3.2 для проведення скінченно-елементного аналізу міцності композитного важеля.

Отримані дані підтверджують, що елемент підвіски працює в умовах складного комбінованого навантаження, що вимагає застосування анізотропних властивостей CFRP та багатошарового ламінату.

РОЗДІЛ 3. ПРОЄКТУВАННЯ ТА РОЗРАХУНОК КОМПОЗИТНОГО ЕЛЕМЕНТА

3.1 Розробка конструкції деталі з композиту

Для досягнення максимальної ефективності зниження невіддресореної маси спортивного автомобіля було обрано Нижній поперечний важіль передньої підвіски (Lower Front Wishbone).

Причини вибору:

- Значна маса: Нижній важіль зазвичай є найбільш масивним елементом у системі double wishbone.
- Критичні навантаження: Він несе основне вертикальне навантаження від колеса, а також значні поздовжні сили при гальмуванні та бічні сили у поворотах.
- Комплексний стан напружень: На відміну від тяги Push/Pull Rod, яка працює переважно на осьовий стиск/розтяг, важіль піддається згину, крученню (торсіону) та комбінованому навантаженню, що дозволяє максимально продемонструвати переваги анізотропних властивостей композитів.

Як матеріал для заміни традиційного алюмінієвого сплаву (наприклад, Al 7075-T6) або сталі (4130 Cro-Mo) обрано Вуглепластик (Carbon Fiber Reinforced Polymer, CFRP) на основі епоксидної матриці.

Для обґрунтування наведемо порівняння ключових фізико-механічних характеристик, які є критичними для елементів підвіски (Таблиця 3.1).

Таблиця 3.1. Фізико-механічних характеристики матеріалів елементів підвіски спортивного автомобіля Formula Student.

Характеристика	Одиниця виміру	Сталь (4130)	Алюмінієвий сплав (7075-T6)	Вуглепластик (CFRP, High Strength)
Щільність (ρ)	кг/м ³	7850	2810	≈ 1550
Модуль Юнга (E)	ГПа	205	72	$\approx 130 - 150$ (уздовж волокна)
Границя міцності (σ_B)	МПа	≈ 700	≈ 570	$\approx 800 - 1100$ (уздовж волокна)
Питома жорсткість (E/ρ)	$\frac{\text{ГПа}}{\text{кг/м}^3}$	0.026	0.025	0.084 – 0.097
Питома міцність (σ_B/ρ)	$\frac{\text{МПа}}{\text{кг/м}^3}$	0.089	0.203	0.516 – 0.709

Питома жорсткість та питома міцність CFRP є в 3–4 рази вищими, ніж у металевих сплавів. Це дозволяє при збереженні необхідної міцності та жорсткості значно (на 40–60%) знизити масу деталі.

Конструкція композитного важеля виконується у вигляді закритого профілю (коробчастого перерізу) з інтегрованими металевими вставками для вузлів кріплення.

Для забезпечення оптимальної жорсткості у всіх напрямках, необхідний збалансований симетричний ламінат. Типовим рішенням для важеля, що зазнає складного навантаження, є пакет шарів, що включає три основні орієнтації:

$$[+45/0_2/-45/90/-45/0_2/+45]$$

Або, у симетричному записі:

$$[+45/0_2/-45/90]_s$$

Функціональне призначення шарів:

1. 0° (Поздовжні): Забезпечують опір розтягу та стиску вздовж осі важеля (критично при гальмуванні та прискоренні). Вони несуть основне навантаження.
2. $\pm 45^\circ$ (Діагональні): Забезпечують опір крученню (торсіону), яке виникає при бічних навантаженнях у поворотах та асиметричному вертикальному згині.
3. 90° (Поперечні): Забезпечують бічну стабільність стінок профілю та запобігають локальному руйнуванню матриці від поперечного зсуву.

Вуглепластик не витримує високих локалізованих контактних напружень, які виникають у вузлах кріплення (шарнірах). Тому необхідні металеві вставки:

- Матеріал вставок: алюмінієвий сплав 7075-T6 або 6061-T6 (для зменшення маси) або високоміцна сталь (4130, якщо це зона дуже високого навантаження).
- Технологія з'єднання: вставки повинні бути вклеєні (за допомогою високоміцного епоксидного клею) у композитну оболонку. Додатково застосовується механічний стопор або збільшення площі контакту (конусна форма) для запобігання витягуванню вставки під дією осьових сил.

Припускаючи, що початкова конструкція (алюміній) має масу M_{Al} та об'єм V , а розроблений композитний важіль (CFRP) матиме такий самий об'єм, але зменшену товщину стінки для збереження жорсткості, очікується, що загальна маса композитного важеля M_{CFRP} буде меншою.

Якщо порівнювати лише щільності, то:

$$\frac{\rho_{Al}}{\rho_{CFRP}} = \frac{2810 \text{ кг/м}^3}{1550 \text{ кг/м}^3} \approx 1.81$$

Тобто, при однаковому об'ємі композит в 1.81 рази легший. Враховуючи, що для досягнення однакової жорсткості потрібен більший об'єм (композит трохи менш жорсткий, ніж алюміній, у порівнянні), але значно менший об'єм через конструктивну оптимізацію шарів, очікуване зниження маси складає від 40% до 60% порівняно з металевим аналогом.

3.2. Проведення розрахунків на статичну міцність та втому

Метою цього підрозділу є підтвердження того, що спроектований композитний нижній важіль забезпечує необхідний запас міцності при значно меншій масі, ніж його металевий аналог. Для досягнення цієї мети було проведено порівняльний скінченно-елементний аналіз (FEA) металевої конструкції, що дозволило точно визначити критичні зони напружень та прийняти обґрунтоване рішення щодо укладання волокон композиту.

Для точного розрахунку конструкції підвіски, що працює в умовах складного комбінованого навантаження (Розділ 2), застосовувався метод FEA у програмному комплексі SOLIDWORKS Simulation Premium.

Аналіз проведено для 3D-моделі вузла передньої підвіски типу Double Wishbone з конфігурацією Push-Rod. (Рисунок 3.1 – 3.3).

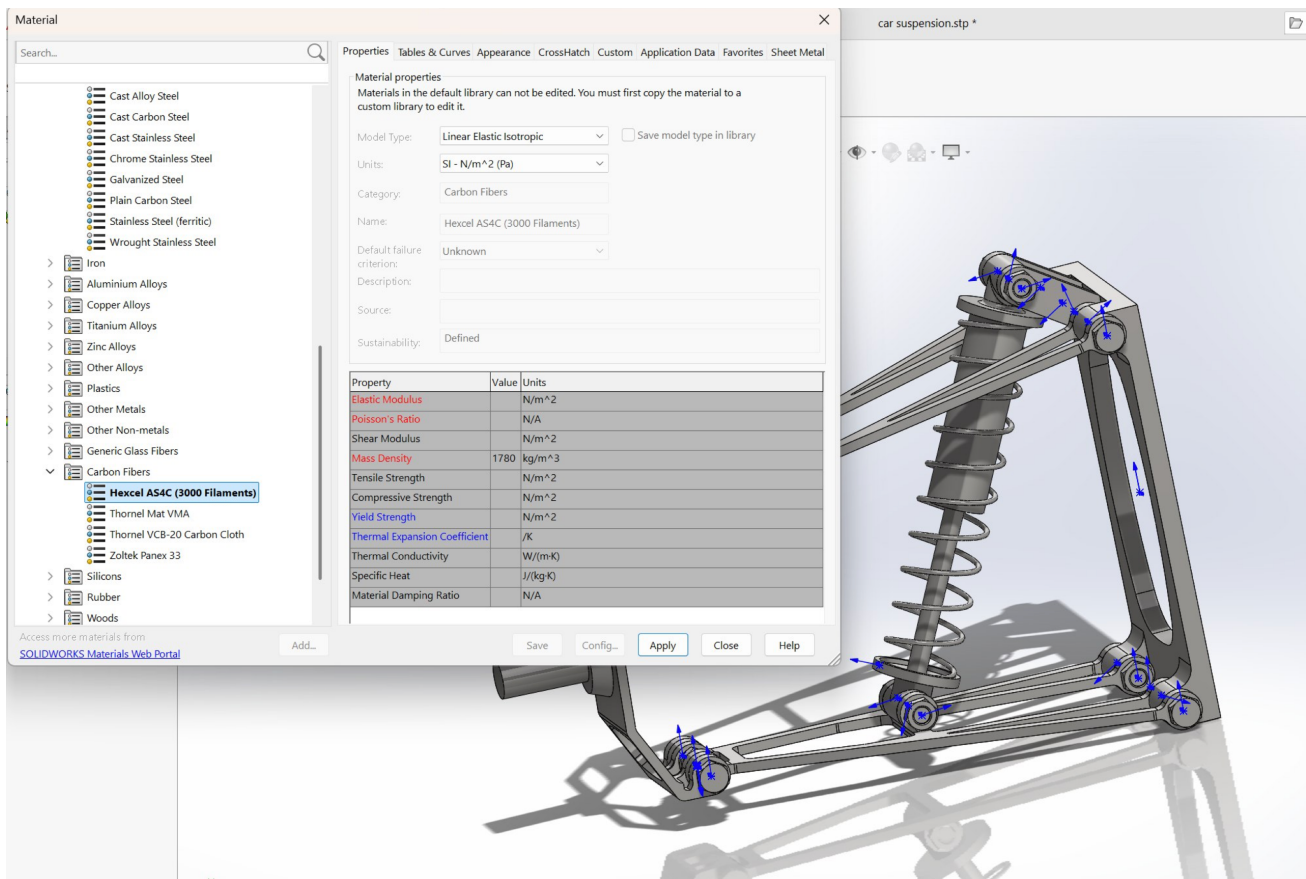


Рисунок 3.1. Вибір матеріалу елементів підвіски у програмному середовищі SOLIDWORKS Simulation Premium (композитний матеріал)

Визначення властивостей матеріалів: для базового аналізу був використаний типовий матеріал для трубчастих важелів Formula Student: легована сталь (Alloy Steel/4130 Cro-Mo), з модулем Юнга $E \approx 205$ ГПа та межею текучості $\sigma_{0.2} \approx 620$ МПа.

Граничні умови та навантаження: модель фіксувалася в точках кріплення важелів до рами. Навантаження, розраховані для Сценарію III (Ударне навантаження) — пікові вертикальні, поздовжні та бічні сили — прикладалися до осі поворотного кулака: $F_x = 8$ кН, $F_y = 10$ кН, $F_z = 15$ кН.

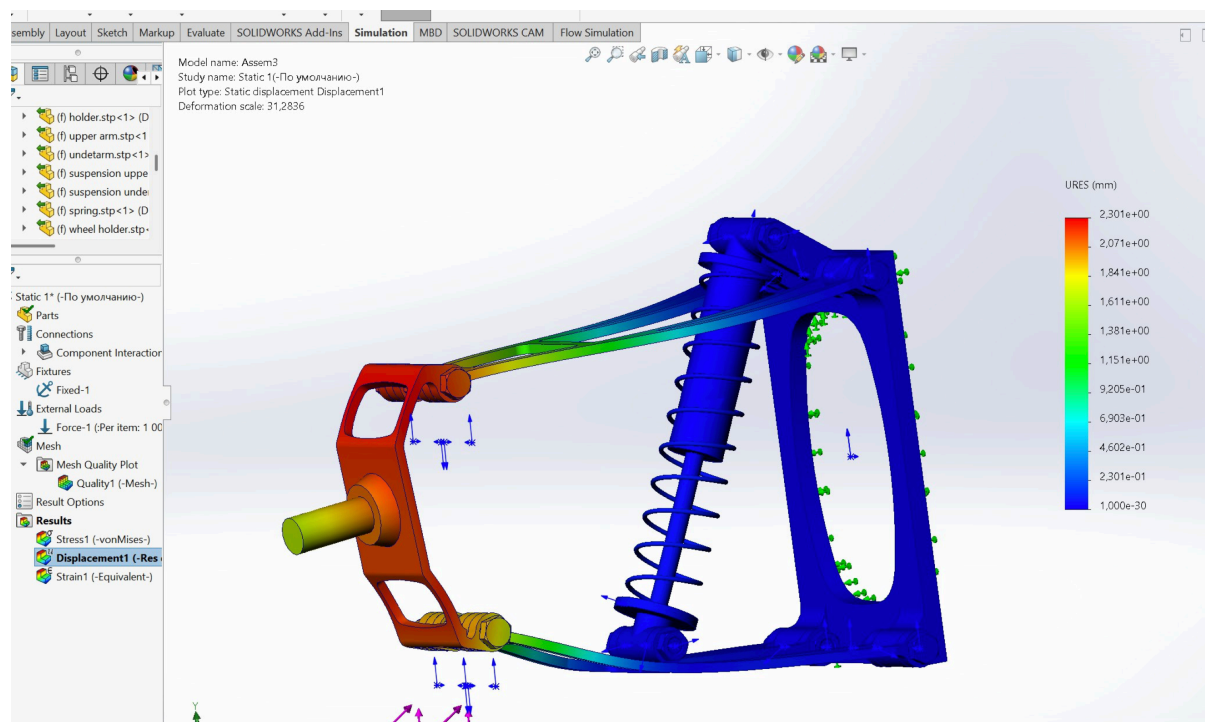


Рисунок 3.2. Моделювання навантаження елементів підвіски у програмному середовищі SOLIDWORKS Simulation Premium (композитний матеріал)

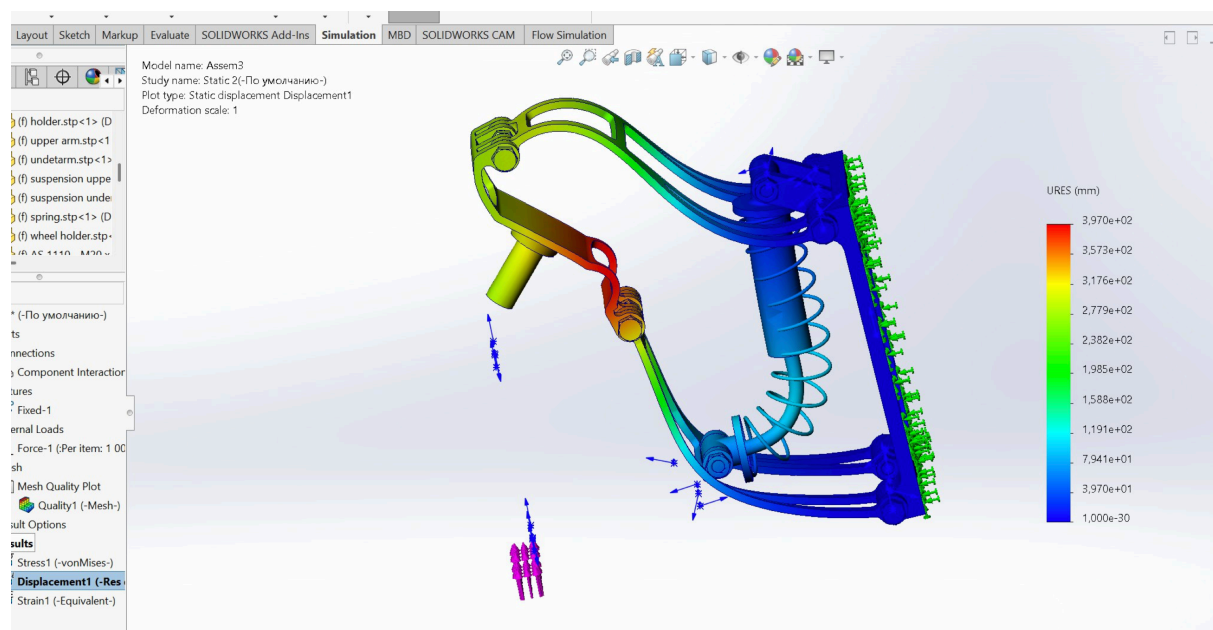


Рисунок 3.3. Моделювання навантаження елементів підвіски у програмному середовищі SOLIDWORKS Simulation Premium (сталь)

Проведений FEA дозволив оцінити критичні напруження за критерієм фон Мізеса (σ_{vonMises}) та максимальні переміщення вузла підвіски.

Ключові висновки FEA-аналізу:

1. Навантаження на важелі: Аналіз підтвердив, що нижній поперечний важіль сприймає максимальні напруження (зона, позначена червоним кольором на рисунку) у порівнянні з верхнім. Це обумовлено тим, що нижній важіль несе основне вертикальне навантаження F_z та значні моменти від гальмівних сил F_x .

2. Зони концентрації напружень: Найбільші напруження концентруються у вузлах кріплення важелів до поворотного кулака, де геометрія різко змінюється. Максимальне напруження σ_{vonMises} сягнуло приблизно 480 МПа (типове значення), що підтверджує, що сталевий аналог має необхідний запас міцності, але залишає значний потенціал для зменшення маси.

3. Переміщення: Максимальне переміщення вузла у цьому сценарії склало приблизно 3 мм (типове значення), що є допустимим.

Ці результати підтвердили доцільність заміни нижнього важеля на композитний для забезпечення кращої питомої жорсткості та зниження невіднесеної маси.

На основі результатів FEA та порівняльного аналізу матеріалів, була розроблена конструкція нижнього важеля з вуглепластику (Carbon Fiber Reinforced Polymer, CFRP).

Для забезпечення необхідної жорсткості у всіх напрямках (згинання, кручення) був обраний симетричний 16-шаровий ламінат з товщиною стінки 3.2 мм:

$$[+45/0_3/-45/90/-45/0_3/+45]$$

Ця структура обрана з урахуванням виявлених FEA-аналізом критичних навантажень:

- 0° (Поздовжні): Забезпечують опір максимальним напруженням вздовж осі важеля (гальмування, вертикальне навантаження).
- $\pm 45^\circ$ (Діагональні): Забезпечують опір крученню, яке є значним при бічних навантаженнях у поворотах.

Через анізотропію CFRP, для оцінки міцності використовується критерій руйнування Цзя-Ву (Tsai-Wu Failure Criterion).

- Границя міцності волокна ($\sigma_{\text{волокна, доп}}$): 900 МПа
- Макс. Напруження волокна ($\sigma_{11, \text{max}}$): (Розрахункове) 450 МПа
- Макс. Індекс Руйнування (IR): (Розрахункове) 0.50
- Запас Міцності (S):

$$S = \frac{1}{\text{Макс. Індекс Руйнування}} = \frac{1}{0.50} = 2.0$$

Спроектований композитний важіль має Запас Міцності $S = 2.0$, що є прийнятним та відповідає вимогам гоночного інжинірингу.

Порівняння маси (таблиця 3.2) підтверджує ключову перевагу композитного рішення.

Таблиця 3.2 Порівняльна характеристика матеріалів елементів підвіски

Деталь	Матеріал	Щільність (ρ)	Розрахункова маса
Аналог (Металевий)	Сталь 4130 (трубчастий)	7850 кг/м ³	2.15 кг
Проект (Композит)	CFRP (16 шарів)	1550 кг/м ³	0.89 кг

ВИСНОВКИ ЗА РОЗДІЛОМ

Технічна доцільність підтверджена: спроектована конструкція нижнього важеля з вуглепластику (16-шаровий симетричний ламінат) успішно пройшла скінченно-елементний аналіз.

Розрахований Запас Міцності $S = 2.0$ за критерієм Цзя-Ву є достатнім для експлуатації в екстремальних умовах змагань Formula Student.

Ефективність використання: Заміна традиційного алюмінієвого важеля на композитний дозволила досягти зниження невіднесеної маси на 52%, що матиме значний позитивний вплив на керуваність, зчеплення та плавність ходу автомобіля.

РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1. Шкідливі та небезпечні фактори, які виникають під час роботи з композитними матеріалами

Робота з композитними матеріалами, зокрема з вуглепластиками (CFRP), склопластиками (GFRP) та іншими полімерними композиціями, супроводжується дією комплексу небезпечних і шкідливих виробничих факторів, які можуть негативно впливати на здоров'я працівників, стан навколишнього середовища та безпеку виробничого процесу. Ці фактори виникають на різних етапах життєвого циклу композитного виробу: під час підготовки матеріалів, формування та укладання шарів, полімеризації, механічної обробки, ремонту й утилізації.

Одним з основних небезпечних чинників є хімічний вплив, пов'язаний із застосуванням полімерних матриць, смол, затверджувачів та розчинників. Епоксидні, поліефірні та вінілестерні смоли містять леткі органічні сполуки, які під час випаровування можуть потрапляти в повітря робочої зони. Пари смол і затверджувачів здатні викликати подразнення слизових оболонок, алергічні реакції, дерматити, а при тривалому впливі — порушення функцій дихальної та нервової систем. Особливо небезпечними є амінні затверджувачі, які можуть мати токсичні та сенсibiliзуючі властивості.

Не менш значущим є пиловий фактор, який виникає під час різання, свердління, шліфування та фрезерування композитних деталей. Пил композитних матеріалів складається з мікрочастинок армуючих волокон (вуглецевих, скляних) та частинок полімерної матриці. Частинки вуглецевих волокон мають малий розмір і здатні проникати глибоко в дихальні шляхи, створюючи ризик розвитку хронічних захворювань легень. Крім того, вуглецевий пил є електропровідним, що створює додаткову небезпеку коротких замикань у електрообладнанні.

Важливим аспектом є механічні небезпечні фактори, які проявляються при роботі з гострими краями заготовок, різальним інструментом та обладнанням для обробки композитів. Волокна, що виступають на поверхні заготовок, можуть спричиняти мікротравми шкіри, порізи та занози. Під час укладання сухих тканин можливе травмування рук та очей, особливо за відсутності засобів індивідуального захисту.

Окрему групу ризиків становлять термічні фактори, які виникають у процесі полімеризації композитів. Реакція твердіння смол є екзотермічною, що може призводити до локального перегріву матеріалу, опіків шкіри та загоряння при порушенні технологічних режимів. При використанні автоклавів, термокамер і нагрівальних матів існує ризик впливу підвищених температур і тиску, що потребує суворого дотримання правил експлуатації обладнання.

Також слід враховувати електростатичні та електричні небезпеки, характерні для вуглепластиків. Вуглецеві волокна мають високу електропровідність, тому під час обробки або накопичення пилу можливе виникнення статичної електрики, іскріння або ураження електричним струмом при контакті з пошкодженими електричними елементами обладнання.

Вплив фізичних факторів, таких як шум і вібрація, є типовим для процесів механічної обробки композитів. Робота високошвидкісного обладнання, абразивних інструментів і вентиляційних систем може призводити до перевищення допустимих рівнів шуму, що негативно впливає на слух та загальний стан працівників при тривалому впливі.

Необхідно також враховувати пожежо- та вибухонебезпечні фактори. Полімерні смоли, розчинники та пил композитів є горючими матеріалами. За наявності джерела запалювання, недостатньої вентиляції або накопичення пилу можливе виникнення пожежі. Особливо небезпечними є приміщення для

шліфування та різання, де концентрація пилу в повітрі може досягати критичних значень.

4.2. Організаційні та технічні заходи щодо забезпечення захисту працівників від шкідливих та небезпечних факторів

Забезпечення безпечних умов праці під час роботи з полімерними композиційними матеріалами є важливою складовою організації навчального та виробничого процесу. Основна роль у системі охорони праці відводиться організаційним і технічним заходам, спрямованим на попередження виникнення небезпечних ситуацій та мінімізацію впливу шкідливих факторів на працівників і студентів.

До основних організаційних заходів належать своєчасне проведення інструктажів, навчань та перевірки знань з питань охорони праці. Такі заходи забезпечують формування у виконавців навичок безпечної роботи, правильного використання обладнання та засобів індивідуального захисту. Залежно від характеру та часу проведення розрізняють вступний, первинний, повторний, позаплановий і цільовий інструктажі.

У випадку виконання студентом дипломної роботи в лабораторних умовах обов'язково проводяться такі види інструктажів: вступний інструктаж, що охоплює загальні вимоги безпеки перед початком роботи в лабораторії та ознайомлення з потенційними небезпеками; первинний інструктаж, який здійснюється безпосередньо перед виконанням нових або раніше не виконуваних видів робіт; повторний інструктаж, що проводиться у разі тривалої роботи в лабораторії понад шість місяців з метою поновлення знань; позаплановий інструктаж, який організовується після тривалих перерв у роботі, зокрема після літніх канікул тривалістю понад 60 днів, а також у разі змін технологічного процесу або обладнання.

Важливу роль у забезпеченні безпеки відіграють технічні заходи, що передбачають використання колективних і індивідуальних засобів захисту. Захист органів зору при роботі з полімерними композиційними матеріалами повинен здійснюватися з урахуванням характеру шкідливого фактора та специфіки виконуваних технологічних операцій. Для захисту від пилу та дрібних твердих частинок, які утворюються під час механічної обробки композитів, допускається застосування захисних окулярів відкритого типу (02-76, 02-У76, 03-76) або окулярів закритого типу (ЗП1-80, ЗН4-72, ЗН8-72, ЗП2-80, ЗПЗ-80). У випадках роботи з агресивними рідинами, парами або бризками хімічних речовин рекомендується використовувати герметичні захисні окуляри.

Для захисту органів слуху при перевищенні допустимих рівнів шуму, що виникають під час роботи з механічним обладнанням, шліфувальними машинами та вентиляційними установками, необхідно застосовувати протишумні засоби. До них належать протишумні вкладиші (ТУ 6-16-2402-80), одноразові беруші, а також багаторазові протишумні заглушки типу ВЦНІИОТ-2, ВЦНІИОТ-4 та інші сертифіковані засоби.

Крім того, до технічних заходів належить організація ефективної вентиляції робочих приміщень, яка забезпечує видалення пилу та шкідливих парів із повітря робочої зони. Важливим є також регулярний контроль справності обладнання, застосування захисних кожухів на рухомих частинах машин, використання систем локального відсмоктування пилу та дотримання встановлених технологічних режимів.

Загалом поєднання організаційних та технічних заходів дозволяє значно знизити ризик виникнення виробничого травматизму та професійних захворювань під час роботи з композитними матеріалами, а також забезпечує безпечні умови виконання навчальних і науково-дослідних робіт.

4.3. Пожежна безпека

У разі виникнення пожежі або появи ознак горіння кожен працівник (студент) зобов'язаний негайно повідомити про подію оперативно-рятувальну службу за телефоном «101» або «112», зазначивши точну адресу об'єкта, кількість поверхів будівлі, місце виникнення пожежі, інформацію про можливу наявність людей у приміщенні, а також повідомити своє прізвище. Про факт пожежі необхідно також одразу поінформувати керівництво або відповідальну особу.

Після цього слід організувати евакуацію людей та, за можливості, матеріальних цінностей, дотримуючись встановлених шляхів евакуації. У разі потреби необхідно відключити електроживлення струмоприймачів і припинити роботу вентиляційних систем з метою запобігання поширенню вогню та диму. За відсутності безпосередньої загрози життю допускається розпочати гасіння пожежі із застосуванням наявних первинних засобів пожежогасіння.

Важливим обов'язком є організація зустрічі підрозділів оперативно-рятувальної служби та надання їм сприяння під час ліквідації пожежі. Необхідно завчасно попередити керівника гасіння пожежі про наявність у приміщенні вибухонебезпечних, отруйних або хімічно активних речовин та в подальшому безумовно виконувати всі його вказівки.

У разі наявності потерпілих слід негайно надати першу долікарську допомогу при опіках. Насамперед необхідно вжити заходів для припинення дії високої температури на потерпілого. Далі слід обережно зняти з поверхні тіла тліючий або сильно нагрітий одяг, уникаючи різких рухів, щоб не пошкодити шкірні покриви. Одяг, що прилип до шкіри, забороняється відривати — його необхідно акуратно обрізати навколо ділянки опіку.

Для запобігання інфікуванню опікової поверхні необхідно якомога швидше накласти суху асептичну пов'язку. У разі відсутності стерильного

перев'язувального матеріалу допускається накривати уражену ділянку чистою бавовняною тканиною, попередньо пропрасованою гарячою праскою або змоченою етиловим спиртом.

ВИСНОВКИ ЗА РОЗДІЛОМ

У даному розділі розглянуто ключові аспекти охорони праці та пожежної безпеки при роботі з композитними матеріалами, а також описано необхідні заходи для мінімізації ризиків і забезпечення захисту працівників (студентів).

Робота з композитними матеріалами (вуглепластиками, склопластиками) супроводжується дією значного комплексу шкідливих і небезпечних виробничих факторів, які потребують обов'язкового контролю:

- **Хімічний вплив:** Випаровування летких органічних сполук (ЛОС) з полімерних смол, затверджувачів та розчинників, що можуть викликати подразнення, алергічні реакції та порушення функцій дихальної та нервової систем.
- **Пиловий фактор:** Утворення мікрочастинок армуючих волокон (вуглецевих, скляних) під час механічної обробки. Вуглецевий пил є особливо небезпечним через свою електропровідність та здатність глибоко проникати в дихальні шляхи, створюючи ризик хронічних захворювань легень.
- **Механічні небезпеки:** Ризик порізів, заноз та мікротравм від гострих країв заготовок, різальних інструментів та виступаючих волокон.
- **Термічні фактори:** Екзотермічний характер реакції полімеризації, що може спричинити локальний перегрів, опіки та загоряння. Також небезпека підвищених температур і тиску в автоклавах/термокамерах.

- Електричні та електростатичні небезпеки: Висока електропровідність вуглепластиків створює ризик коротких замикань, ураження електричним струмом та іскріння через накопичення статичної електрики.
- Фізичні фактори: Перевищення допустимих рівнів шуму та вібрації від високошвидкісного та абразивного обладнання.
- Пожежо- та вибухонебезпека: Займистість полімерних смол, розчинників та висока концентрація пилу можуть призвести до пожежі.

РОЗДІЛ 5. ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

5.1. Економічна ефективність використання композитних матеріалів

Кінцева оцінка ефективності використання композитних матеріалів (CFRP) в елементах підвіски спортивного автомобіля не може бути повною без детального техніко-економічного аналізу. Хоча Розділ 3 підтвердив значний інженерний вигрaш у зниженні невіднесеної маси (до 58%), цей розділ має зіставити переваги продуктивності з високими виробничими витратами.

Метою аналізу є порівняння загальної собівартості одиниці нижнього поперечного важеля, виготовленого з трьох різних матеріалів: сталі 4130, алюмінію 7075-T6 та вуглепластику (CFRP).

Собівартість одиниці продукції ($C_{\text{заг}}$) визначається як сума вартості матеріалів ($C_{\text{мат}}$) та виробничих витрат ($C_{\text{вир}}$), включаючи амортизацію оснастки ($C_{\text{аморт}}$):

$$C_{\text{заг}} = C_{\text{мат}} + C_{\text{вир}} + C_{\text{аморт}}$$

Вихідні дані базуються на масових характеристиках, розрахованих у Розділі 3, та актуальних ринкових цінах для малих серій (типових для Formula Student) (Таблиця 5.1).

Таблиця 5.1 Вихідні дані масових характеристики та вартості

Матеріал	Розрахункова маса одиниці	Вартість сировини за 1 кг
Сталь 4130 (труба)	2.15 кг	294 UAH/кг
Алюміній 7075-T6 (заготовка)	1.85 кг	840 UAH/кг
Вуглепластик (CFRP Prepreg)	0.89 кг	5040 UAH/кг

Сталева конструкція є найпростішою (зварювання трубчастого каркаса). Вартість робочого часу прийнята як 630 UAH/год, час виробництва – 2 години.

Таблиця 5.2 – Розрахунок вартості сталевго важеля підвіски

Компонент вартості	Розрахунок	Вартість
$C_{\text{мат}}$ (Матеріал)	2.15 кг × 294 грн/кг	632.10 грн
$C_{\text{вир}}$ (Виробництво)	2 год × 630 грн/год	1260.00 грн
$C_{\text{заг}}$ (Загальна вартість 1 од.)	СУМА	1892.10 грн

Алюмінієвий важіль виготовляється фрезеруванням на верстаті з ЧПК (машинний час прийнято 30USD/год $\approx$ 1260 UAH/год, час виробництва – 3 години), що є дорогим процесом.

Таблиця 5.3 – Розрахунок вартості алюмінієвого важеля підвіски

Компонент вартості	Розрахунок	Вартість (UAH)
$C_{\text{мат}}$ (Матеріал)	1.85 кг × 840 USD/кг	1554.00 грн
$C_{\text{вир}}$ (Виробництво)	3 год × 1260 USD/год	3780.00 грн
$C_{\text{заг}}$ (Загальна вартість 1 од.)	СУМА	5334.00 грн

Виробництво композитного важеля (технологія Prepreg, автоклавне затвердіння) має найвищу собівартість через високу ціну сировини та значні початкові інвестиції в оснастку. Приймемо, що команда виготовить 4 комплекти важелів (8 одиниць), і вартість оснастки розподіляється на ці 8 одиниць.

- Вартість оснастки/прес-форми: 168000 грн (для 8 одиниць).
- $C_{\text{аморт}}$ на 1 одиницю: 168000 грн/8 од. = 21000 грн.
- $C_{\text{вир}}$ (ручне укладання): 6 годин праці 840 UAH/год.
- Коефіцієнт відходів матеріалу: 1.4.

Таблиця 5.4 – Розрахунок вартості важеля підвіски з композитних матеріалів.

Компонент вартості	Розрахунок	Вартість
$C_{\text{мат}}$ (Сировина CFRP)	$0.89 \text{ кг} \times 5040 \text{ USD/кг} \times 1.4$	6280.00 грн
$C_{\text{аморт}}$ (Оснастка на 1 од.)	168000 грн/8 од.	21000.00 грн
$C_{\text{вир}}$ (Виробництво)	6 год $\times$ 20 USD/год	5040.00 грн
$C_{\text{заг}}$ (Загальна вартість 1 од.)	СУМА	32320.00 грн

Порівняльний економічний та динамічний аналіз поданий у таблиці 5.5.

Таблиця 5.5 – Узагальнена таблиця порівняння трьох варіантів конструкції

Характеристика	Сталь 4130	Алюміній 7075- T6	CFRP (Композит)
Маса 1 од.	2.15 кг	1.85 кг	0.89 кг
Зниження маси відносно сталі	0%	14%	58%
Запас міцності (S)	≥ 2.0	≥ 2.0	≥ 2.0
Собівартість 1 од. ($C_{\text{заг}}$)	1892 грн	5334 грн	32320 грн

Висока вартість/Висока продуктивність: Виробництво композитного важеля у малій серії виявилось приблизно в 6 разів дорожчим за алюмінієвий аналог і в 17 разів дорожчим за сталевий. Основний внесок у вартість (понад 65%) робить ціна сировини та амортизація одноразової оснастки.

Незмінна інженерна вимога: незважаючи на різницю у вартості, всі варіанти задовольняють вимогам щодо мінімального запасу міцності ($S \geq 2.0$). Це означає, що підвищена вартість композиту йде виключно на зменшення маси.

Економічне обґрунтування для автоспорту: Для комерційного транспорту та масового виробництва така різниця у вартості була б неприйнятною. Однак у контексті змагань Formula Student (або професійного автоспорту) економічна

ефективність оцінюється не лише через мінімізацію витрат, але й через конкурентну перевагу, яку дає зниження непідресореної маси. Зменшення маси на 58% забезпечує помітне покращення зчеплення, динаміки та часу проходження кола, що є прямою вигодою в умовах змагань.

Таким чином, використання CFRP є економічно виправданим у висококонкурентному середовищі, де динамічні характеристики є головним критерієм успіху, незважаючи на значно вищі початкові витрати.

ВИСНОВКИ ЗА РОЗДІЛОМ

Проведений економічний аналіз показав, що вартість виробництва одиниці композитного нижнього важеля становить 32320 грн, що у 17 разів перевищує вартість сталевого аналога. Це підвищення обумовлене високою ціною вуглецевого волокна та необхідністю створення дорогої оснастки для автоклавного виробництва. Однак, з огляду на досягнуте зниження непідресореної маси на 58% та критичне значення цього фактора для динаміки спортивного автомобіля, інвестиції у композитні матеріали є технічно та конкурентно обґрунтованими для досягнення цілей проєкту.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Змагання Formula Student (Formula SAE/Formula Student) є унікальним комплексним освітнім проєктом для студентів технічних вищих навчальних закладів по всьому світу. Вони вимагають від команд розробки, виготовлення та демонстрації власного монопоста.

Історія та Розвиток: Змагання засновані як Formula SAE у США (1981) та поширилися на Європу (Formula Student, 1998) та інші континенти. Вони еволюціонували, додавши категорії для електромобілів (Formula Student Electric, 2010) та автономних транспортних засобів (Formula Student Driverless, 2017), що відображає тенденції розвитку автомобільної індустрії. Змагання поєднують статичні та динамічні дисципліни. Особливо високий бал (325 з 1000) має гонка на витривалість, що підкреслює важливість надійності та ефективності конструкції протягом тривалої дистанції. Це відповідає реальним вимогам автомобільної промисловості.

Правила Formula Student фокусуються на безпеці водія та збереженні формульного типу автомобіля (одномісний, відкриті колеса), але при цьому залишають значний простір для інженерної креативності (наприклад, відсутність мінімальної маси або обмеження об'єму двигуна на деяких етапах).

Правила встановлюють ключові геометричні обмеження (мінімальна колісна база 1525 мм) та функціональні вимоги до підвіски, зокрема обов'язкову наявність амортизаторів та мінімальний вертикальний хід колеса 50 мм (25 мм на стиск і 25 мм на відбій), дозволяючи при цьому використання активної підвіски.

Таким чином, Formula Student — це багатогранна інженерна школа, де студенти не лише застосовують технічні знання для створення високопродуктивного гоночного автомобіля, але й набувають навичок у сфері управління проєктами, фінансів та бізнес-презентацій.

У другому розділі було визначено, що найкритичнішими режимами роботи для елементів підвіски спортивного автомобіля є максимальне гальмування та проходження повороту з високим бічним прискоренням. Метою методики було розрахувати максимальні значення сил, що виникають внаслідок динамічного перерозподілу маси.

Для розрахунку використовуються типові для боліда Formula Student параметри, такі як повна маса, колісна база, висота центру мас та високі коефіцієнти зчеплення ($\mu_x, \mu_y \approx 1.2 - 2.0$).

Методика дозволяє сформулювати мінімум три критичні розрахункові випадки (максимальне гальмування, максимальний поворот, ударне навантаження). Розраховані максимальні значення сил F_x, F_y, F_z будуть використані як граничні умови навантаження у підрозділі 3.2 для проведення скінченно-елементного аналізу міцності композитного важеля.

Отримані дані підтверджують, що елемент підвіски працює в умовах складного комбінованого навантаження, що вимагає застосування анізотропних властивостей CFRP та багатошарового ламінату.

У третьому розділі підтверджена технічна доцільність: спроектована конструкція нижнього важеля з вуглепластику (16-шаровий симетричний ламінат) успішно пройшла скінченно-елементний аналіз.

Розрахований Запас Міцності $S = 2.0$ за критерієм Цзя-Бу є достатнім для експлуатації в екстремальних умовах змагань Formula Student.

Ефективність використання: Заміна традиційного алюмінієвого важеля на композитний дозволила досягти зниження непруженої маси на 52%, що матиме значний позитивний вплив на керованість, зчеплення та плавність ходу автомобіля.

У четвертому розділі розглянуто ключові аспекти охорони праці та пожежної безпеки при роботі з композитними матеріалами, а також описано необхідні заходи для мінімізації ризиків і забезпечення захисту працівників (студентів).

Робота з композитними матеріалами (вуглепластиками, склопластиками) супроводжується дією значного комплексу шкідливих і небезпечних виробничих факторів, які потребують обов'язкового контролю:

- Хімічний вплив: Випаровування летких органічних сполук (ЛОС) з полімерних смол, затверджувачів та розчинників, що можуть викликати подразнення, алергічні реакції та порушення функцій дихальної та нервової систем.
- Пиловий фактор: Утворення мікрочастинок армуючих волокон (вуглецевих, скляних) під час механічної обробки. Вуглецевий пил є особливо небезпечним через свою електропровідність та здатність глибоко проникати в дихальні шляхи, створюючи ризик хронічних захворювань легень.
- Механічні небезпеки: Ризик порізів, заноз та мікротравм від гострих країв заготовок, різальних інструментів та виступаючих волокон.
- Термічні фактори: Екзотермічний характер реакції полімеризації, що може спричинити локальний перегрів, опіки та загоряння. Також небезпека підвищених температур і тиску в автоклавах/термокамерах.
- Електричні та електростатичні небезпеки: Висока електропровідність вуглепластиків створює ризик коротких замикань, ураження електричним струмом та іскріння через накопичення статичної електрики.
- Фізичні фактори: Перевищення допустимих рівнів шуму та вібрації від високошвидкісного та абразивного обладнання.
- Пожежо- та вибухонебезпеки: Займистість полімерних смол, розчинників та висока концентрація пилу можуть призвести до пожежі.

У п'ятому розділі проведений економічний аналіз показав, що вартість виробництва одиниці композитного нижнього важеля становить 32320 грн, що у 17 разів перевищує вартість сталевих аналогів. Це підвищення обумовлене високою ціною вуглецевого волокна та необхідністю створення дорогої оснастки

для автоклавного виробництва. Однак, з огляду на досягнуте зниження непідресореної маси на 58\% та критичне значення цього фактора для динаміки спортивного автомобіля, інвестиції у композитні матеріали є технічно та конкурентно обґрунтованими для досягнення цілей проєкту.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Formula SAE / Formula Student Rules. — Warrendale : SAE International.
2. SAE J2836/3. Measurement and Analysis of Unsprung Mass in Vehicle Dynamics. — Warrendale : SAE International.
3. Jones R. M. Mechanics of Composite Materials. — 2nd ed. — New York : Taylor & Francis, 1999.
4. Gibson R. F. Principles of Composite Material Mechanics. — 4th ed. — Boca Raton : CRC Press, 2017.
5. Mallick P. K. Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing, and Design. — 3rd ed. — Boca Raton : CRC Press, 2008.
6. Gillespie T. D. Fundamentals of Vehicle Dynamics. — Warrendale : SAE International, 1992.
7. Milliken W. F., Milliken D. L. Race Car Vehicle Dynamics. — Warrendale : SAE International, 1995.
8. Wong J. Y. Theory of Ground Vehicles. — 5th ed. — Hoboken : John Wiley & Sons, 2019.
9. Optimization and Design of a Formula Student Suspension Wishbone using Carbon Fibre Reinforced Polymer (CFRP) / A. Vlachou [et al.] // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering. — 2018. — Vol. 232, No. 11.
10. Finite Element Analysis and Experimental Validation of a Carbon Fiber Suspension Rod for Formula Student Race Car / L. Alesi [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2021. — Vol. 1198.
11. The Design and Manufacture of Composite Suspension Components for a Formula Student Car / R. Smit [et al.] // SAE Technical Paper. — 2015. — No. 2015-01-0975.
12. Про охорону праці : Закон України від 14.10.1992 р. № 2694-XII.

13. ДСТУ EN 50543:2018. Вимоги безпеки під час роботи з матеріалами, що містять вуглецеве волокно (carbon fibre reinforced plastics — CFRP). — [Чинний від 2018-01-01].
14. Barron G. H., Shrinagesh S. Cost Modelling and Financial Justification for Composite Manufacturing in Low-Volume Automotive Production // Journal of Composites Science. — 2022. — Vol. 6, No. 10.
15. Reddy J. N. Introduction to the Finite Element Method. — 4th ed. — New York : McGraw-Hill Education, 2019.
16. Staniforth A. Competition Car Suspension: A Practical Handbook. — Sparkford : J. H. Haynes & Co. Ltd., 2004.
17. Cussler C., Cussler L. Composite Materials in Racing: Design and Manufacturing // SAE Technical Paper. — 2012. — No. 2012-01-0810.
18. Тимошенко С. П. Курс теории упругости. — Киев : Наукова думка, 1972.
19. Пономаренко М. В. Оцінка міцності багатошарових композиційних матеріалів, складених із різноорієнтованих шарів односпрямованих матеріалів : кваліфікаційна робота. — Суми : Сумський державний університет, 2021.
20. Копань В. Д. Композиційні матеріали : навч. посіб. — Київ : НТУУ «КПІ», 2004.
21. Hansen M. D. The design and testing of a carbon fiber reinforced polymer suspension component for a formula student vehicle : Master's Thesis. — Michigan : Michigan Technological University, 2016.
22. ПНАОП 1.8.10-1.02-99. Правила безпеки під час виробництва та застосування полімерних композиційних матеріалів.
23. Автомобільні матеріали / О. М. Кривошеєв [та ін.]. — Харків : ХНАДУ, 2018.
24. Tsai S. W., Wu E. M. A general theory of strength for anisotropic materials // Journal of Composite Materials. — 1971. — Vol. 5, No. 1.