

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет інженерії машин, споруд і технологій
(повна назва факультету)
Кафедра будівельної механіки
(повна назва кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістра

(назва освітнього ступеня)

на тему: Дослідження та аналіз методів розрахунку плоских металевих ферм в програмному комплексі SolidWorks Simulation

Виконав(ла): студент(ка) 6 курсу, групи МБнм-61
спеціальності 192

Будівництво та цивільна інженерія

(шифр і назва спеціальності)

Юркевич А. М.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Керівник

Ковальчук Я.О.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

Мещерякова О. М.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри

Ясній В.П.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Рецензент

Бобик М.П

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Факультет Факультет інженерії машин, споруд і технологій
(повна назва факультету)
Кафедра Будівельної механіки
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
Ясній В.П.
(підпис) (прізвище та ініціали)
« » _____ 2025 р.

З А В Д А Н Н Я НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня Магістр
(назва освітнього ступеня)
за спеціальністю 192 Будівництво та цивільна інженерія
(шифр і назва спеціальності)
студенту Юркевичу Андрію Миколайовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: «Дослідження та аналіз методів розрахунку плоских металевих ферм в програмному комплексі SolidWorks Simulation»

Керівник роботи Ковальчук Ярослав Олексійович, к.т.н., доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від « 11 » квітня 2025 року № 4/7-287

2. Термін подання студентом завершеної роботи

3. Вихідні дані до роботи Базова конструкція підкροквяної ферми і умови її експлуатації.

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

Вступ; Роль фермових конструкцій в будівництві; Статична стійкість та міцність елементів зварних ферм;

Аналіз результатів досліджень інших авторів і формування завдання для власних досліджень;

Вибір конструктивної схеми і навантаження ферми;

Методика дослідження ферми при дії статичних навантажень;

Порядок проведення комп'ютерно моделюючого експерименту методом спрощеної розрахункової моделі; Порядок проведення комп'ютерно моделюючого експерименту методом повної розрахункової моделі; Поведінка конструкції ферми при дії статичних навантажень при розрахунку методом спрощеної моделі; Поведінка конструкції ферми при дії статичних навантажень при розрахунку методом повної моделі; Порівняльний аналіз та оцінка напружено-деформівного стану ферми при дослідженні методом спрощеної та повної розрахункової моделі; Узагальнюючі результати та рекомендації по використанню методів дослідження зварних ферм в програмному комплексі SolidWorks.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

1.Базова конструкція ферми.

2.Дослідження зварної ферми методом спрощеної розрахункової моделі .

3.Дослідження зварної ферми методом повної розрахункової моделі .

4.Аналіз та сфера застосування методів зварних конструкцій.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Каспрук В.Б.		
Безпека в надзвичайних ситуаціях	Стручок В.С.		
Нормоконтроль	Мещерякова О.М.		

7. Дата видачі завдання 11.04.2025

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Особливості роботи зварних ферм за умов різних силових впливів	15.04.2025	
2	Методичні особливості дослідження зварних ферм методом спрощеної і повної розрахункової моделі в програмному комплексі SolidWorks.	18.04.2025	
3	Порівняльний аналіз дослідження зварних ферм методом спрощеної та повної розрахункової моделі.	25.04.2025	
4	Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуація	12.05.2025	
5	Загальний висновок	15.05.2025	

Студент

(підпис)

Юркевич А. М.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Ковальчук Я.О.

(прізвище та ініціали)

ЗМІСТ

	ВСТУП	5
Розділ 1	ОСОБЛИВОСТІ РОБОТИ ЗВАРНИХ ФЕРМ ЗА УМОВ РІЗНИХ СИЛОВИХ ВПЛИВІВ	9
1.1	Значення фермових зварних конструкцій в будівництві	9
1.2	Статична стійкість та міцність елементів зварних ферм	12
1.3	Аналіз результатів досліджень інших авторів і формування завдання для власних досліджень	14
1.4	Висновки за розділом 1	18
Розділ 2	МЕТОДИЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ДОСЛІДЖЕННЯ МІЦНОСТІ ФЕРМИ МЕТОДОМ СПРОЩЕНОЇ РОЗРАХУНКОЇ МОДЕЛІ ТА ПОВНОЇ РОЗРАХУНКОВОЇ МОДЕЛІ	19
2.1	Вибір конструктивної схеми і умов навантаження ферми	19
2.2	Методика дослідження ферми при дії статичних навантажень	23
2.3	Порядок проведення комп'ютерно моделюючого експерименту методом спрощеної розрахункової моделі	25
2.4	Порядок проведення комп'ютерно моделюючого експерименту методом повної розрахункової моделі	30
2.5	Висновок за розділом 2	39
Розділ 3	ОСОБЛИВОСТІ ПОВЕДІНКИ ДОСЛІДЖУВАЛЬНОЇ ФЕРМИ	40
3.1	Поведінка конструкції ферми при дії статичних навантажень розрахунком за методом спрощеної моделі	40
3.2	Поведінка конструкції ферми при дії статичних навантажень розрахунком за методом повної моделі	49
3.3	Порівняльний аналіз та оцінка напружено-деформованого стану ферми при дослідженні методом спрощеної та повної розрахункової моделі	56
3.4	Узагальнені результати та рекомендації по використанню методів дослідження зварних ферм в програмному комплексі	65

	SolidWorks	
3.5	Висновок за розділом 3	67
Розділ 4	ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	69
4.1	Законодавча база про охорону праці	69
4.2	Правила охорони праці та техніка безпеки при монтажі зварних ферм	68
4.3	Оцінка стійкості плоскої металевої ферми до дії ударної хвилі ядерного (техногенного) вибуху і заходи щодо її підвищення	71
	ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	75
	БІБЛІОГРАФІЯ	77
	ДОДАТОК А Довідка про впровадження результатів роботи ...	

ВСТУП

Застосування зварних ферм є одним із найефективніших рішень для досягнення оптимального балансу між міцністю конструкцій і економним використанням матеріалів у прогінних будівельних елементах.

Під час виготовлення сталевих конструкцій, зокрема ферм, основним методом з'єднання є зварювання. Такий технологічний процес дозволяє збільшити відстані між несучими колонами або стінами, полегшити процес монтажу та зменшити загальну трудомісткість будівельних робіт.

Раніше для виготовлення зварних ферм переважно застосовували вальцьовані профілі кутникового перерізу. На сьогодні дедалі ширше використовують профільні труби прямокутного, квадратного або круглого перерізу. Для виготовлення ферм великого прогону застосовують переважно двотаврові профілі [1].

Проектування зварних ферм базується на застосуванні різних інженерних методик [2].

Важливим кроком у розвитку методів проектування стало впровадження режиму спільного розрахунку відповідно до вимог Єврокоду. Стандарти EN1993-1-8 та EN1090/1, EN1090/2 встановлюють обов'язкові вимоги до розроблення, виготовлення та контролю якості всіх видів зварних з'єднань [3].

Сучасний підхід до визначення конструктивних параметрів зварних ферм базується на методах комп'ютерного моделювання. Завдяки використанню моделюючих експериментів стає можливим дослідження комплексного впливу конструктивних, технологічних, експлуатаційних та аварійних чинників, а також аналіз процесів пошкодження й руйнування зварних ферм у динаміці [4].

Актуальність теми роботи. Зварні ферми набули значного поширення в промисловому будівництві завдяки своїй здатності витримувати великі навантаження при простій конструктивній формі, легкості виготовлення та відносно невеликій масі. Проте для досягнення їх експлуатації необхідно

подальше вдосконалення методів комп'ютерного моделювання для аналізу роботи зварних ферм за умов експлуатаційних навантажень.

Традиційні методи визначення перерізу стрижнів ферми не враховують жорсткості вузлових елементів конструкції, що ускладнює оцінювання поведінки ферми в цих критичних зонах. Використання комп'ютерного моделюючого експерименту за допомогою сучасних програмних засобів дає можливість точно визначити параметри напружено-деформівного стану (НДС) у елементах конструкції в нелінійній постановці, наближаючи результати до реальних експлуатаційних умов.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження проведено в межах наукової роботи кафедри будівельної механіки ТНТУ в рамках Державної системи забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів відповідно до «Загальних принципів забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд» (ДБН В.1.2-14:2018).

Мета й задачі роботи. Метою даного дослідження є проведення аналізу та порівняння методів розрахунку плоских металевих ферм за допомогою програмного комплексу SolidWorks Simulation, використовуючи спрощену розрахункову модель та повну розрахункову модель, для визначення їх ефективності, точності та застосовності в різних умовах експлуатації. Для досягнення поставленої мети в роботі потрібно вирішити такі задачі:

- вибрати одну типову зварну ферму для дослідження, вказати її довжину, висоту, схему базування, схему прикладання, тип і величину навантажень;
- спроектувати зварну ферму з використанням існуючих інженерних методик;
- ознайомитись з можливостями програмного комплексу SolidWorks Simulation для моделювання та аналізу ферм;
- порівняти методи дослідження спрощеної та повної розрахункової моделі, аналізуючи їх переваги і недоліки;
- виконати розрахунок плоскої металевої ферми за допомогою обох методів та визначити точність отриманих результатів;

- розробити рекомендації для практичного застосування отриманих результатів в інженерній практиці.

Об'єктом дослідження є зварна ферма, в якій впродовж експлуатації конструкції формуються напруження, що можуть зумовлювати втрату несучої здатності ферми.

Предметом дослідження є методи визначення параметрів НДС зварної кроквяної ферми, що визначає безпечну експлуатацію конструкції при дії статичних навантажень.

Методи дослідження. Для досягнення мети дослідження проведено огляд наявних інформаційних джерел, а також аналіз результатів досліджень інших авторів та нормативної документації, що стосується теми роботи. В процесі дослідження була використана методика комп'ютерного моделюючого експерименту.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана в рамках наукових досліджень кафедри будівельної механіки ТНТУ.

Наукова новизна одержаних результатів. Отримала подальший розвиток методика комп'ютерного моделюючого експерименту для оцінювання несучої здатності зварних ферм при їх експлуатації за умов статичних навантажень.

Практичне значення одержаних результатів. Результати цього дослідження дають можливість отримати вищу достовірність показників НДС в елементах плоских металевих ферм у програмному комплексі SolidWorks. Одержані результати можуть бути використані для вибору оптимальних методів розрахунку ферми в залежності від умов експлуатації та необхідної точності. Зокрема порівняння спрощеної та повної розрахункової моделі дозволяє інженерам приймати обґрунтовані рішення щодо застосування цих методів в реальних проєктах будівництва, що дозволяє скоротити час розрахунків, зменшити витрати на матеріали та підвищити ефективність конструкцій.

Апробація результатів магістерської роботи. Отримана у XIII Міжнародній студентській науково-технічній конференції (м. Тернопіль, ТНТУ, 11-12 грудня, 2024 р.) [6].

Публікації. Результати роботи опубліковано в матеріалах збірника тез XIII-ї Міжнародної студентської науково-технічної конференції [6].

Ключові слова: зварна ферма, напружено-деформівний стан, комп'ютерний моделюючий експеримент.

РОЗДІЛ 1

ОСОБЛИВОСТІ РОБОТИ ЗВАРНИХ ФЕРМ ЗА УМОВ РІЗНИХ СИЛОВИХ ВПЛИВІВ

1.1 Значення фермових зварних конструкцій в будівництві

Ферма є конструкцією, що складається зі стрижнів (елементів), з'єднаних між собою таким чином, що утворюють трикутні системи, завдяки чому вся збірка функціонує як цілісний об'єкт. Найчастіше ферми використовуються як несучі елементи в мостах, дахах і вежах [7].

Кроквяні ферми — це різновид ферм, що зазвичай виготовляються із прямих металевих або дерев'яних стрижнів, які утворюють послідовність трикутників, розташованих в одній площині [7].

Ферми забезпечують стійку геометричну форму, здатну витримувати значні зовнішні навантаження на великих прогонах. При цьому основні елементи працюють переважно на осьовий розтяг або стиск. Елементи ферми перехрещуються в точках з'єднань — кроквяних вузлах або панельних точках.

Частини ферми, що утворюють її верхній та нижній контури, називаються відповідно верхнім і нижнім поясом. Вертикальні та похилі елементи, які з'єднують ці пояси, утворюють павутину ферми. До складу павутини входять вертикальні елементи — стійки та похилі елементи — розкоси [8].

Кінці всіх елементів ферми об'єднані у вузлах — стиках, які переносять навантаження на опорні конструкції, зокрема несучі балки, стіни або ґрунт.

Основні цілі використання ферм полягають у:

- забезпеченні перекриття великих прогонів;
- зменшенні ваги конструкції;
- обмеженні прогину;
- здатності витримувати значні навантаження.

Перевага ферм полягає в тому, що для сприйняття навантажень вони потребують менше матеріалу порівняно із суцільними балками. Ефективність ферми зазвичай досягається завдяки зменшенню обсягів використаного матеріалу

та збільшенню кількості з'єднувальних елементів у порівнянні із суцільними балковими конструкціями [9].

Плоска ферма — це конструкція, в якій усі стрижневі елементи розташовані в одній площині. Плоскі ферми часто використовуються в серійному розташуванні, паралельно одна до одної, для створення дахів, мостів та інших подібних споруд (рис. 1.1).



Рисунок 1.1 – Плоска ферма

Для забезпечення належної просторової жорсткості всієї конструкції між окремими фермами обов'язково встановлюють горизонтальні та вертикальні зв'язки. Горизонтальні зв'язки виконують функцію розподілу навантаження і забезпечують стійкість конструкції у площині ферм, тоді як вертикальні зв'язки допомагають запобігти боковому викривленню та забезпечують опір поперечним навантаженням. Разом ці елементи зв'язків формують просторову систему, яка дозволяє фермам працювати як єдиній, жорсткій конструкції, стійкій до дії як

вертикальних, так і горизонтальних сил, що діють у різних напрямках. Правильне розташування та розрахунок зв'язків є необхідною умовою для підвищення загальної надійності, довговічності та ефективності роботи несучої системи споруди [10].

На відміну від плоских ферм, що працюють лише в межах двох вимірів, просторові ферми є тривимірними конструкціями, сформованими зі з'єднаних трикутних осередків (рис. 1.2).



Рисунок 1.2 – Просторова ферма

Основна перевага просторових ферм перед плоскими полягає в тому, що вони не потребують додаткового розкріплення між собою й здатні сприймати навантаження у трьох площинах. Завдяки цьому просторові ферми мають вищу жорсткість і стійкість без необхідності монтажу допоміжних елементів.

1.2 Статична стійкість та міцність елементів зварних ферм

Статична стійкість ферми забезпечується за рахунок використання ґратчастої системи (розкосів), що формує сітку трикутників. Ґрати ферми сприймають поперечні сили, передаючи навантаження між верхнім і нижнім поясами конструкції, таким чином виконуючи функції стінки суцільної балки. Від типу ґратчастої системи залежать вага ферми, складність її виготовлення та її зовнішній вигляд [11].

Найпоширенішими є трикутні ґрати, оскільки вони мають меншу загальну довжину елементів та меншу кількість вузлів у порівнянні з іншими типами ґрат. Оптимальним вважається кут нахилу розкосів до нижнього поясу в межах $45\text{--}50^\circ$. Основним недоліком трикутних ґрат є збільшена довжина поясних панелей, особливо у фермах великої довжини [12].

Розкісні ґрати здебільшого використовуються у фермах невеликої висоти. Їх особливість полягає у можливості керувати напрямком внутрішніх зусиль за рахунок орієнтації розкосів до опори. Рекомендований кут нахилу розкосів у таких фермах становить $35\text{--}45^\circ$, що забезпечує економічність та ефективність роботи елементів. У фермах із трапецієподібними або паралельними поясами доцільно проєктувати розкоси, що нахилені у бік опори, аби вони працювали на розтяг, а короткі вертикальні стійки – на стиск. Водночас у фермах із трикутними або сегментними контурами розкоси, спрямовані донизу, зазвичай працюють на стиск, тоді як вихідні елементи – на розтяг [13].

Реакції в опорах ферми визначаються за аналогією до реакцій шарнірно-опертої балки. Для розрахунку зусиль у елементах ферми застосовуються аналітичні, графічні та комп'ютерно-просторово-модельні методи. Серед аналітичних методів використовують:

- метод вирізання вузлів;
- метод ліній впливу (рис.1.3);
- метод перетинів, зокрема спосіб моментної точки.

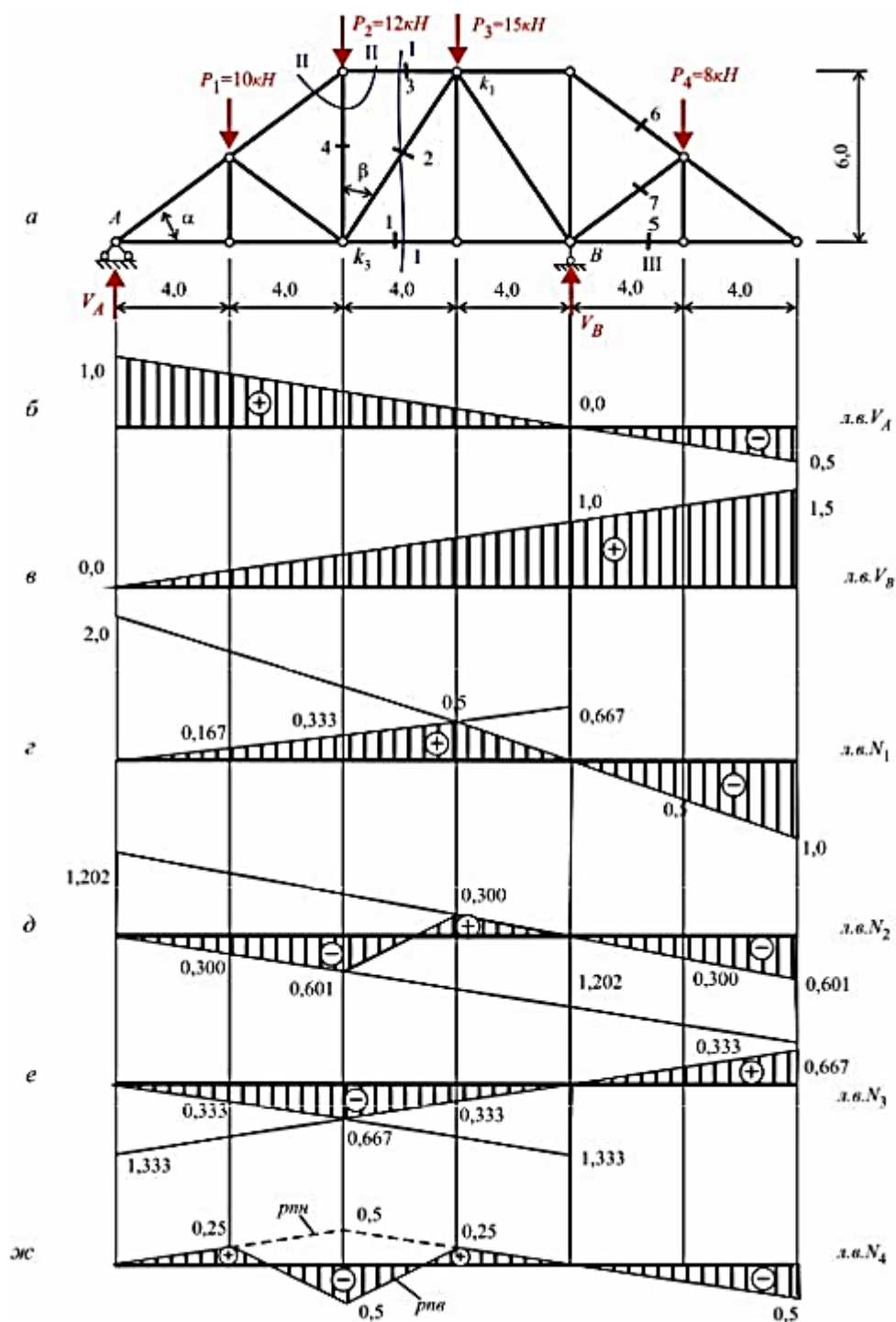


Рисунок 1.3 – Розрахункова схема ферми з епюрами силових впливів при розрахунку методом ліній впливу

До графічних методів належить, зокрема, метод Максвела-Кремони. Методи комп'ютерного моделювання реалізуються за допомогою спеціалізованих

програмних комплексів. У рамках проведених досліджень використовувалися програмні продукти SolidWorks 2025 [14].

1.3 Аналіз результатів досліджень інших авторів і формування завдання для власних досліджень

У фермових конструкціях зварні вузли є місцями концентрації критичних напружень через зміну структури основного металу, особливо в області термічного впливу та безпосередньо в зварному шві. Це особливо небезпечно при впливі експлуатаційних навантажень, коли зародження та розвиток тріщин до критичного розміру відбувається протягом експлуатаційного періоду, що може призвести до раптового руйнування конструкції. Тому важливо виконати розрахунок довговічності існуючих ферм та, у разі необхідності, підвищити їхню жорсткість і міцність.

У роботі [15] розглянуто можливості застосування сучасних засобів автоматизованого проєктування, зокрема Ansys, з метою удосконалення методів розрахунку фермових конструкцій. Згідно з результатами дослідження, при моделюванні в умовах низьких навантажень спостерігається висока точність результатів, тоді як за значних навантажень точність суттєво знижується. Під час чисельного експерименту виявлено тенденцію до недооцінки несучої здатності зварної ферми, що, у свою чергу, призводить до необґрунтованого збільшення витрат матеріалів під час проєктування та зниження допустимих експлуатаційних навантажень. Основною причиною таких відхилень автор називає відсутність у моделі впливу стохастичних факторів, які у випадку значних зусиль можуть істотно впливати на реальну поведінку конструкцій.

У праці [16] запропоновано інноваційний підхід до підвищення ефективності комбінованих сталевих ферм шляхом оптимізації їх топології та цілеспрямованого керування напружено-деформованим станом (НДС). Основою методики є введення спеціально розрахованих опорних і вузлових ексцентриситетів, що дозволяє досягати рівномірного розподілу напружень у

критичних перерізах балки жорсткості. Проведені числові експерименти щодо 216 раціоналізованих комбінованих ферм підтвердили високу ефективність запропонованих конструктивних рішень. Наприклад, при прогоні 30 м та навантаженні 12,75 кН/м маса удосконаленої ферми становила 1601 кг, у той час як типова конструкція — 1801 кг, що свідчить про зниження маси на 12,5% і зменшення загальних витрат на 18%.

Особливу ефективність продемонструвало використання замкнутих гнутозварних профілів [17]. Проведені експериментальні дослідження підтвердили достовірність аналітичних результатів та можливість досягнення рівнонапруженого стану балки. Встановлено, що зруйнування вдосконаленої ферми відбувається при навантаженнях, що у 1,4 рази перевищують нормативні значення, а збіжність експериментальних і теоретичних даних щодо несучої здатності та деформативності становить 92–96%.

На підставі результатів, отриманих для прогону 30 м, виконано екстраполяцію на прогони 12, 15, 18 та 24 м із різними навантаженнями, що дало змогу створити новий підклас комбінованих ферм зі сталою висотою та раціональними конструктивними формами. Чисельний аналіз продемонстрував, що впровадження таких рішень дозволяє скоротити витрати сталі на 15–26% завдяки вдосконаленому розподілу внутрішніх зусиль та регулюванню НДС.

У цих дослідженнях також проаналізовано техніко-економічні й екологічні переваги нових конструкцій порівняно з традиційними. При навантаженні 18 кН/м техніко-економічна ефективність однієї ферми прогоном 30 м становить 62 601 грн (ціни 2022 року) проти 74 838 грн для типової. Енерговитрати на виготовлення знижуються з 1102 до 862 кВт·год, а викиди CO₂ — з 4,31 до 3,54 тонни.

Крім того, розроблено практичні рекомендації для розрахунку, регулювання НДС і проектування раціональних комбінованих ферм із постійною висотою для прогонів 12–30 м. Результати дослідження вже впроваджені Українським інститутом сталевих конструкцій ім. В.М. Шимановського, а також низкою

підприємств і навчальних закладів, зокрема у процесі підготовки фахівців у НУ «Львівська політехніка».

У роботі [18] виконано дослідження напружено-деформованого стану конструкції за допомогою програмного комплексу SolidWorks Simulation методом спрощеної розрахункової моделі. Результати чисельного аналізу показали, що максимальні нормальні напруження становлять 138 МПа, що приблизно в 1,6 рази менше за межу текучості матеріалу, що вказує на виконання умови міцності. Водночас, коефіцієнт концентрації напружень у ділянках необроблених стикових швів не перевищує 1,5, що також підтверджує допустимий рівень напружень. При моделюванні заповнення резервуара рідиною встановлено, що максимальний прогин становить 1 мм при довжині конструкції 15 000 мм, що свідчить про достатню жорсткість.

Окрім того, на основі отриманих даних запропоновано та реалізовано інженерно-технологічні рішення, спрямовані на оптимізацію процесу виготовлення зварного резервуара. Зокрема, удосконалено технологічну схему виробництва, що дало змогу підвищити рівень автоматизації та механізації окремих етапів, покращити якість зварних з'єднань, а також ефективність виконання складально-зварювальних робіт. У межах удосконалення були модернізовані конструкції деяких вузлів складально-зварювальних пристосувань, що дозволило зменшити тривалість підготовчих і завершальних операцій та поліпшити якість збірки.

Запропоновані зміни сприяли не лише покращенню технічних характеристик виробу, а й підвищили комфорт і безпеку умов праці персоналу, задіяного у виробничому процесі.

У роботі [19] реалізовано методику проведення комп'ютерного моделюючого експерименту у програмному середовищі SolidWorks методом повної розрахункової моделі, спрямованої на аналіз параметрів напружено-деформованого стану (НДС) у складових прямокутної підкрювняної зварної ферми при змінній геометрії фасонки.

Внаслідок моделювання отримано як чисельні, так і графічно інтерпретовані дані, що відображають поведінку ферми під дією зовнішніх статичних навантажень. Аналіз варіантів фасонки прямокутної форми з довжиною від 500 до 800 мм засвідчив відсутність прямої залежності між тримкістю ферми, розмірами фасонки та довжиною зварних швів. Найвищі показники тримкості спостерігалися у варіанті з фасонками довжиною 600 мм.

При вивченні впливу фасонки трапецієподібної форми з довжиною від 500 до 900 мм було встановлено, що в межах визначеного діапазону спостерігається прямий зв'язок між довжиною фасонки та тримкістю конструкції. Максимальні показники тримкості зафіксовано для зразка з фасонками довжиною 900 мм. Подальше збільшення розміру фасонки до 1000 та 1100 мм не призвело до підвищення тримкості, що вказує на наявність оптимального діапазону геометричних параметрів [20].

Однак в даних роботах не проведено порівняння ефективності методу спрощеної або повної розрахункової моделі для розрахунку статичних навантажень, і порівняння цих двох методів для розрахунку ферм.

Використання сучасного програмного забезпечення SolidWorks дозволяє отримати максимально наближені до реальних умов експлуатації результати визначення параметрів НДС в елементах ферми. Щоб дослідити взаємозв'язок між місцями утворення найбільших параметрів НДС і довговічністю конструкції під впливом статичних навантажень, у роботі ставляться такі задачі:

- обрати типову зварну ферму серійного виробництва для дослідження, вказати її геометричні розміри, схему прикладення статичних навантажень;
- виконати проєктування ферми для умов статичного навантаження із застосуванням існуючих інженерних методик;
- дослідити міцність елементів ферми;
- визначити параметри НДС у конструктивних елементах;
- оцінити довговічність досліджуваної ферми для прийнятих навантажень.

1.4 Висновки за розділом 1

1. Описано і проаналізовано інформацію з літературних джерел щодо моделювання зварних ферм з метою визначення їх довговічності і забезпечення надійності при експлуатації.

2. Виявлено, що у відомих результатах досліджень відсутні порівняння ефективності методу спрощеної або повної розрахункової моделі для розрахунку статичних навантажень, і порівняння цих двох методів для розрахунку ферм.

3. Врахувавши тему й мету кваліфікаційної роботи та інформацію з проаналізованих джерел, сформульовано задачі для власних досліджень.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ДОСЛІДЖЕННЯ МІЦНОСТІ ФЕРМИ

2.1 Вибір конструктивної схеми і умов навантаження ферми

Метою даного дослідження є проведення аналізу та порівняння методів розрахунку плоских металевих ферм за допомогою програмного комплексу SolidWorks Simulation, використовуючи спрощену розрахункову модель та повну розрахункову модель, для визначення їх ефективності, точності та застосованості в різних умовах експлуатації. Для дослідження вибрано зварну серійного виробництва 18-ти метрову ферму (рис. 2.1).

Вибрана зварна кроквяна ферма запроєктована двохскатною і трикутною решіткою з рівним кроком розкосів. Розмір панелей 3 м. Ферму виготовлено з двох відправочних частини розміром по 9 м кожен. Висота ферми змінна через ухил верхнього поясу. Висота ферми при вузлі опирання 1,440 м. Висота ферми в гребні (посередині) рівна 1,890 м. Вузли з'єднання розкосів з поясами ферми прийнято без сталевих фасонки. Конструктивну схему ферми наведено на рис. 2.1.

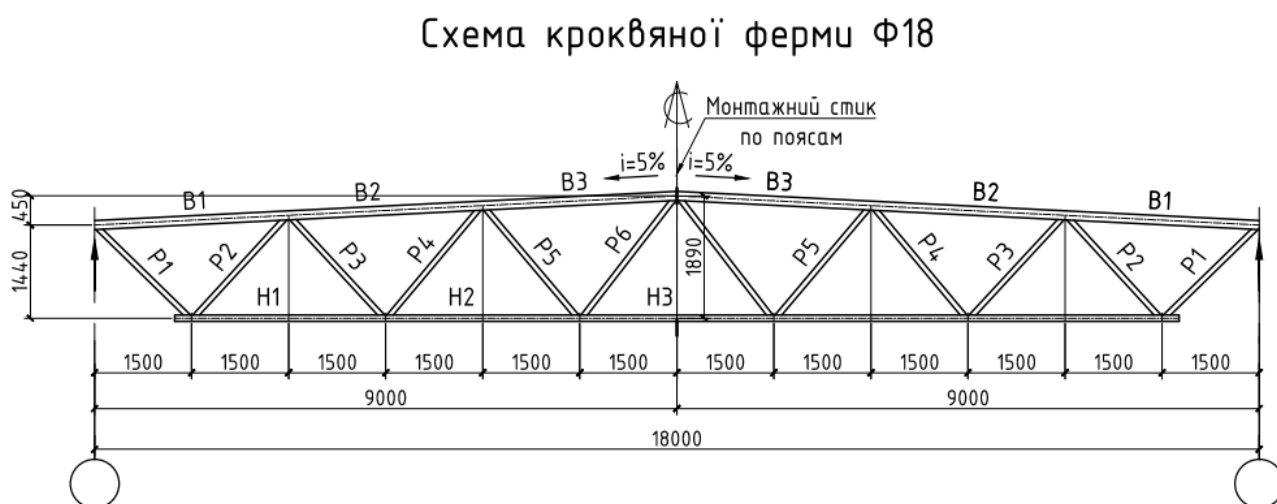


Рисунок 2.1 – Конструктивна схема досліджувальної ферми

У таблиці 2.1 наведено перерізи елементів ферми та марку сталі даних елементів

Таблиця 2.1 – Перерізи елементів ферми

Елементи ферми	Позачення елементів		
		Переріз	Сталь
Верхній пояс	B1	140x140x5	C355
	B2		
	B3		
Нижній пояс	H1	140x140x5	C355
	H2		
	H3		
Розкоси	P1	100x100x5	C245
	P2		
	P3	80x80x4	
	P4		
	P5		
	P6		
Вага ферми, т	1,25		
Марка ферми	Ф24-4		

Всі заводські з'єднання елементів ферми зварні, кріплення до колон комбіноване-монтажні болти і зварка.

Експлуатаційні навантаження від ваги покрівлі наведено в табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Експлуатаційні значення навантаження від ваги покрівлі

№ п/п	Назва навантаження	Характеристичне навантаження, кН/м ²	Коефіцієнт надійності за граничним навантаж.	Граничне навантаження, кН/м ²
1	Сендвіч панель t=100мм	0,20	1,2	0,24
2	Обладнання	0,5	1,3	0,65
				0,89

Навантаження від снігового покриття на конструкцію покрівлі визначено згідно ДБН В.1.2-2:2006 і подано в табл. 2.3.

Таблиця 2.3 – Снігові навантаження на рулонну покрівлю

Район по вазі снігового покриву	Нормативне навантаження кН/м ²	Коефіцієнт надійності по навантаженню	Розрахункове навантаження кН/м ²	Примітка
4	0,986	1,2	1,18	

Експлуатаційне значення розрахункового навантаження $S_e = \gamma_{fe} \cdot S_0 \cdot C = 0,9860$

$\gamma_{fe} = 0,880$ – коефіцієнт надійності за навантаженням;

$S_0 = 1,400$ кН/м² – характеристична вага снігового покриву згідно нормативних документів в зонуванні четвертого снігового району;

$C = \mu \cdot C_{e,io} \cdot C_{alt} = 0,800$;

$\mu = 1$ – коефіцієнт що врахує вагу снігу залежно від ухилу поверхні;

$C_{alt} = 1$ – коефіцієнт що залежить від рівня споруди над рівнем Балтійського моря;

$C_e = 0,8$ – коефіцієнт характеру експлуатації покрівлі;

Таким чином, розрахункове статичне навантаження на вузол середньої кроквяної ферми дорівнюватиме $(1,18 + 0,89) \times 3 \times 6 \times 2 = 37,80$ кН.

Реакція кроквяної ферми на опору становить 203,60 кН.

Розрахунок відносного видовження при розтягуванні чи стисканні волокон елементів зварної ферми в моделюючо-розрахунково-програмному комплексі SolidWorks визначають як зміна довжини δ_L (абсолютне видовження) до вихідної (первинної) довжини елементів L (рис. 2.2). Як наслідок, можна зробити висновок що видовження – безрозмірна величина і доступна вона тільки при розрахунку методом повної розрахункової моделі. Відносне видовження при стиску чи розтягу визначають за формулою L / δ_L .

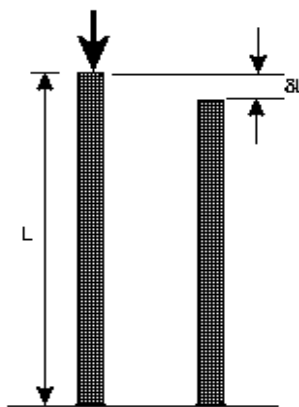


Рисунок 2.2 – Абсолютна деформація при стисканні

Програма SolidWorks пропонує отримати 12 типів результатів дослідження відносної деформації, які наведено в табл. 2.4.

Таблиця 2.4 – Опис типів результатів дослідження відносної деформації

№ типу	Позначення	Найменування
1	EPSX	Нормальна деформація в напрямку X вибраної опорної геометрії,
2	EPSY	Нормальна деформація в напрямку Y вибраної опорної геометрії,
3	EPSZ	Нормальна деформація в напрямку Z вибраної опорної геометрії,
4	GMXY	Деформація зсуву в напрямку Y у площині YZ вибраної опорної геометрії,
5	GMXZ	Деформація зсуву в напрямку Z в площині YZ вибраної опорної геометрії
6	GMYZ	Деформація зсуву в напрямку Z в площині XZ вибраної опорної геометрії
7	ESTRN	Еквівалентна деформація
8	SEDENS	Щільність енергії деформації (a)
9	ENERGY	Загальна енергія деформації (b)
10	E1	Нормальна деформація в першому головному напрямку
11	E2	Нормальна деформація в другому головному напрямку
12	E3	Нормальна деформація в третьому головному напрямку

Еквівалентна деформація $(ESTRN)=2 [(\varepsilon_1+\varepsilon_2)/3]^{(1/2)}$

$$\varepsilon_1 = 0.5 [(\text{EPSX} - \varepsilon^*)^2 + (\text{EPSY} - \varepsilon^*)^2 + (\text{EPSZ} - \varepsilon^*)^2]$$

$$\varepsilon_2 = [(\text{GMXY})^2 + (\text{GMXZ})^2 + (\text{GMYZ})^2] / 4$$

$$\varepsilon^* = (\text{EPSX} + \text{EPSY} + \text{EPSZ}) / 3$$

Програма SolidWorks пропонує отримати 7 типів результатів дослідження компонентів ферми на переміщень які наведено в табл. 2.5.

Таблиця 2.5 – Опис типів результатів дослідження переміщення

№ типу	Позначення	Найменування
1	UX	Переміщення в напрямку осі X системи координат
2	UY	Переміщення в напрямку осі Y системи координат
3	UZ	Переміщення в напрямку осі Z системи координат
4	URES	Результуюче зміщення
5	RX	Обертання в напрямку осі X вибраної системи координат
6	RY	Обертання в напрямку осі Y вибраної системи координат
7	RZ	Обертання в напрямку осі Z вибраної системи координат

2.2 Методика дослідження ферми при статичних навантаженнях

У ході дослідження застосовано комплекс профільних інженерно-конструкторських і загальнонаукових методів: метод скінчених елементів, аналогом якого виступає метод спрощеної розрахункової моделі та метод повної розрахункової моделі, він же тіловий аналіз дані методи доступні в програмному комплексі SolidWorks [21].

Поняття статичної міцності насамперед стосується роботи конструкцій з сталі під дією статичних навантажень конструкції. Такими конструкціями в даному випадку є вага покрівельного настилу, обладнання та снігові навантаження, які передають навантаження на вузли покрівельних несучих ферм. Руйнування може відбутися при дії статичних навантажень.

В межах кваліфікаційної роботи розглядатимуться методи дослідження конструкції зварних ферм, на які діє статичне навантаження при незмінній розрахунковій схемі.

Для досягнення цієї мети потрібно дослідити фактичні умови роботи конструкції ферми і характер застосування кожного з методів розрахунку, прийнятого в межах кваліфікаційної роботи.

Фактичні умови роботи описують процес експлуатації, а саме його фізичний вплив на конструкцію, періодику навантажень [22].

У програмному комплексі SolidWorks Simulation можна виконувати розрахунок ферми не тільки за допомогою балкового аналізу (Beam Analysis), а й шляхом тілового аналізу (Solid Body Analysis).

Балковий аналіз (метод спрощеної розрахункової моделі) алгоритмічно базується на методі кінцевих елементів (МКЕ), що дозволяє аналізувати напружено-деформований стан конструкції. Цей метод використовується при розрахунку конструкцій в таких програмних комплексах як ЛІРА САПР, SCAD OFICE та ROBOT STRUCTURE ANALISE.

Тіловий аналіз ферми у SolidWorks Simulation передбачає створення і розрахунок детальної тривимірної моделі, де всі елементи мають реальні геометричні розміри, форму перерізу та фізико-механічні властивості.

Даний метод дослідження зварних ферм дозволяє отримати точні дані про:

- локальні напруження;
- деформації в конкретних точках конструкції;
- концентрацію напружень у місцях зварних з'єднань, перетинів стрижнів тощо;
- поведінку елементів під дією складних навантажень.

Тіловий аналіз застосовується у випадках, коли необхідно детально дослідити напружено-деформований стан ферми, враховуючи геометричні особливості та реальні ефекти місцевої концентрації напружень.

SolidWorks Simulation дозволяє візуалізувати:

- карти напружень за Мізесом (Von Mises Stress);
- графіки переміщень;
- місця потенційного зародження тріщин;
- зони можливого перевищення допустимих напружень.

Однак програмний комплекс SolidWorks Simulation дає можливість провести детальніший аналіз конструкції методом тілового аналізу (повної розрахункової моделі).

2.3 Порядок проведення комп'ютерно моделюючого експерименту методом спрощеної розрахункової моделі

У середовищі SolidWorks для виконання розрахунків навантажень і переміщень під час статичного навантаження ферми застосовується модуль SolidWorks Simulation (раніше відомий як COSMOSWorks) [23, 24].

При дослідженні ферми в моделюючо-розрахунковій програмі потрібно виконати такий порядок дій:

1. Створення ескізу ферми (рис. 2.3);

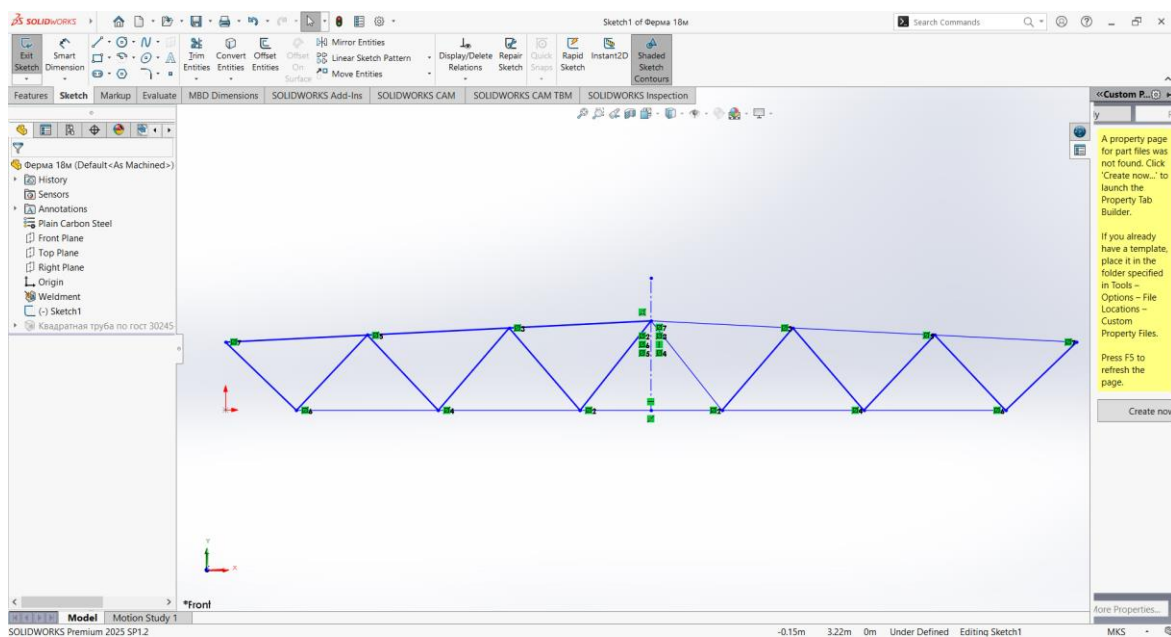


Рисунок 2.3 – Процес створення ескізу (схеми) ферми

2. Процес моделювання просторової моделі ферми (рис. 2.4);

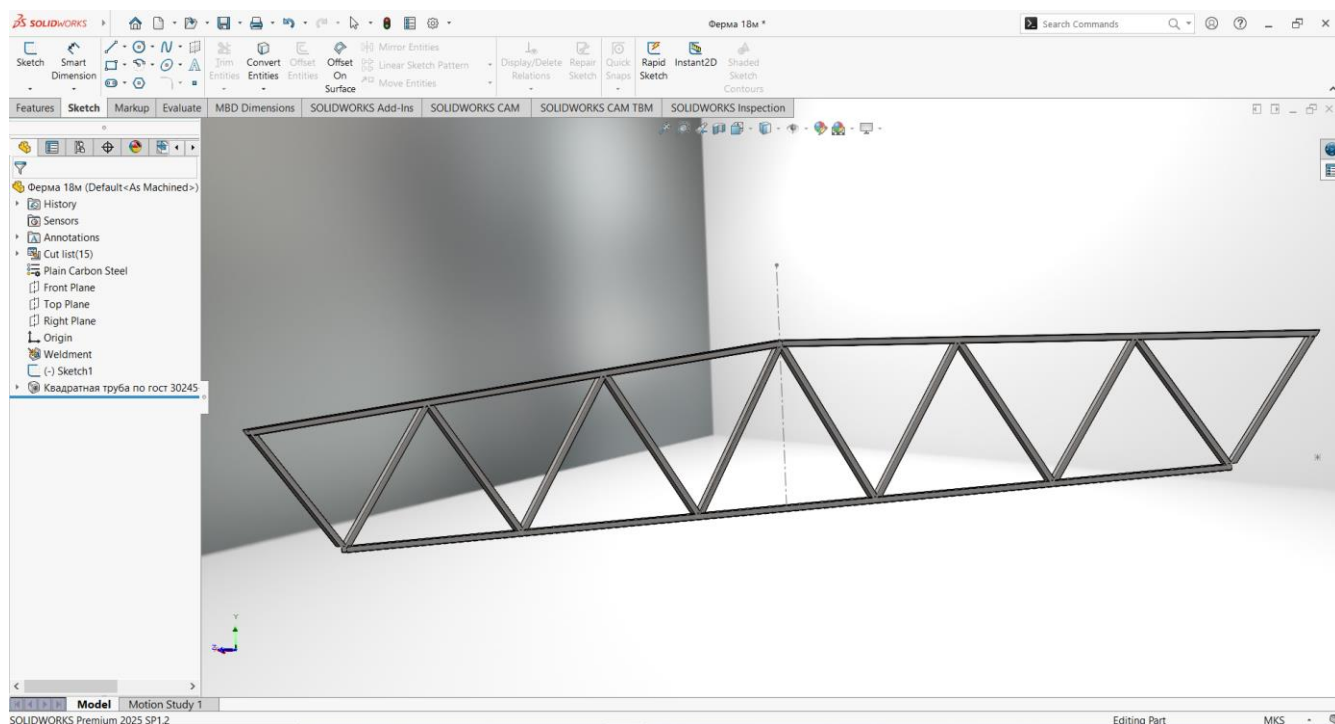


Рисунок 2.4 – Проце створення розрахункової моделі ферми

3. Процес генерації статичного дослідження в межах лінійних деформацій (рис. 2.5);

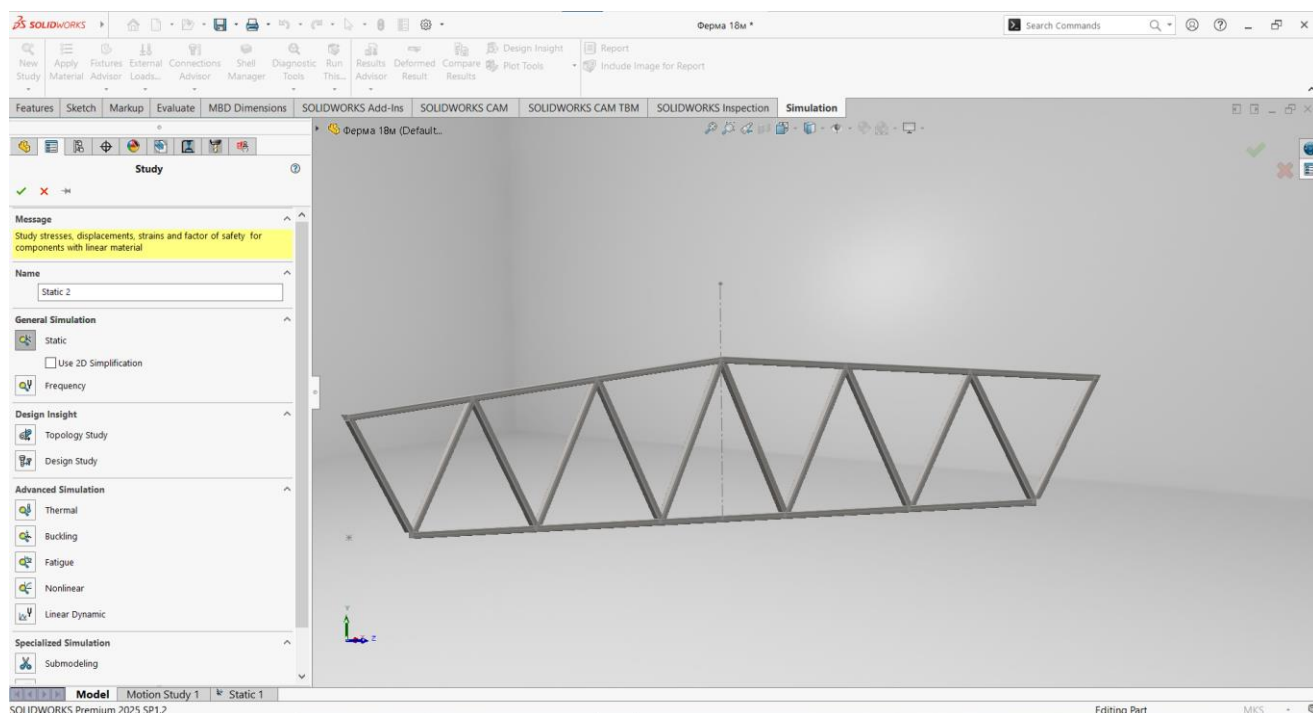


Рисунок 2.5 – Процес генерації статичного дослідження в межах лінійних деформацій

3. Вибір та присвоєння характеристик матеріалу (рис. 2.6);

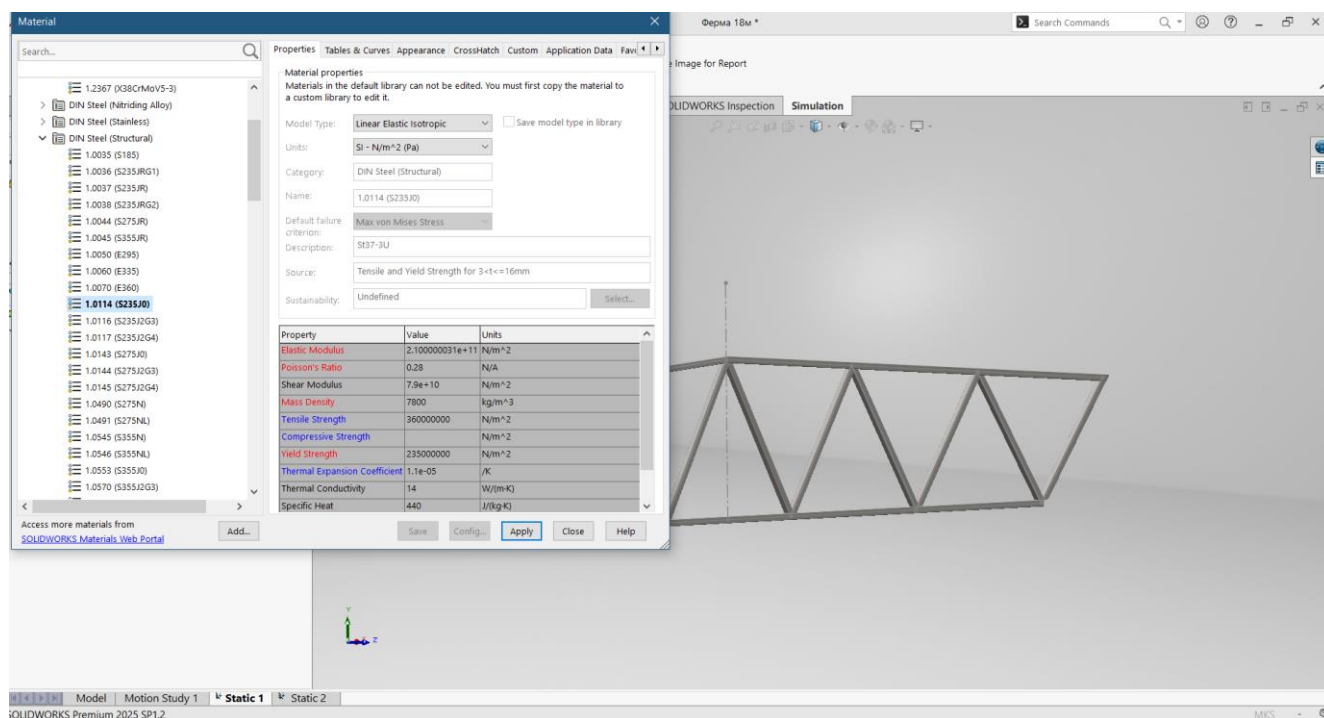


Рисунок 2.6 – Процес вибору та присвоєння характеристик матеріалу

4. Процес присвоєння місця і варіанту кріплення ферми (опорних вузлів) (рис. 2.7);

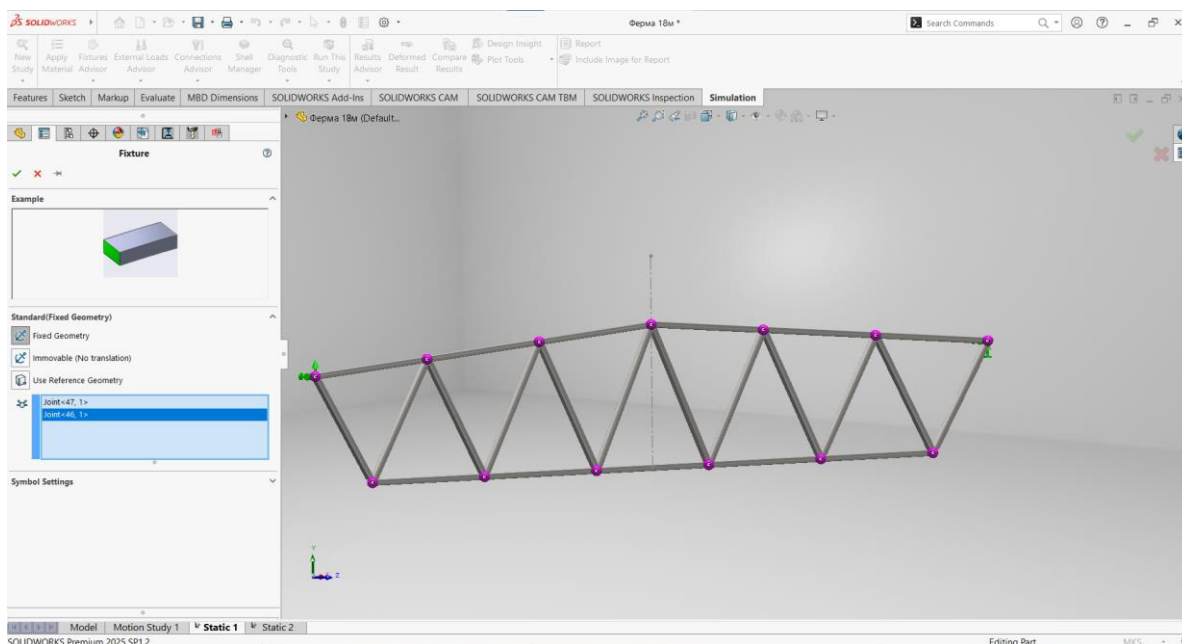


Рисунок 2.7 – Процес присвоєння місця і варіанту кріплення ферми

5. Задання місця, варіанту і розміру навантаження на вузли ферми (рис. 2.8);

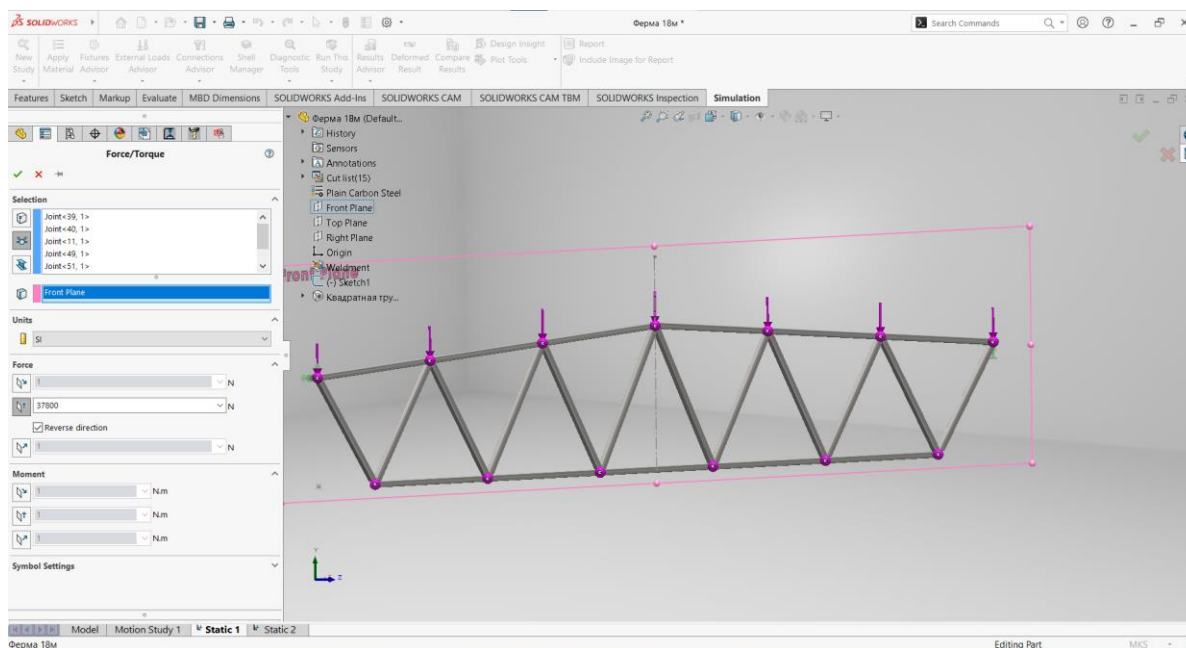


Рисунок 2.8 – Процес присвоєння місця, варіанту і розміру навантаження на вузли ферми

6. Створення контрольної сітки розрахункової моделі (рис. 2.9);

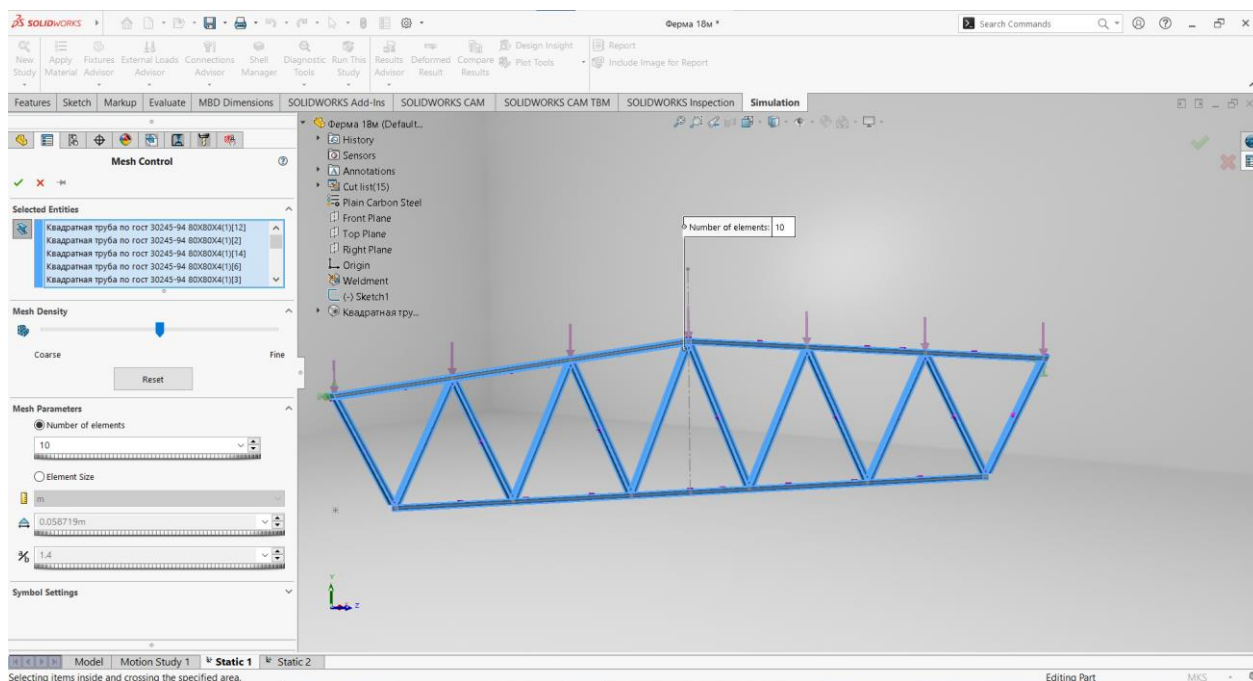


Рисунок 2.9 – Процес створення контрольної сітки розрахункової моделі

8. Створення детальної сітки елементів моделі на дрібні деталі (рис. 2.10);

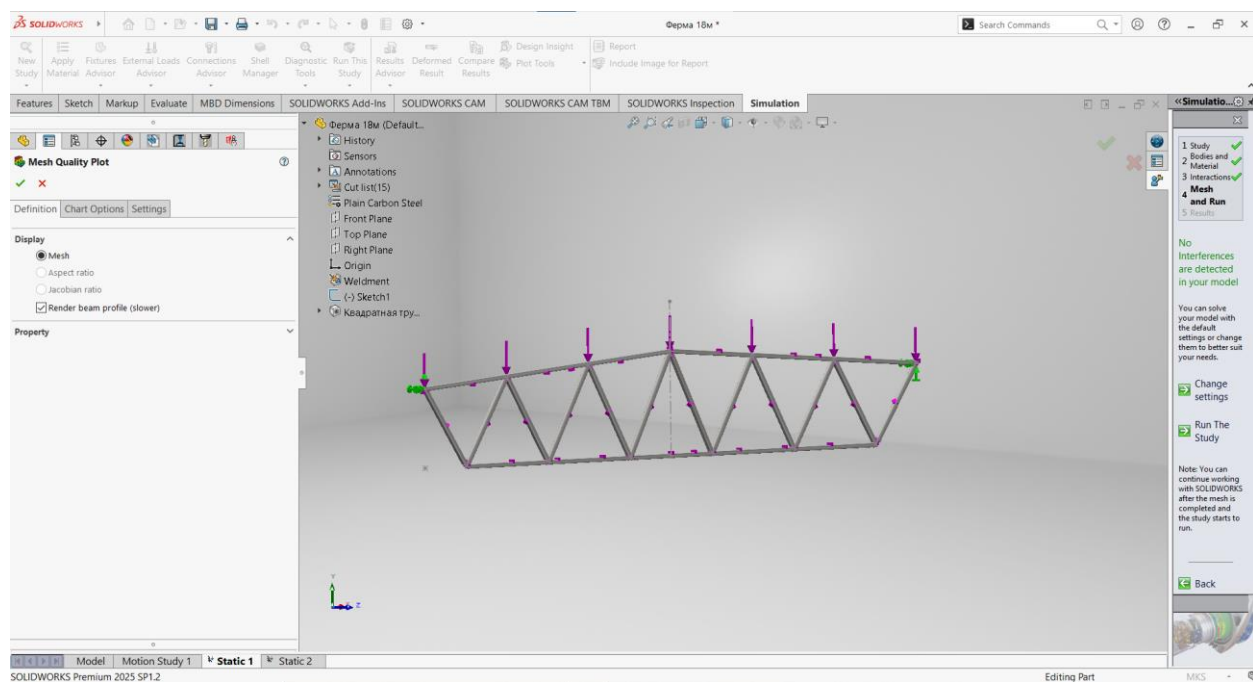


Рисунок 2.10 – Процес створення детальної сітки розбиття елементів моделі на дрібні деталі.

9. Розпочати дослідження.

10. Структурування отриманих результатів досліджень для формування у звіті

2.4 Порядок проведення комп'ютерно моделюючого експерименту методом повної розрахункової моделі

Для дослідження ферми методом повної розрахункової моделі в моделюючо-розрахунковій програмі SolidWorks потрібно здійснити такий перелік дій як:

1. Створити ескіз ферми (рис. 2.11);

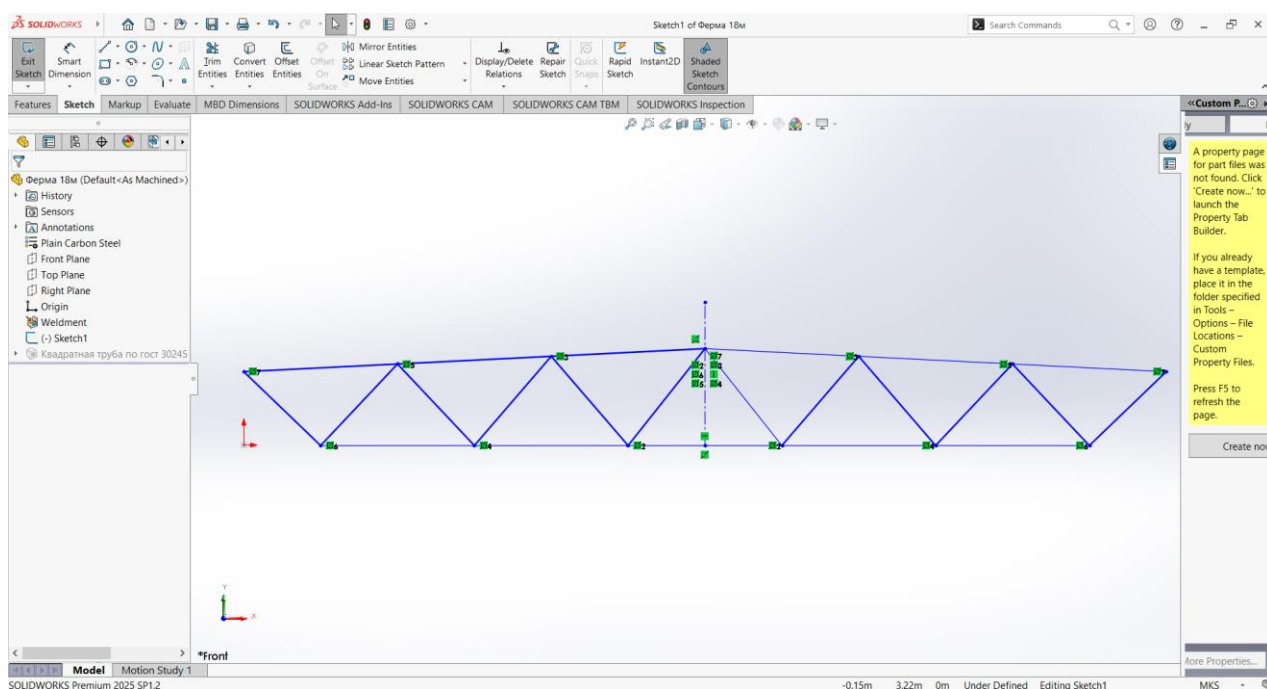


Рисунок 2.11 – Процес створення розрахункової схеми (ескізу) ферми

2. Замоделювати розрахункову модель зварної ферми (рис. 2.12);

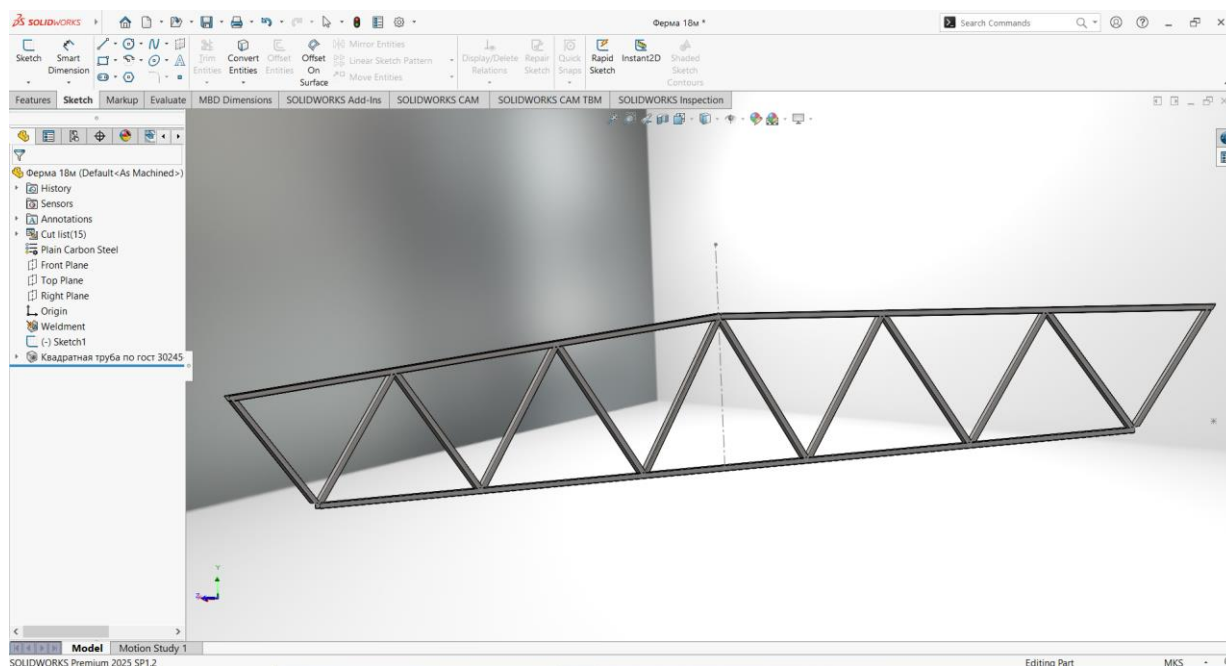


Рисунок 2.12 – Процес моделювання розрахункової моделі ферми

3. Створити ескіз вузлів ферми на прикладі опорного вузла (рис. 2.13);

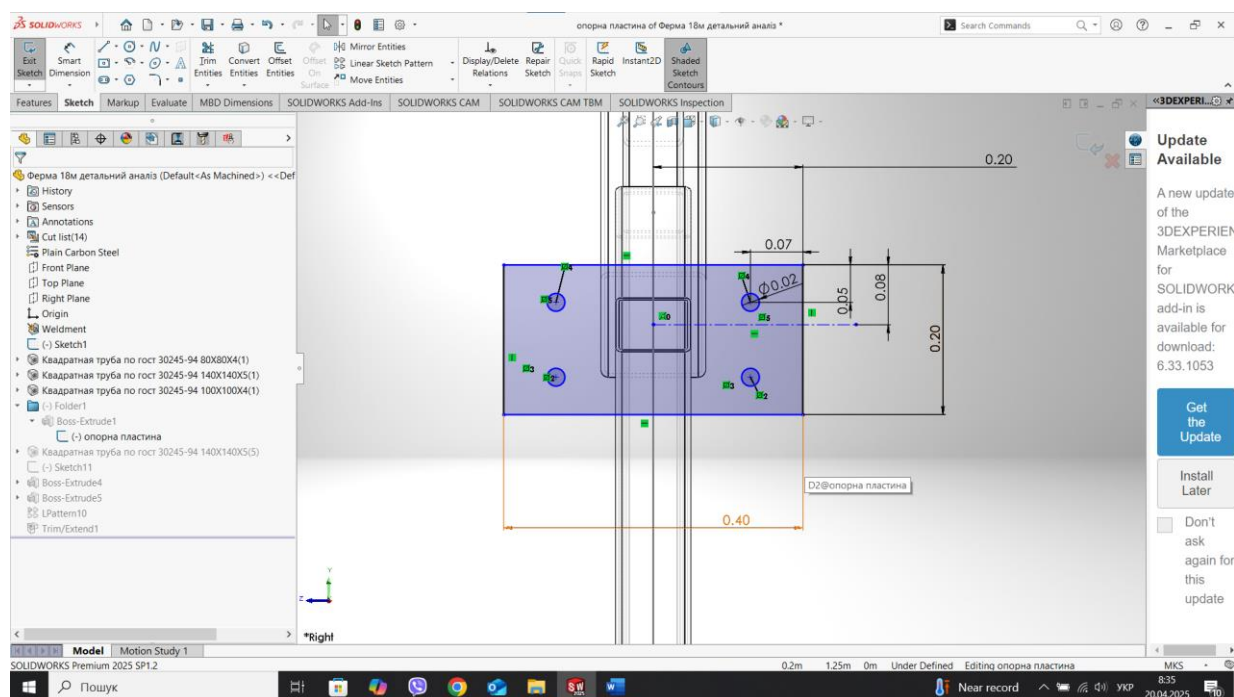


Рисунок 2.13 – Процес створення ескізу вузлів ферми на прикладі опорного вузла ферми

4. Створити пластини за допомогою команди «Boss-Extrude» на основі ескізу (рис. 2.14);

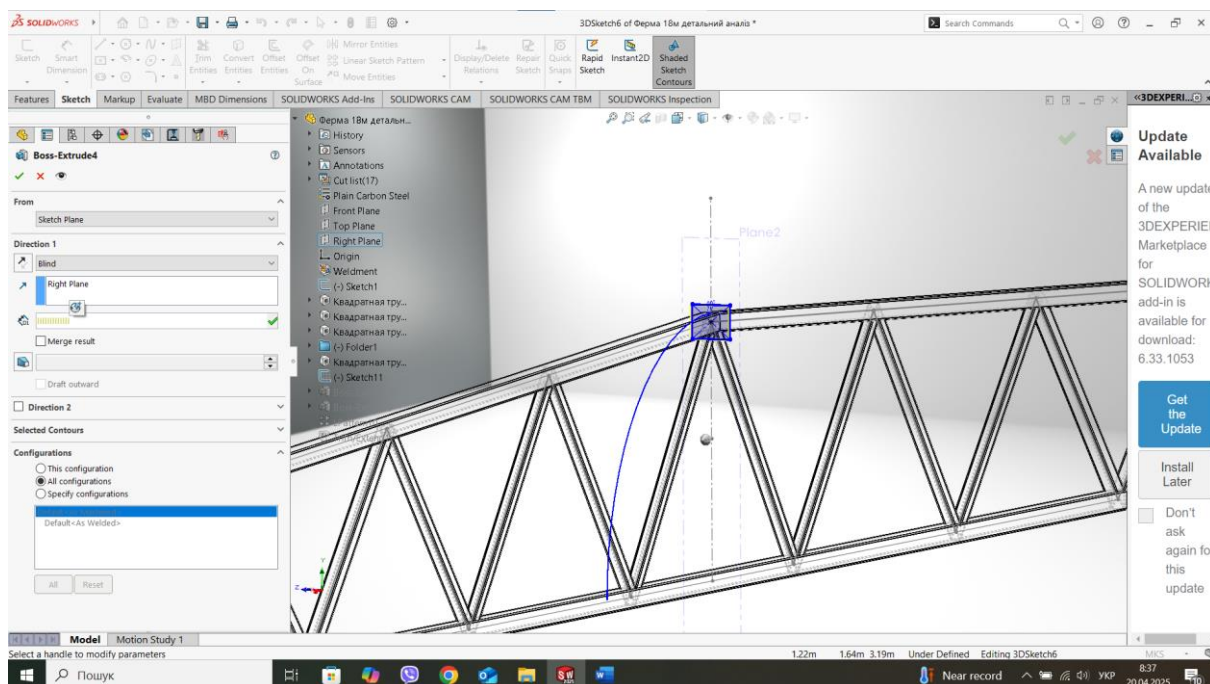


Рисунок 2.14 – Процес створення пластин за допомогою команди «Boss-Extrude» на основі ескізу

5. Створити зварні з'єднання між елементами ферми (рис. 2.15);

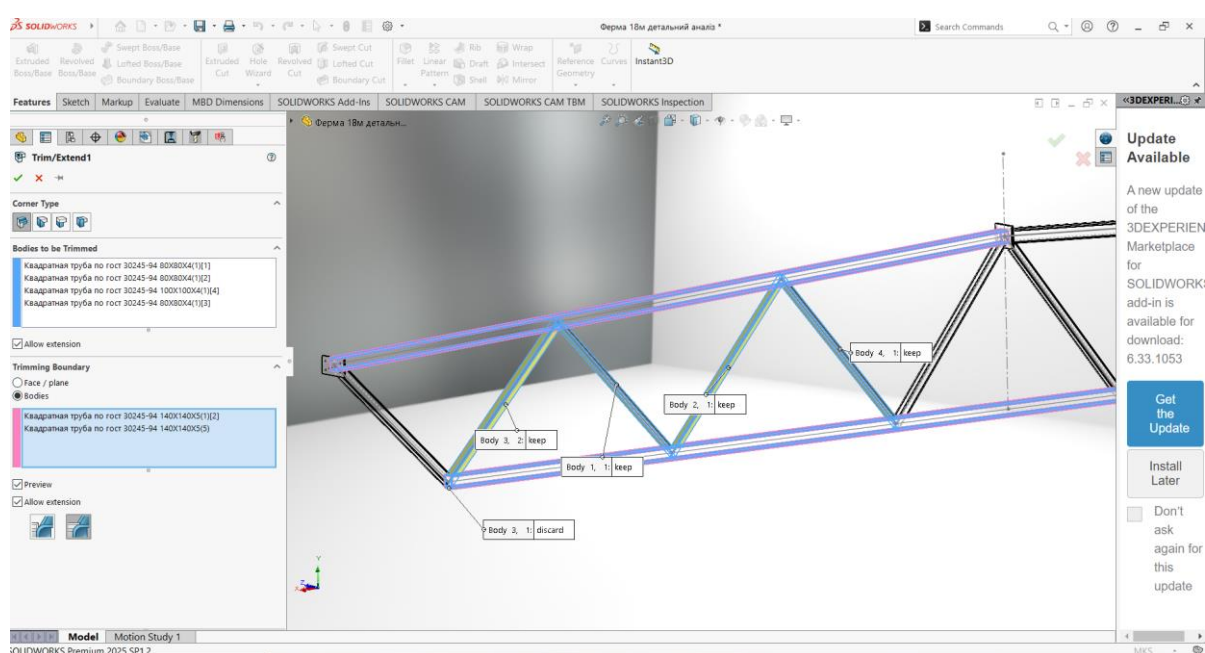


Рисунок 2.15 – Процес створення зварних з'єднань між елементами ферми.

6. Згенерувати статичне дослідження (рис. 2.16);

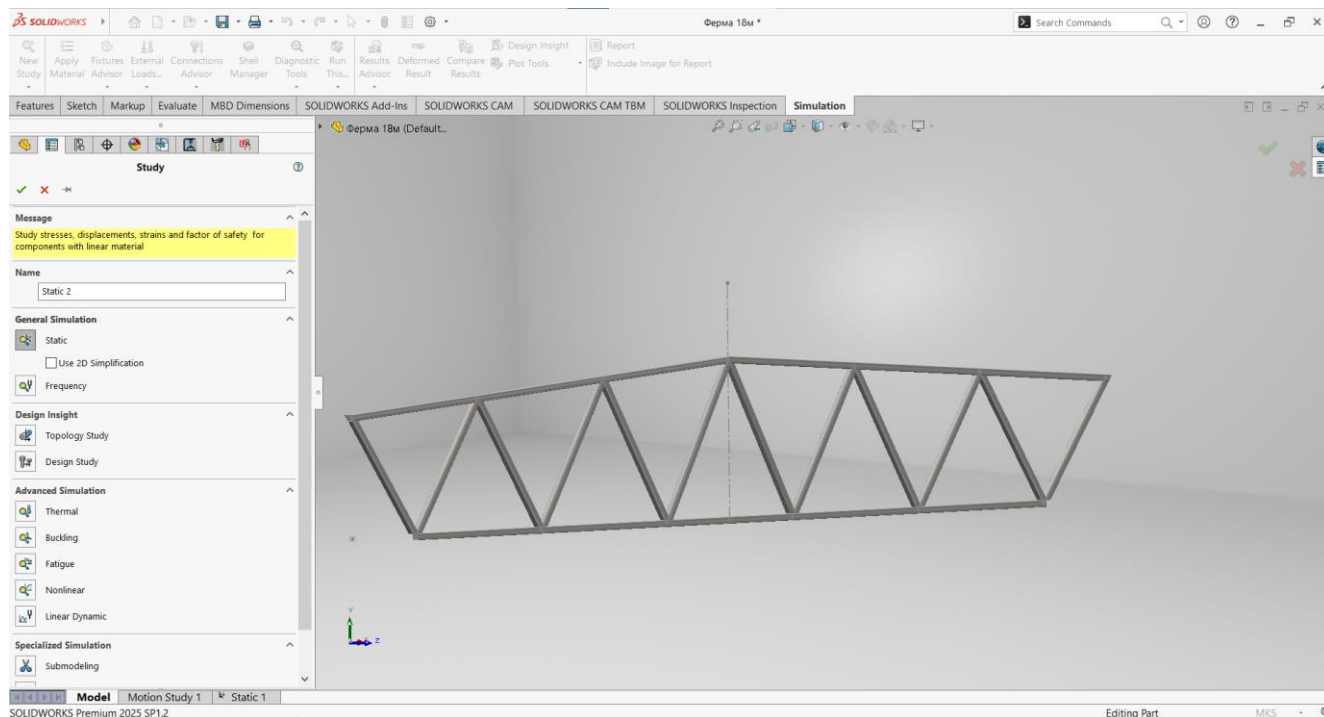


Рисунок 2.16 – Процес генерації статичного дослідження в межах лінійних деформацій

7. Перетворити стержневі елементи спрощеної розрахункової моделі на просторові елементи моделі «SolidBody» (рис. 2.17);

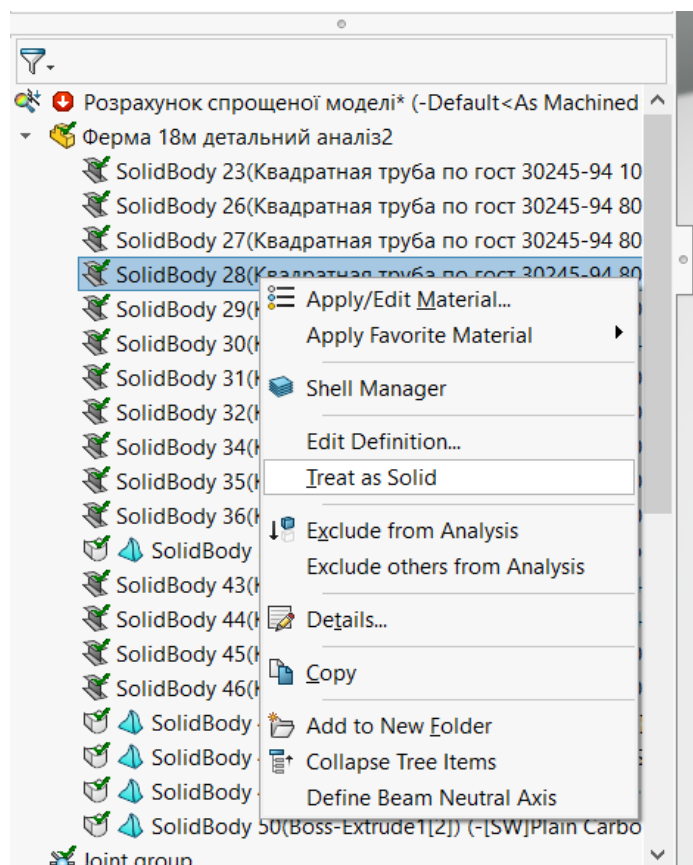


Рисунок 2.17 – Процес перетворення стержневих елементів спрощеної розрахункової моделі на просторові елементи моделі

8. Задати характеристики матеріалу елементів конструкції (рис. 2.18);

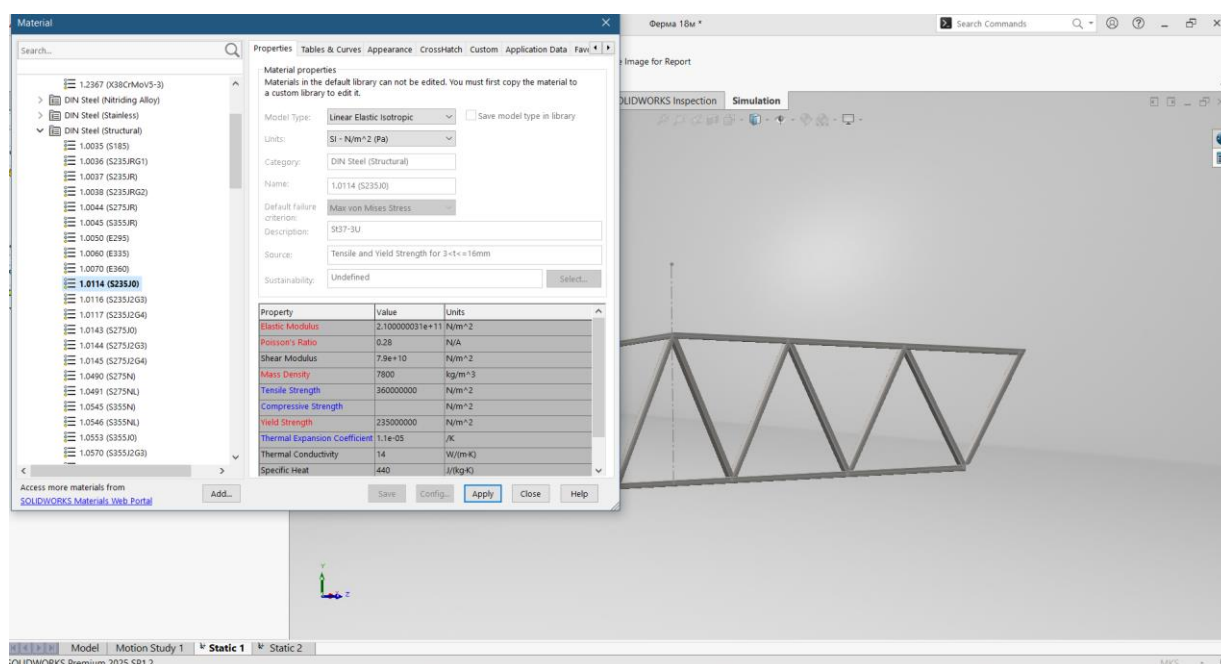


Рисунок 2.18 – Процес вибору та присвоєння характеристик матеріалу

9. Присвоїти місця і варіанти кріплення ферми, в рамках кваліфікаційної роботи прийнято болтове кріплення ферм до колони (рис. 2.19);

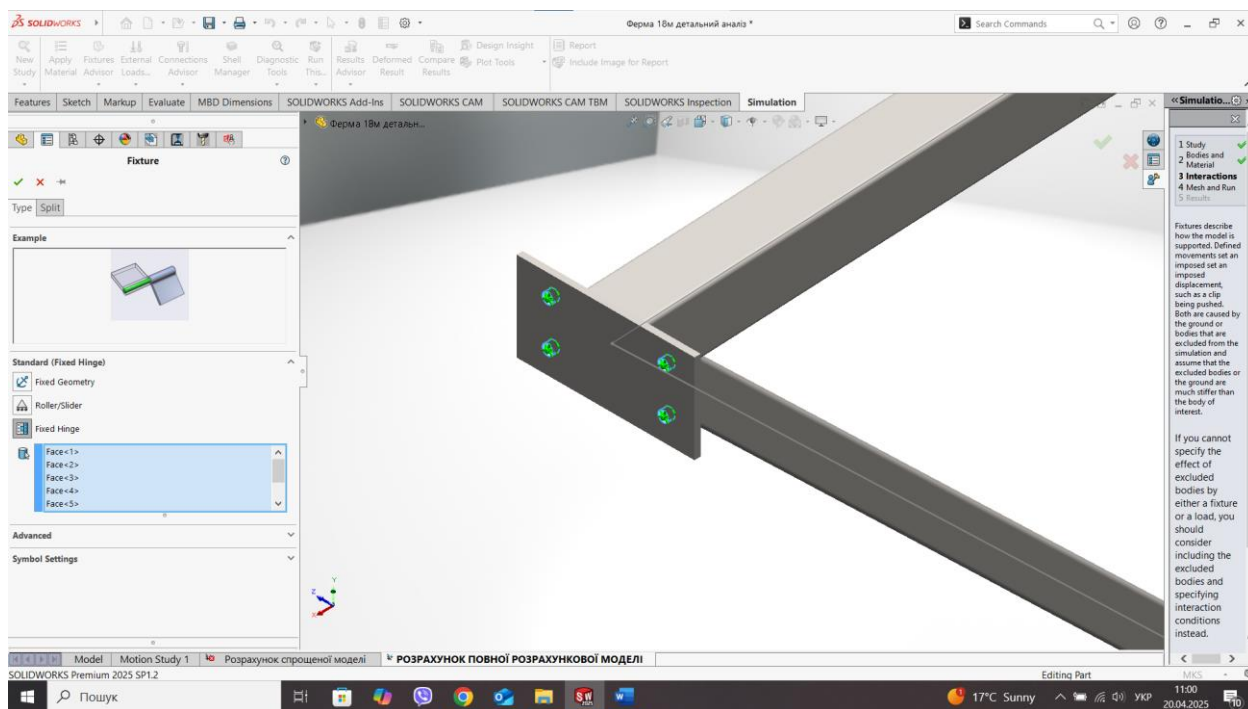


Рисунок 2.19 – Візуалізація присвоєння місця і варіанту кріплення ферми

10. Задати тип і величину навантажень у відповідні вузли (рис. 2.20);

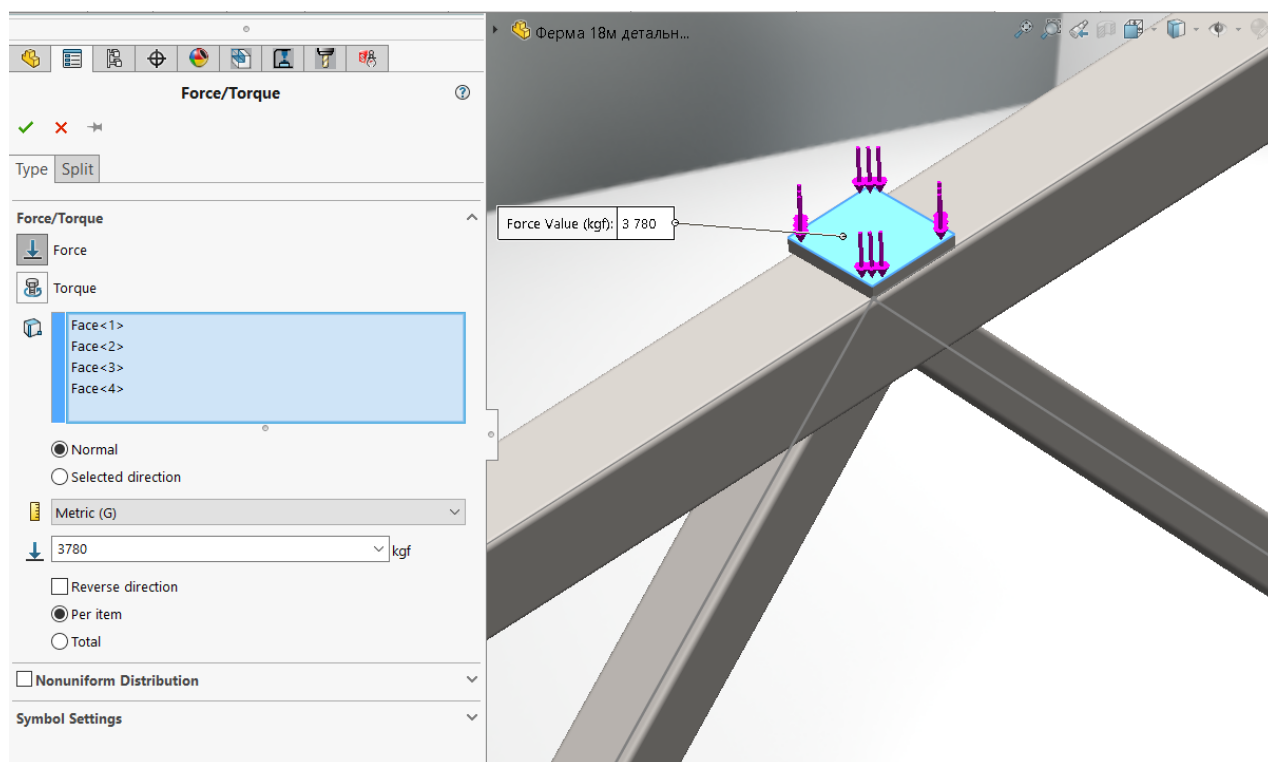


Рисунок 2.20 – Процес завдання тип і величину навантажень у відповідні вузли

11. Створити контрольну сітку розрахункової моделі (рис. 2.21);

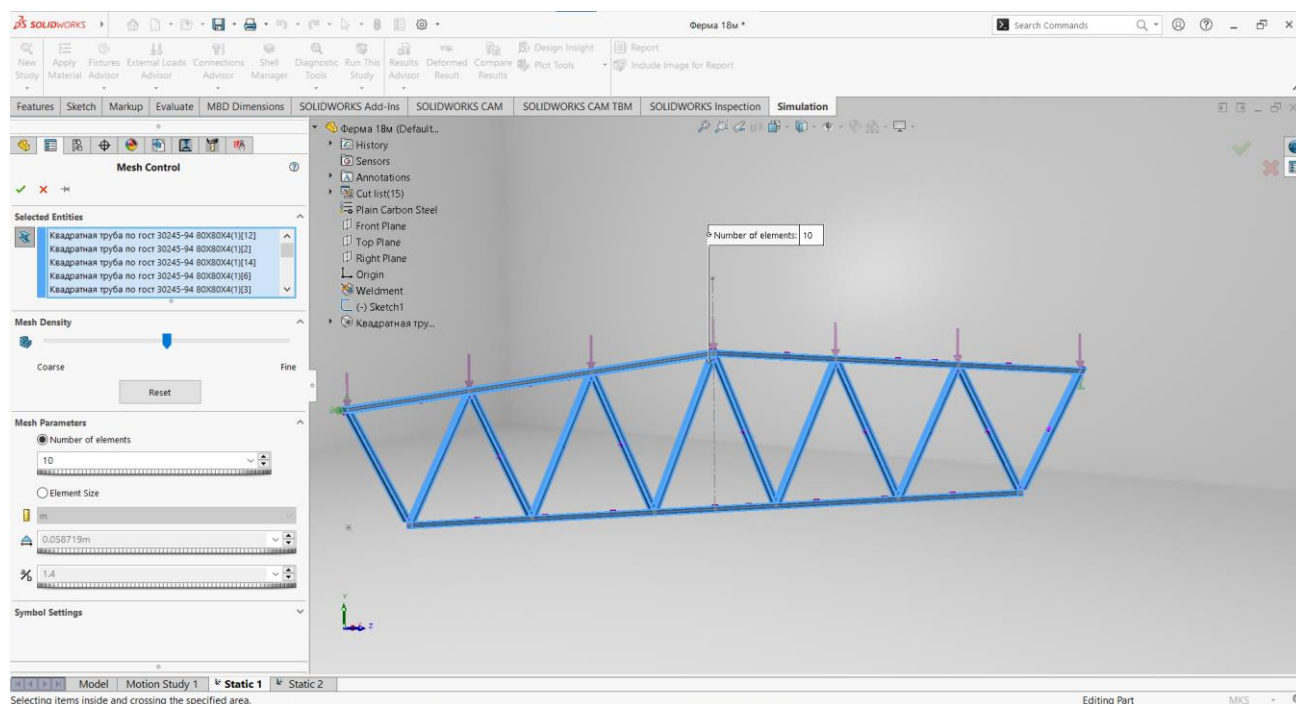


Рисунок 2.21 – Процес створення контрольної сітки розрахункової моделі

12. Створити сітку деталізації елементів моделі (рис. 2.22);

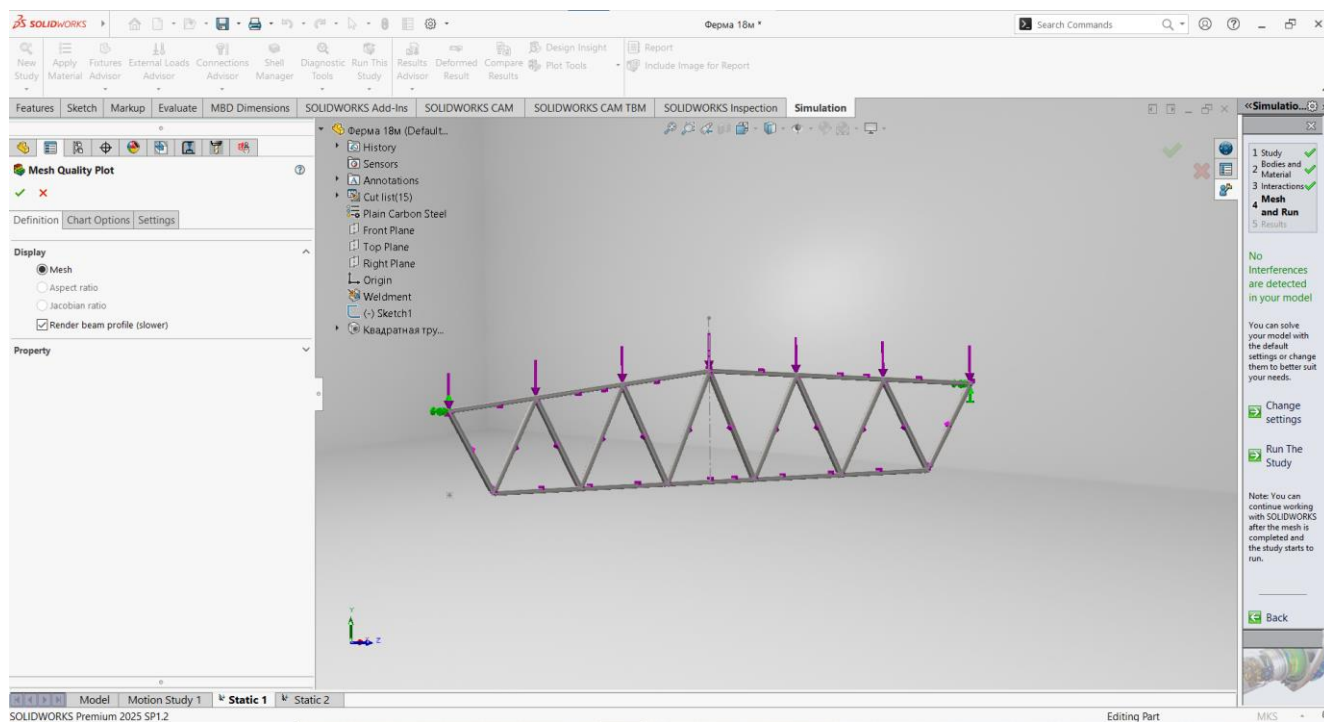


Рисунок 2.22 – Процес створення сітки деталізації елементів моделі

Приклад готової створеної сітки наведено на рис 2.23

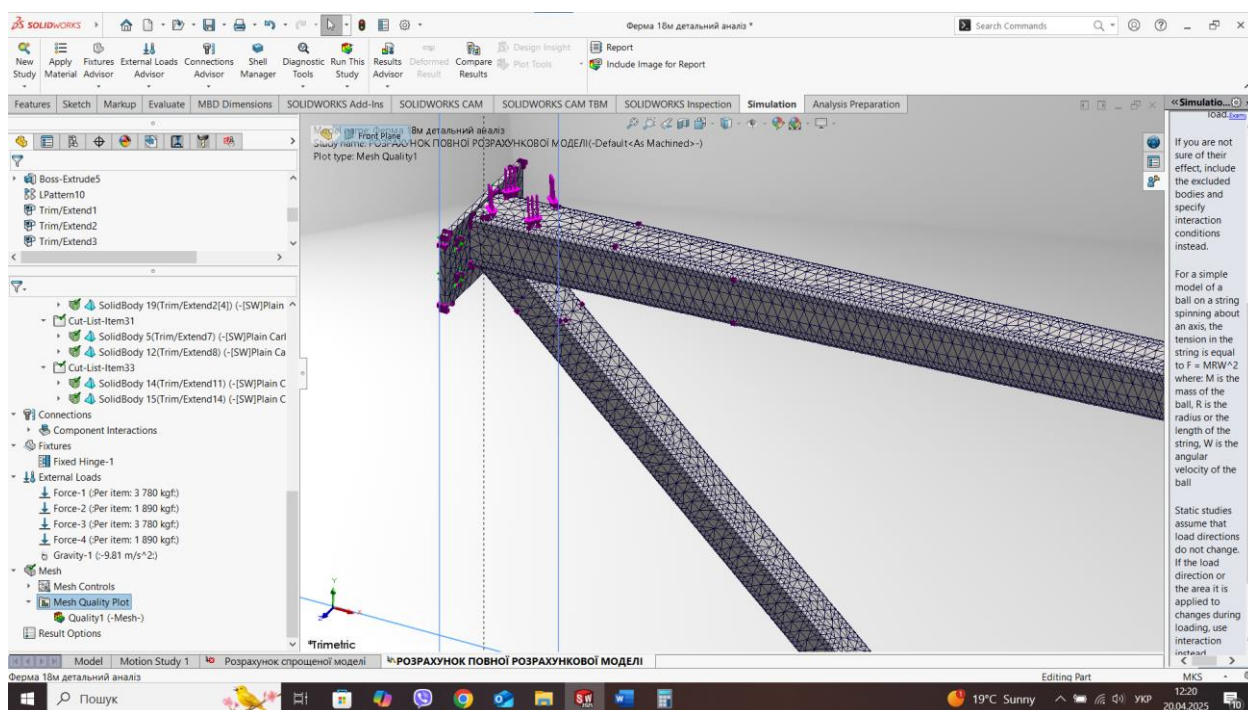


Рисунок 2.23 – Результат створеної сітки деталізації елементів ферми

13. Налаштувати одиниці вимірювання та графічної візуалізації результатів дослідження (рис. 2.24);

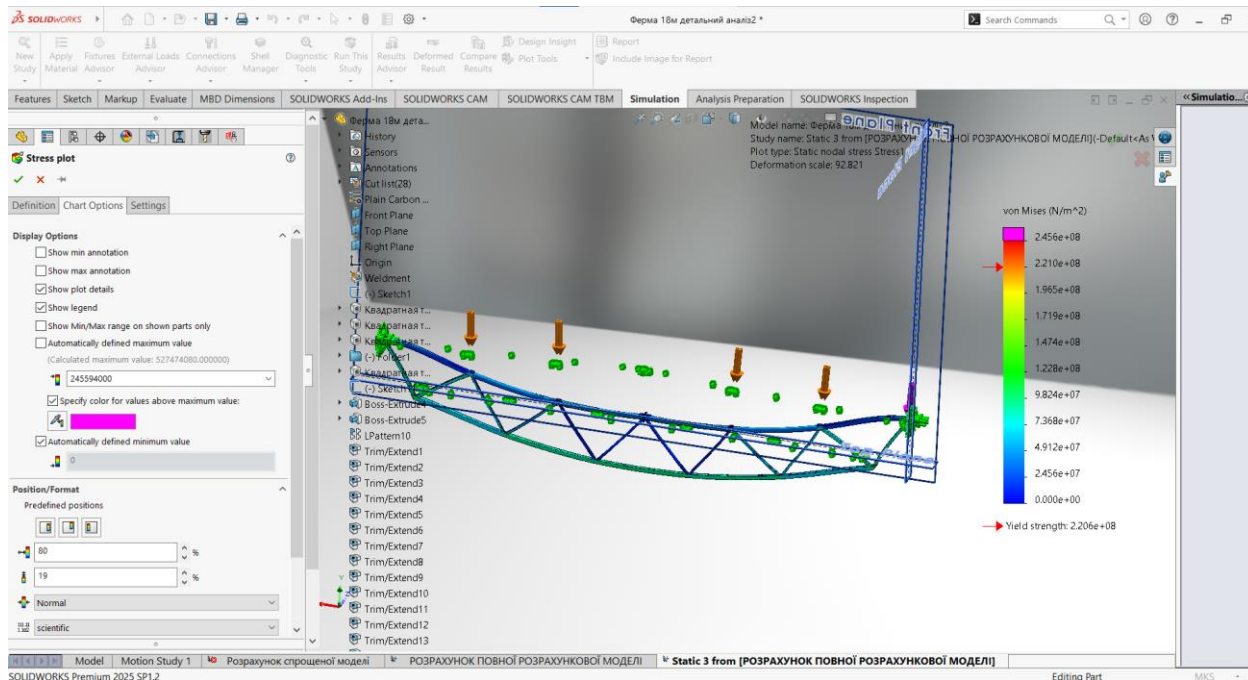


Рисунок 2.24 – Процес налаштування одиниць вимірювання та графічної візуалізації результатів дослідження

14. Розпочати дослідження.

15. Структурування отриманих результатів досліджень для формування у звіт

2.5 Висновок за розділом 2

1. Новітні прикладні програмні пакети дозволяють здійснювати розрахунок конструкцій з урахуванням поєднань різних статичних навантажень, а також враховувати технологічні та теплові впливи на зварні ферми.

2. У результаті аналізу функціональних можливостей програмного комплексу SolidWorks досліджено методики проведення статичних аналізів конструкцій різних типів на прикладі зварної ферми.

3. Розглянуто два підходи до аналізу зварної ферми під дією статичних навантажень і визначено ключові методичні положення, необхідні для подальших розрахунків фермових конструкцій за допомогою програмного комплексу SolidWorks.

РОЗДІЛ 3

ОСОБЛИВОСТІ ПОВЕДІНКИ ДОСЛІДЖУВАЛЬНОЇ ФЕРМИ

3.1 Поведінка конструкції ферми при дії статичних навантажень при розрахунку методом спрощеної моделі

Дослідження виконано в області пружних деформацій із застосуванням методу статичного лінійного аналізу. У розрахунках враховано екстремальні снігові навантаження, масу покрівельних матеріалів, власну вагу прогонів та зварної ферми. Також ураховано коефіцієнт запасу міцності. Вибрану розрахункову схему серійної ферми подано на рисунку 3.1.

Схема кроквяної ферми Ф18

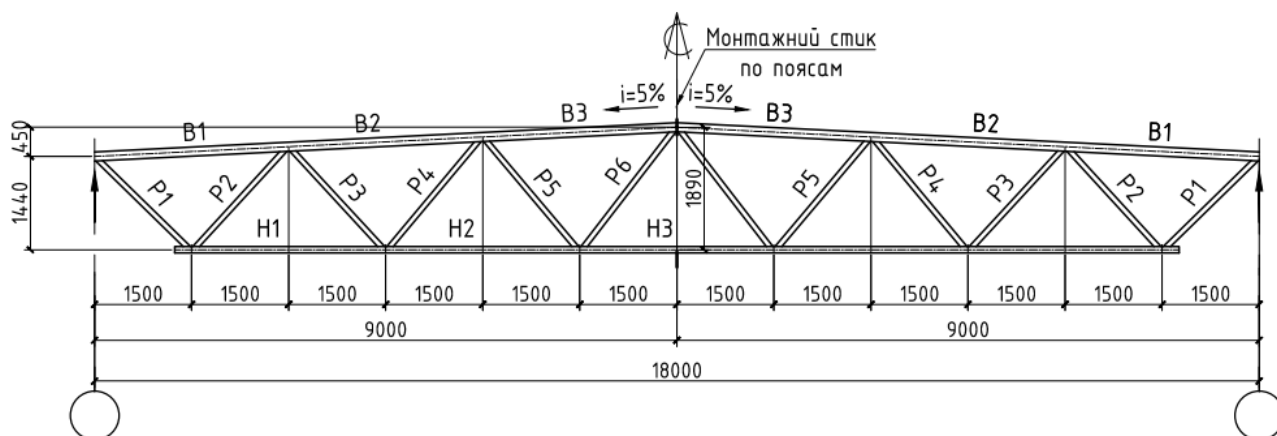


Рисунок 3.1 – Розрахункова схема досліджуваної металевої підкроквяної ферми

Верхній пояс конструкції виготовлено з гнутого зварного квадратного профілю розміром 140×140×5 мм. Нижній пояс також сформовано з гнутого зварного квадратного профілю аналогічного перерізу — 140×140×5 мм. Опорні розкоси виконані із профілю квадратного перерізу 100×100×4 мм, вигнутого та зварного типу. Проміжні розкоси виготовлено із гнутого зварного квадратного профілю розміром 80×80×4 мм.

Схематичне зображення навантаження ферми представлено на рисунку 3.2. Значення навантаження на крайові та центральні вузли зварної ферми становить 18900 Н, тоді як на проміжні вузли припадає навантаження величиною 37 800 Н.

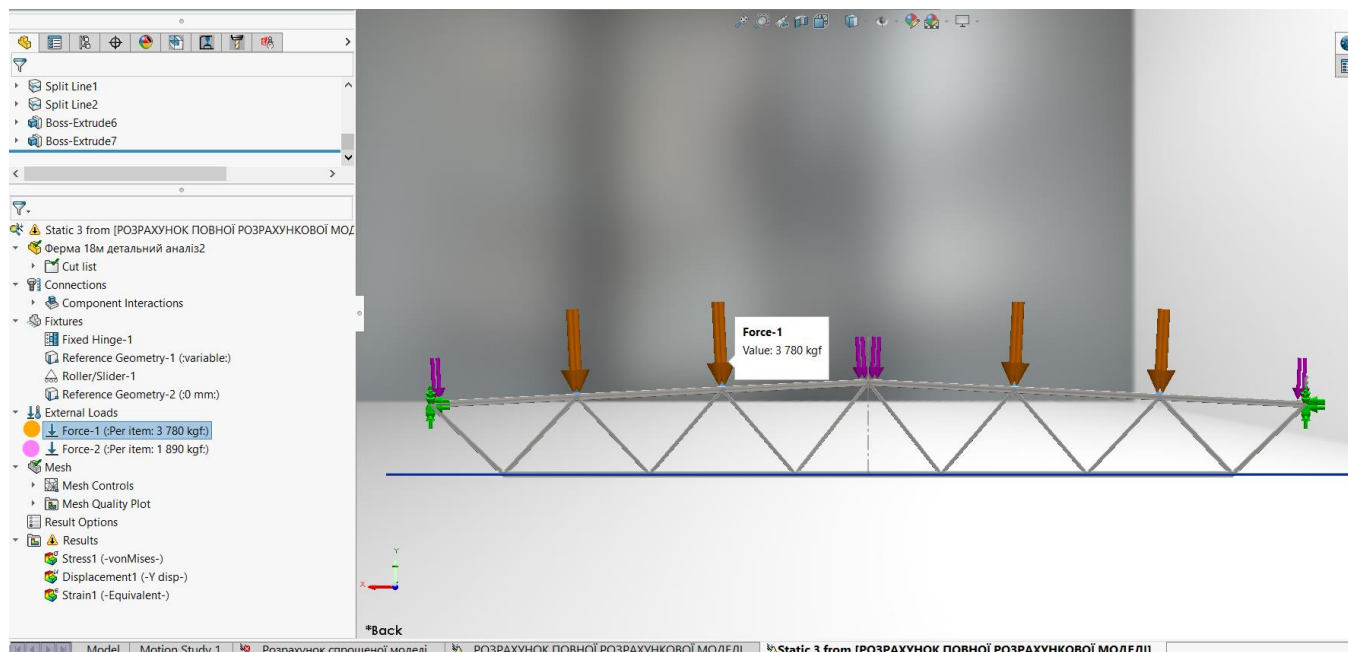


Рисунок 3.2 – Схема місць прикладання та розмір навантажень до вузлів досліджувальної ферми

Ферма встановлюється на вертикальні фланці, що спираються на полиці каркасних залізобетонних колон будівлі, та фіксується у проєктному положенні за допомогою зварного з'єднання із закладними елементами й монтажними болтами. Розрахунково-просторову модель вузла кріплення, створену в середовищі SolidWorks, представлено на рисунку 3.3.

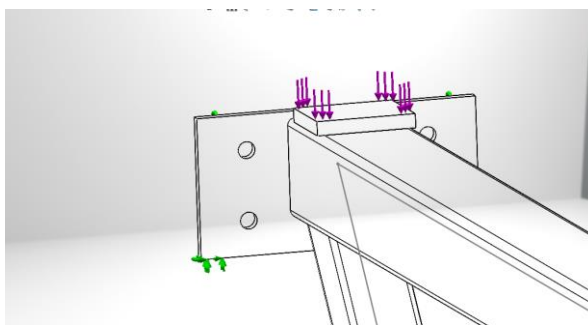


Рисунок 3.3 – Розрахунково просторова модель вузла прийнятої серійної ферми

Приклад готового вузла опирання ферми на колону подано на рис. 3.4.

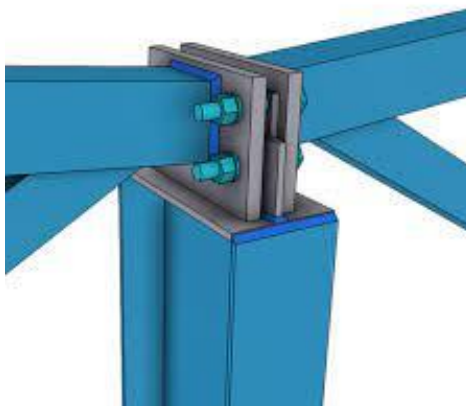


Рисунок 3.4 – Схема запроєктованого опорного вузла прийнятої серійної ферми

Проведено аналіз методом спрощеної моделі ферми в програмному комплексі SolidWorks. Одержано такі результати:

- лінійна модель ферми з графічними результатами дослідження;
- табличні дані напружено-деформаційного стану для обраних елементів ферми;
- графіки сформовані по точках найбільших локалізацій напружень в вузлах ферми.

Розподіл напружень в фермі подано на рис. 3.5.

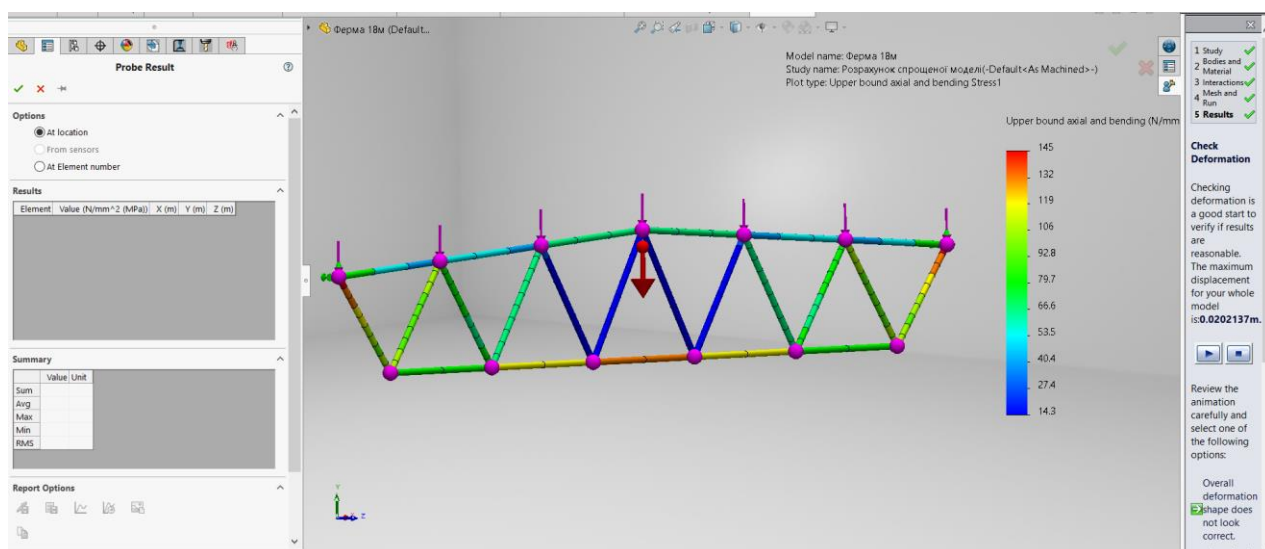


Рисунок 3.5 – Графічне відображення напружень в стержнях серійної ферми

Для формування результатів досліджень необхідно задати точки (датчики) максимальних локалізацій напружень вздовж елементів ферм (рис. 3.6.). Після чого координати даних точок (датчиків) зберігаються для збору інших показників таких як прогин, відносне видовження та запас несучої здатності елементів ферми.

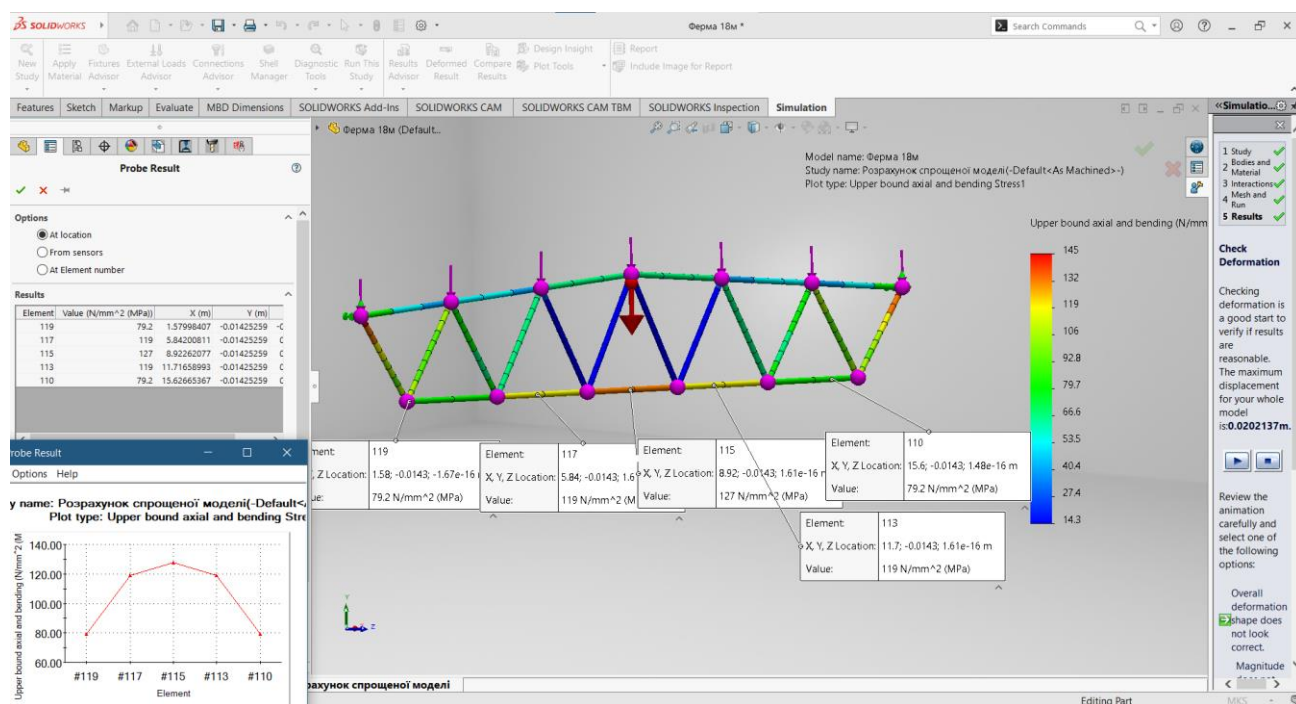


Рисунок 3.6 – Графічне відображення зміни напружень в нижньому поясі прийнятої для дослідження ферми

Далі за допомогою збережених точок (датчиків) сформовано графік прогину (преміщень елементів ферми по осі Y мм) елементів ферми (рис. 3.7.).

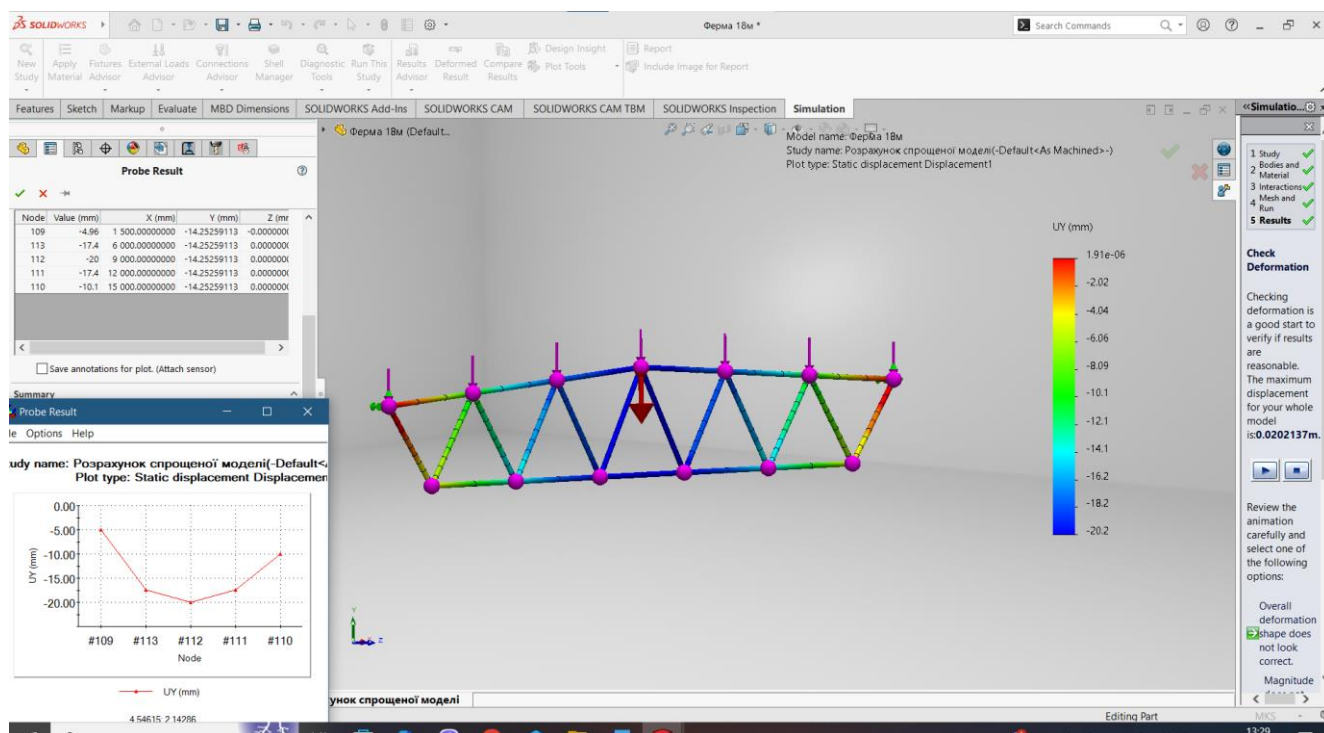


Рисунок 3.7 – Графічне відображення переміщень елементів ферми відносно осі Y

Візуалізацію зміни переміщення нижнього поясу відносно осі Y (прогин) вздовж елемента ферми подано на рис. 3.8.



Рисунок 3.8 – Діаграма прогину в нижньому поясі ферм від статичних навантажень

Виявлено максимальний прогин 20 мм на середині ферми.

Візуалізацію зміни переміщення верхнього поясу вздовж осі У (прогин) вздовж елемента ферми подано на рис. 3.9.



Рисунок 3.9 – Діаграма прогину верхнього поясу ферм від статичних навантажень

Виявлено максимальний прогин 20,2 мм на середині ферми від 8,85 м до 9,15 м.

Візуалізацію зміни напружень верхнього поясу вздовж елемента ферми можна на рис. 3.10.

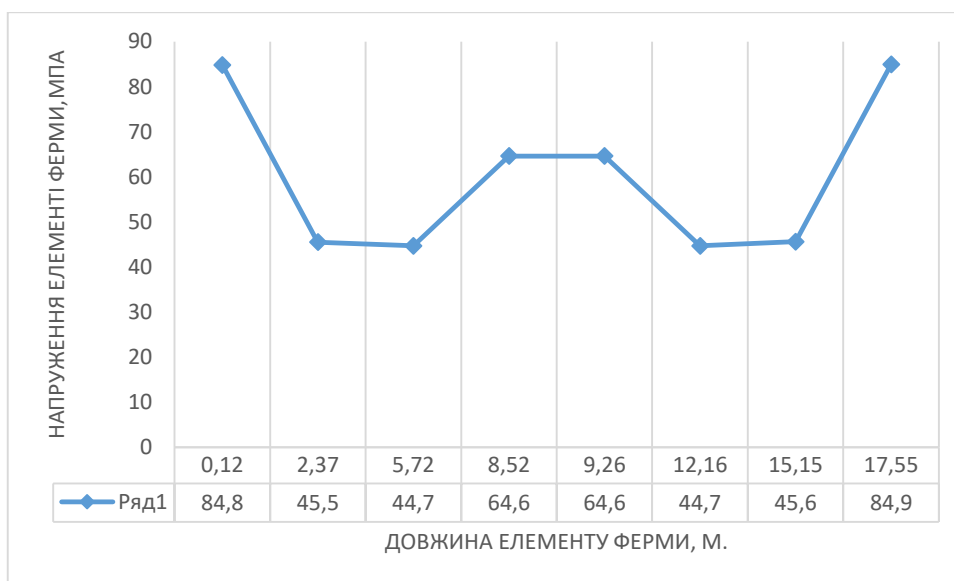


Рисунок 3.10 – Діаграма зміни напружень верхнього поясу ферм від статичних навантажень

Виявлено, максимальне напруження стиску формується на ділянках від 2,37 до 5,72 м, і від 12,16 до 15,15 м.

Візуалізацію зміни напружень нижнього поясу вздовж елемента ферми подано на рис. 3.11.



Рисунок 3.11 – Діаграма зміни напружень нижнього поясу ферми від статичних навантажень

Виявлено максимальні напруження 127 МПа у центральній частині ферми.

Візуалізацію зміни напружень в розкосі Р1 вздовж елемента ферми подано на рис. 3.12.

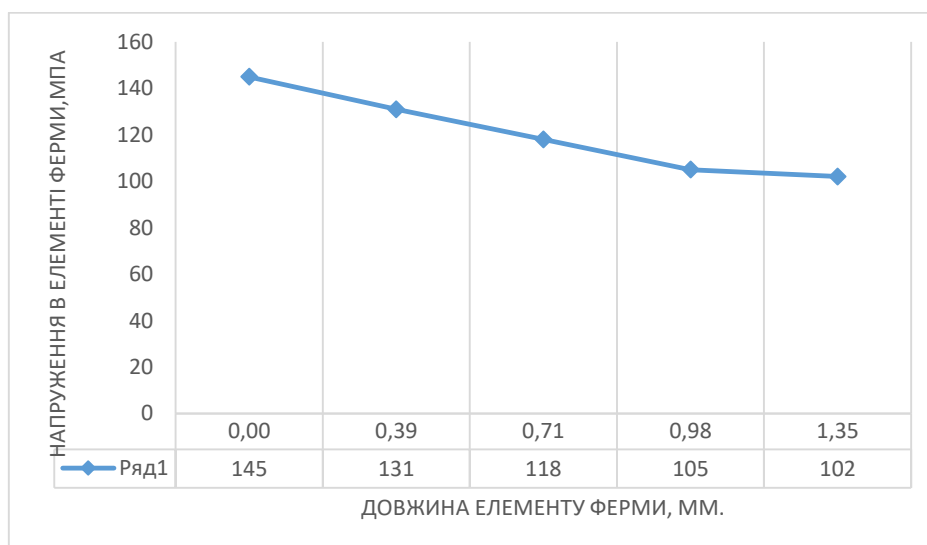


Рисунок 3.12 – Діаграма зміни напружень розкосі Р1 ферми від статичних навантажень

Виявлено що максимальні напруження 145 МПа припадають на початок елемента.

Візуалізацію зміни напружень в розкосі Р4 по довжині елемента ферми подано на рис. 3.13.

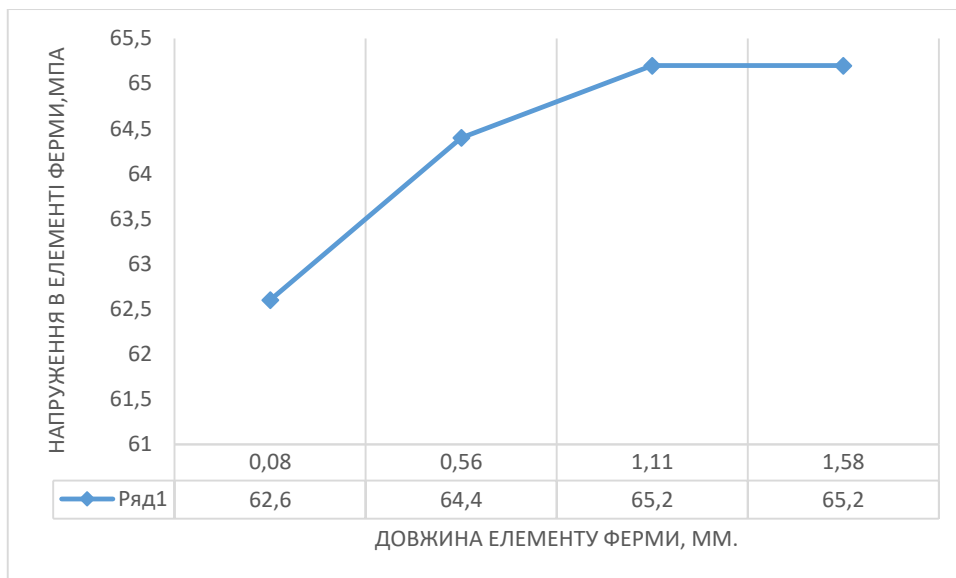


Рисунок 3.13 – Діаграма зміни напружень розкосі Р4 від статичних навантажень

Виявлено що напруження зростають від початку елемента, далі напруження залишається постійним 65,2 МПа.

З урахуванням сітки моделі та набору обмежень для переміщень і навантажень, програма для лінійного статичного аналізу працює таким чином:

- вона будує та розв’язує систему одночасних лінійних рівнянь рівноваги кінцевих елементів, що дозволяє обчислити компоненти переміщень у вузлах;
- далі використовується результат змін для обчислення компонент деформації, зокрема відносного видовження та прогину;
- на наступному етапі програма застосовує отримані дані про деформації та їх співвідношення з обчисленими напруженнями.

Комп’ютерно-моделючий розрахунок дає можливість проаналізувати результати в табличному вигляді та встановити залежність між переміщенням,

відносним видовженням та напруженнями в місцях розміщених контрольних датчиків. Результати для нижнього поясу ферми наведені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Числові значення напружень, переміщень по осі Y і відносного видовження вузлів по нижньому поясі ферми (місцях розміщень датчиків)

№ точки	Кординати точки, м			Напружен-ня σ , МПа.	Переміщен-ня вздовж осі Y (прогин),мм	Відносне видовжен-ня (URES)
	X	Y	Z			
109	1,58	-0,01	0,00	79,2	-4,96	6,05
113	5,84	-0,01	0,00	119	-17,4	17,49
112	8,92	-0,01	0,00	127	-20	20,02
111	11,72	-0,01	0,00	119	-17,4	17,50
110	15,63	-0,01	0,00	79,2	-10,1	10,48

Результати досліджень у верхньому поясі ферм подано в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Числові значення напружень, переміщень по осі Y і відносного видовження вузлів по верхньому поясі ферми (місцях розміщень датчиків).

№ точки	Кординати точки, м			Напруження σ , МПа.	Переміщення вздовж осі Y (прогин),мм	Відносне видовження (URES)
	X	Y	Z			
138	0,12	1,43	0	84,8	0	0,00
136	2,37	1,54	0	45,5	-5,96	5,99
133	5,72	1,71	0	44,7	-17,5	17,55
130	8,52	1,85	0	64,6	-20,2	20,19
99	9,26	1,86	0	64,6	-20,2	20,20
96	12,16	1,72	0	44,7	-17,8	17,84
93	15,15	1,57	0	45,6	-10,3	10,31
91	17,55	1,45	0	84,9	-0,415	0,44

Таким чином, проаналізовано результати досліджень у табличному вигляді, і зроблено висновок, що ці три параметри взаємозалежні та змінюються у зв'язку один з одним.

3.2 Поведінка конструкції ферми при дії статичних навантажень при розрахунку методом повної моделі

Дослідження методом повної розрахункової моделі у SolidWorks Simulation передбачає створення і розрахунок детальної тривимірної моделі, де всі елементи мають реальні геометричні розміри, форму перерізу та фізико-механічні властивості.

Аналіз моделі здійснено в рамках пружних деформацій за умов лінійного статичного розрахунку. Враховані ті ж навантаження що і при розрахунку спрощеної моделі. Розроблена більш детальна сітка контролю напружень яка поділяє кожен елемент ферм на трикутні сегменти розміром грані 3мм.

Аналіз ферми виконано за допомогою методу повного розрахунку в програмному комплексі SolidWorks. Отримано такі результати:

- тривимірна модель ферми з графічними результатами дослідження та табличними даними про напружено-деформований стан елементів ферми;
- дані НДС кожного з елементів ферми сформовано в таблиці;
- графіки сформовані по точках найбільших локалізацій напружень;
- деформації в конкретних точках конструкції;
- концентрацію напружень у місцях зварних з'єднань, перетинів стрижнів тощо;
- поведінку елементів під дією складних навантажень.

SolidWorks Simulation дозволяє візуалізувати:

- карти напружень за Мізесом (Von Mises Stress);
- графіки переміщень;
- місця потенційного зародження тріщин;
- зони можливого перевищення допустимих напружень.

Розподіл напружень у елементах зварної ферми подано на рис. 3.14.

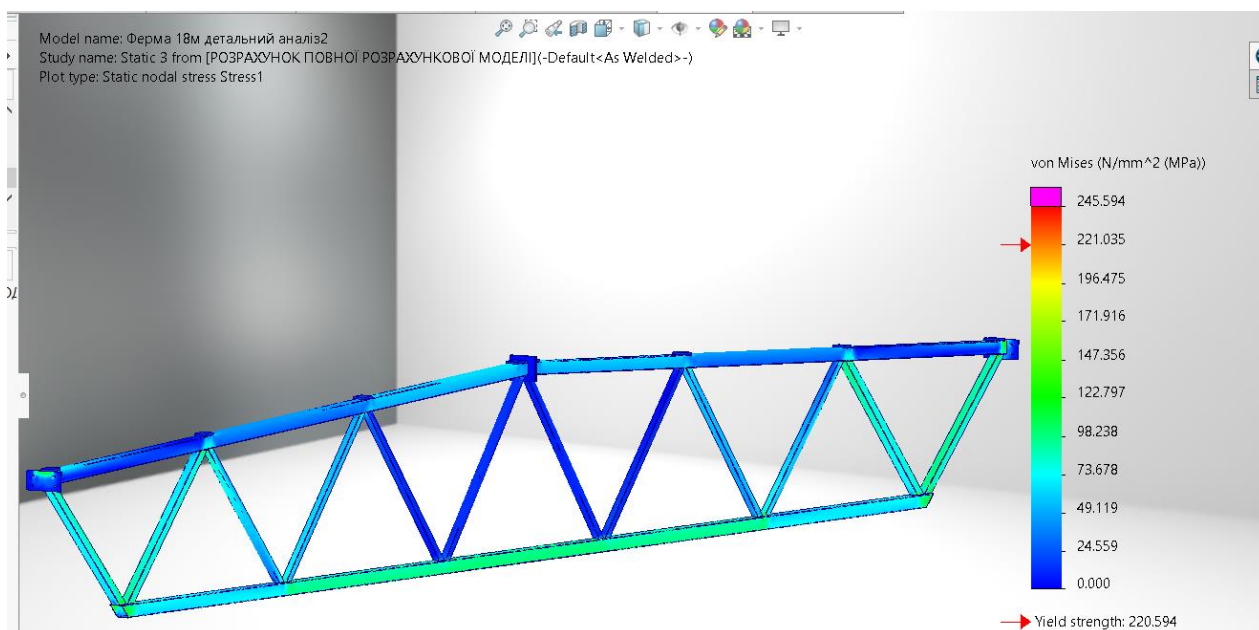


Рисунок 3.14 – Графічне відображення напружень в стержнях ферми

Проаналізувавши графічну візуалізацію напружень виявлено, що граничні напруження виникають в вузлах ферми.

Максимальні напруження локалізуються в опорних вузлах ферми (рис. 3.8) і проміжних вузлах нижнього пояса (рис. 3.15).

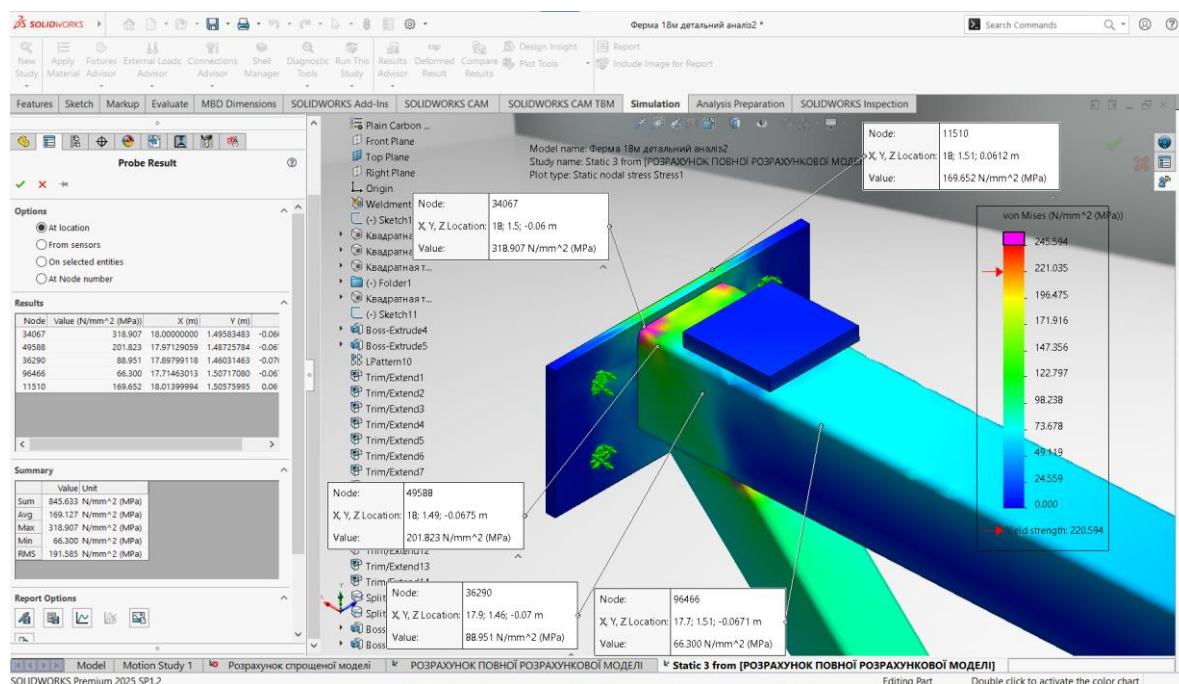


Рисунок 3.15 – Графічне відображення місця локалізації максимальних напружень в опорному вузлі досліджуваної ферми

Табличні дані формуються з заданих контрольних точок (датчиків) максимальних локалізацій напружень вздовж елементів ферми, місця розміщення датчиків в проміжному розкосі ферми Р4 наведено на рис. 3.16.

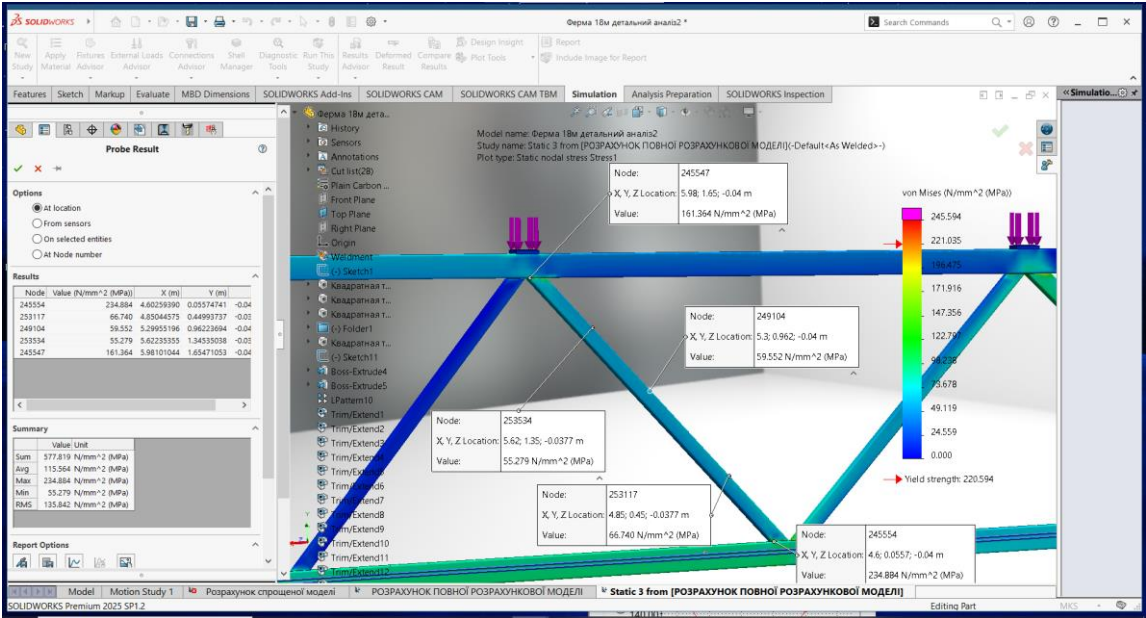


Рисунок 3.16 – Графічне відображення формування результатів напруження в розкосі ферми Р4.

Візуалізацію зміни переміщення нижнього поясу вздовж осі У (прогин) по довжині ферми подано на рис. 3.17.

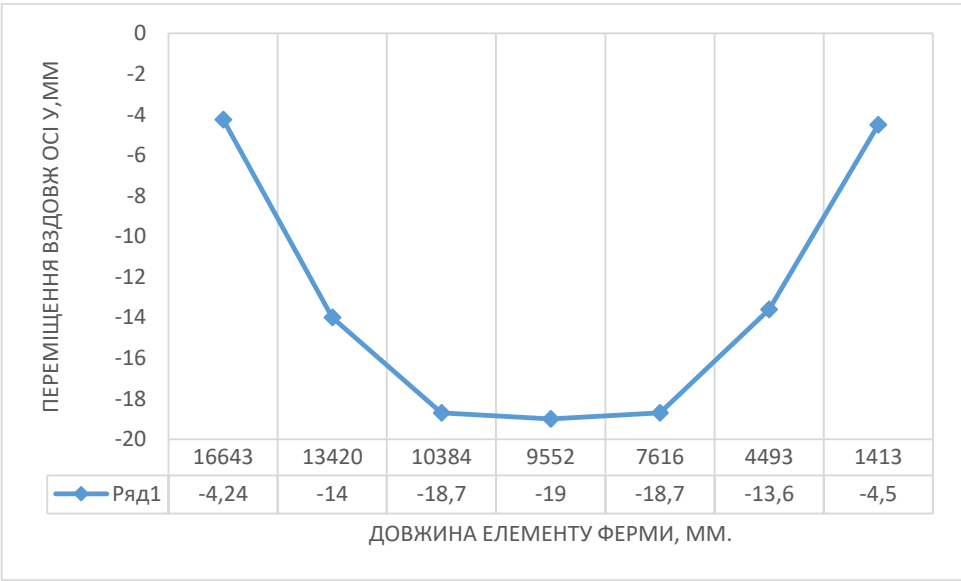


Рисунок 3.17 – Діаграма прогину в нижньому поясі ферм від статичних навантажень

Виявлено максимальний прогин 19 мм в районі центральної частини ферми.

Візуалізацію зміни переміщення верхнього поясу вздовж осі У (прогин) по довжині ферми подано на рис. 3.18.

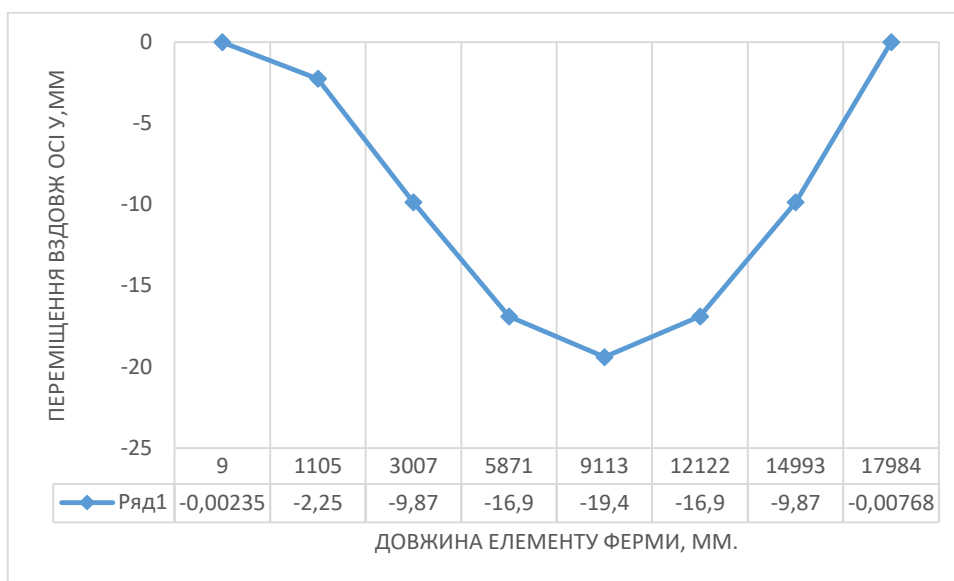


Рисунок 3.18 – Діаграма прогину в верхньому поясі ферм від статичних навантажень

Виявлено, максимальний прогин 19,4 мм в центральній частині ферми.

Візуалізацію зміни напружень верхнього поясу вздовж по довжині ферми подано на рис. 3.19.

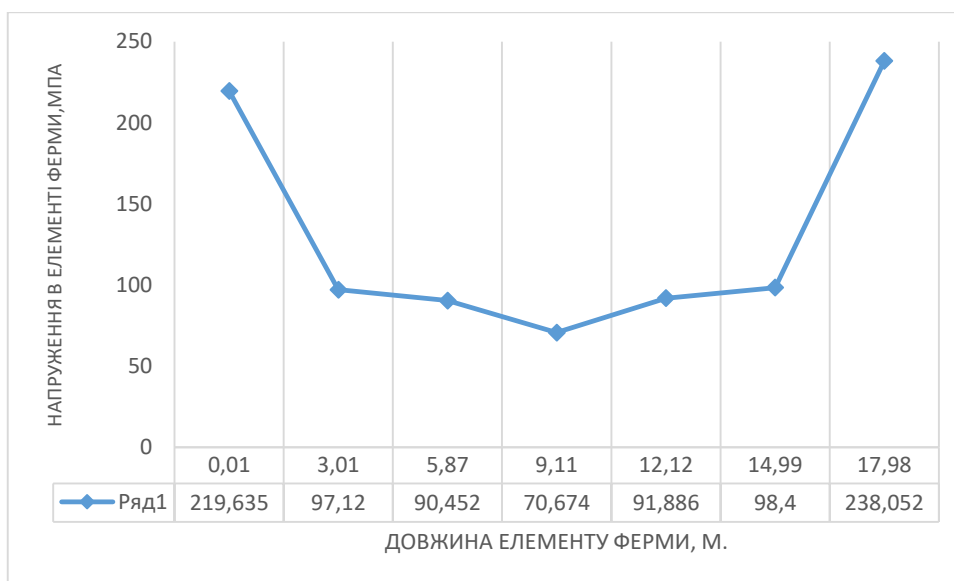


Рисунок 3.19 – Діаграма зміни напружень в верхньому поясі ферм від статичних навантажень

Виявлено, максимальне напруження по кінцях ферми 219,635 – 238,052 МПа .

Візуалізацію зміни напружень нижнього поясу по довжині ферми подано на рис. 3.20.

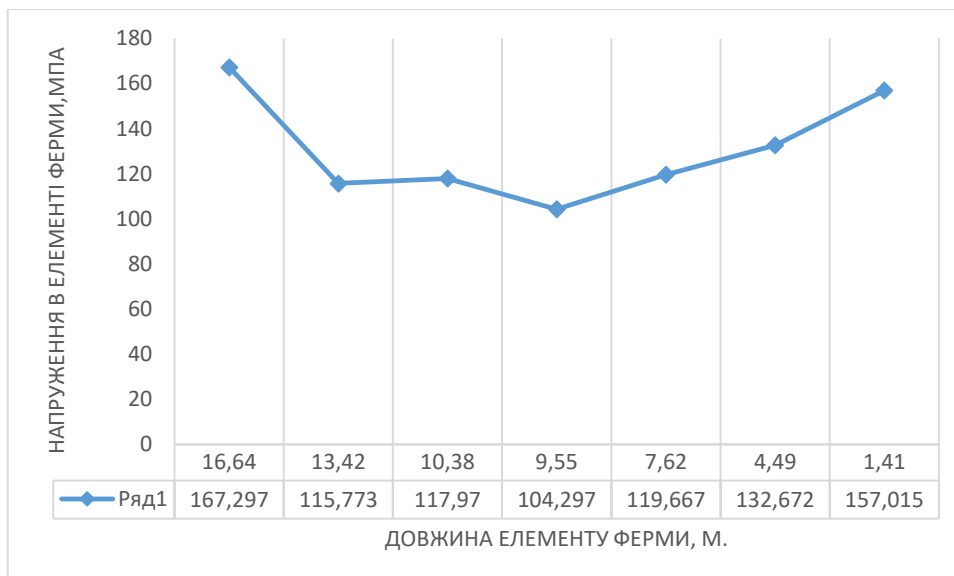


Рисунок 3.20 – Діаграма зміни напружень в нижньому поясі ферми від статичних навантажень

Виявлено, максимальне напруження в кінці ферми 167,297 МПа.

Візуалізацію зміни напружень в розкосі Р1 ферми по довжині елемента ферми подано на рис. 3.12.

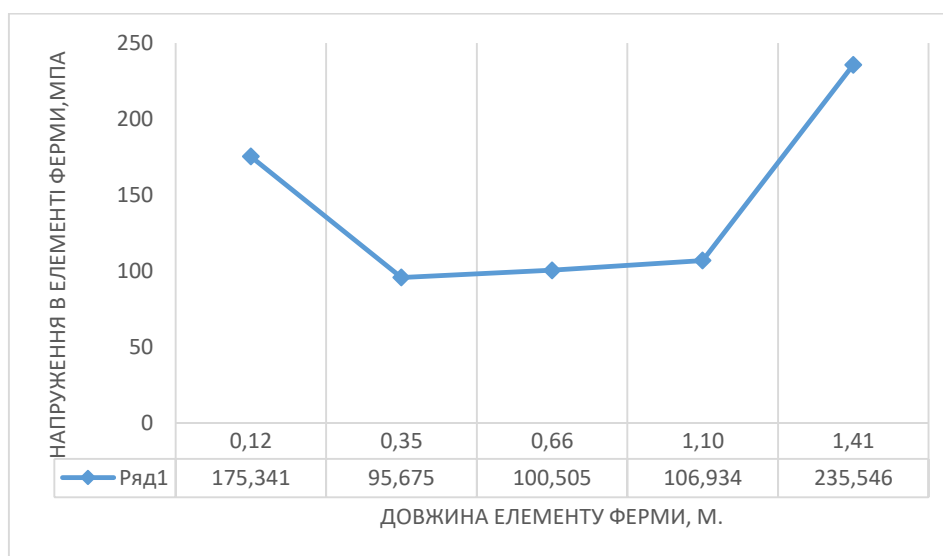


Рисунок 3.21– Діаграма зміни напружень розкосі Р1 ферми від статичних навантажень

Виявлено, максимальне значення наприкінці елемента 235,546 МПа.

Візуалізацію зміни напружень в розкосі Р4 ферми по довжині елемента ферми подано на рис. 3.22.

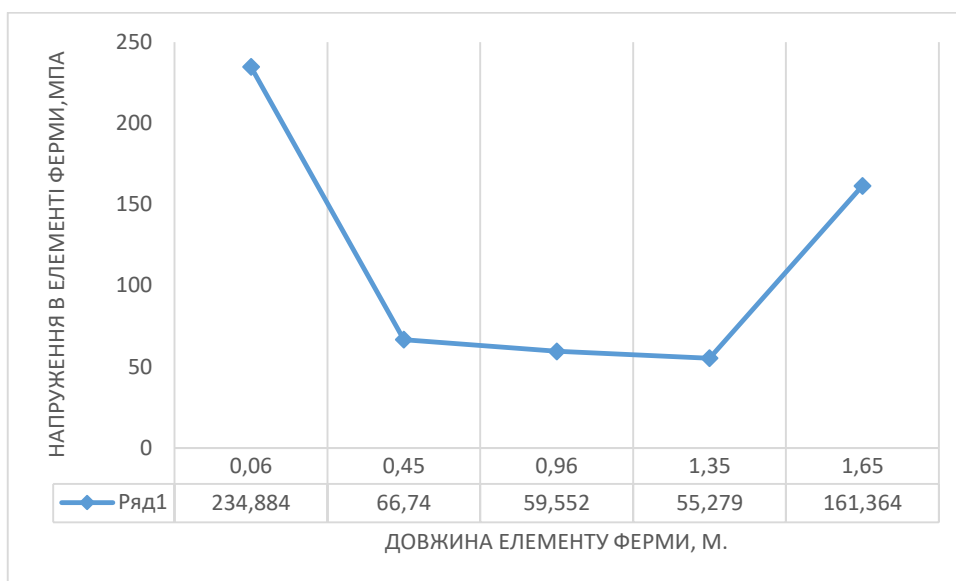


Рисунок 3.22 – Діаграма зміни напружень розкосі Р4 ферми від статичних навантажень

Виявлено, максимальне значення на початку елемента 234,884 МПа.

Візуалізацію зміни видовження в нижньому поясі по довжині ферми подано на рис. 3.23.

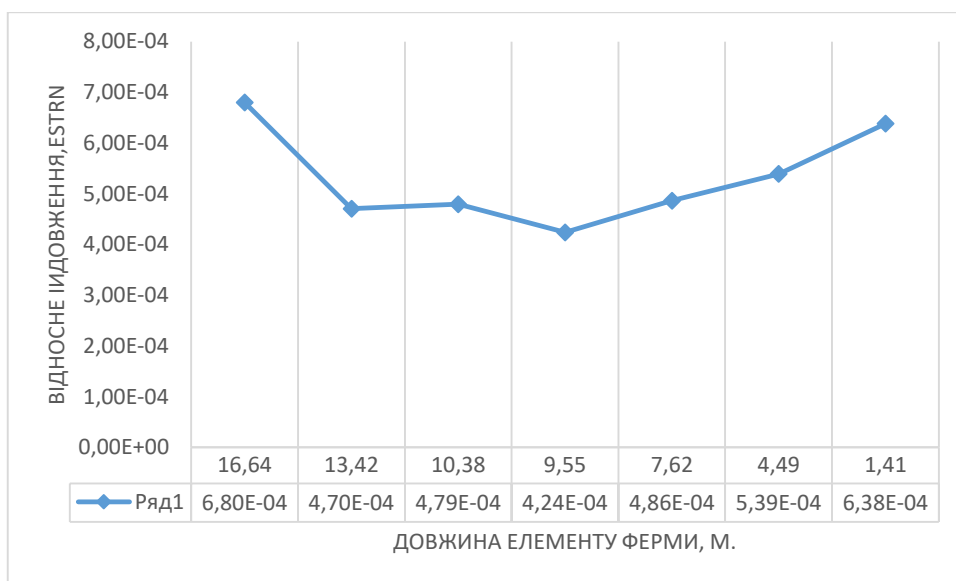


Рисунок 3.23 – Діаграма зміни відносного видовження нижнього поясу ферми

Виявлено, що максимальне значення відносного видовження спостерігається на початку і в кінці ферми.

Візуалізацію зміни відносного видовження в верхньому поясі по довжині ферми подано на рис. 3.24.

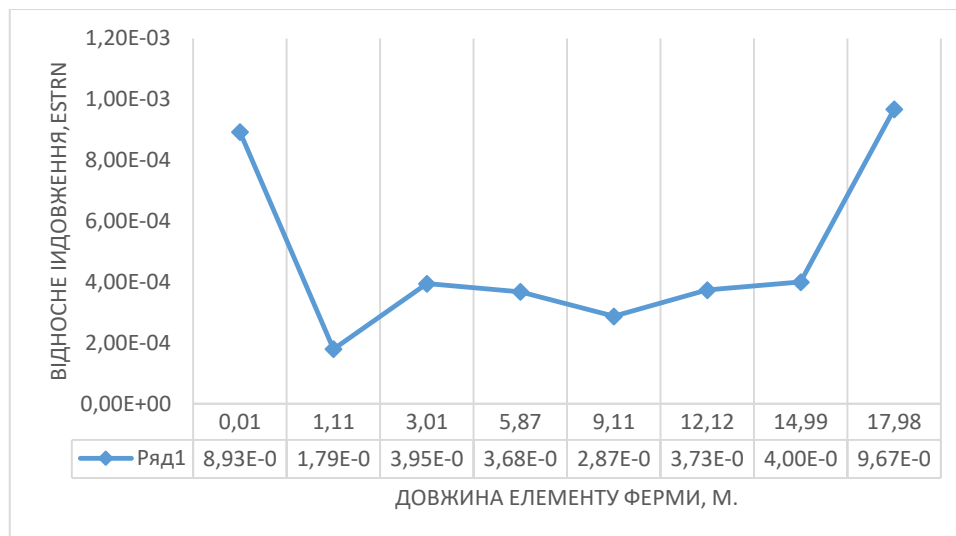


Рисунок 3.24 – Діаграма зміни відносного видовження верхнього поясу ферми

Виявлено, що максимальне значення спостерігається по краях ферми.

Результати досліджень у верхньому поясі ферм подано в табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Числові значення напружень, переміщень по осі Y і відносного видовження в вузлах по верхньому поясі ферми (місцях розміщень датчиків)

№ точки	Кординати точки, мм			Напруження σ , МПа.	Переміщення вздовж осі Y (прогин), мм	Відносне видовження (ESTRN)
	X	Y	Z			
136332	9	1495	-52	167,297	-4,24	8.93E-04
154810	1105	1548	-67	115,773	-14	1.79E-04
163945	3007	1531	-70	117,97	-18,7	3.95E-04
160591	5871	1659	-70	104,297	-19	3.68E-04
37548	9113	1800	-35	119,667	-18,7	2.87E-04
85490	12122	1650	-45	132,672	-13,6	3.73E-04
72340	14993	1531	-70	157,015	-4,5	4.00E-04
92292	17984	1497	-50	167,297	-4,24	9.67E-04

Результати досліджень у нижньому поясі ферм подано в табл. 3.4.

Таблиця 3.4 – Числові значення напружень, переміщень по осі Y і відносного видовження в вузлах по нижньому поясі ферми (місцях розміщень датчиків)

№ точки	Кординати точки, м			Напруження σ , МПа.	Переміщення вздовж осі Y (прогин), мм	Відносне видовження (ESTRN)
	X	Y	Z			
369006	16,643	0,053	-0,060	219,6	-0,00235	6,80E-04
344131	13,420	0,053	-0,045	97,1	-2,25	4,70E-04
354578	10,384	0,056	-0,045	90,4	-9,87	4,79E-04
376682	9,552	0,056	0,045	70,6	-16,9	4,24E-04
341981	7,616	0,056	-0,045	91,8	-19,4	4,86E-04
350551	4,493	0,053	-0,045	98,4	-16,9	5,39E-04
379541	1,413	0,020	-0,070	238,0	-9,87	6,38E-04
369006	16,643	0,053	-0,060	219,6	-0,00768	6,80E-04

Таким чином, проведено аналіз результатів дослідження у табличному вигляді та зроблено висновок, що ці три параметри взаємозалежні й змінюються в залежності один від одного. Також розрахунок МПРМ дозволяє отримати деталізовані результати відносного видовження.

3.3 Порівняльний аналіз та оцінка напружено-деформованого стану ферми при дослідженні методом спрощеної та повної розрахункової моделі

Процес проєктування будівельних та інженерних конструкцій невіддільно пов'язаний із забезпеченням їхньої надійності, міцності та економічної ефективності. Одним із ключових етапів проєктування є правильна оцінка напружено-деформованого стану конструкцій, що дозволяє гарантувати їхню працездатність у межах заданих умов експлуатації.

Ферми як просторові або плоскі стрижневі системи широко застосовуються в будівництві завдяки їх високій міцності при відносно малій вазі. При цьому важливо адекватно відобразити фізичну поведінку таких конструкцій під навантаженням. У практиці інженерного аналізу часто використовують два

основні підходи до моделювання ферм: спрощену розрахункову модель та повну розрахункову модель.

Спрощена модель базується на припущеннях про ідеальні з'єднання та осьовий характер роботи елементів ферми, що дозволяє значно знизити обчислювальні витрати. Водночас повна модель, яка враховує реальну жорсткість вузлів, вигин елементів та місцеві деформації, забезпечує вищу точність результатів, але потребує більших ресурсів для аналізу.

На основі попередніх розрахунків сформовано порівняльний аналіз напружено-деформованого стану ферми шляхом застосування спрощеної та повної моделі із використанням програмного комплексу SolidWorks Simulation. Здійснено порівняльну оцінку в контрольних точках (датчиках) напружень, та переміщення вздовж осі Y (прогин).

Порівняння напружень в нижньому поясі ферми методом спрощеної та повної розрахункової моделі наведено в табл. 3.5.

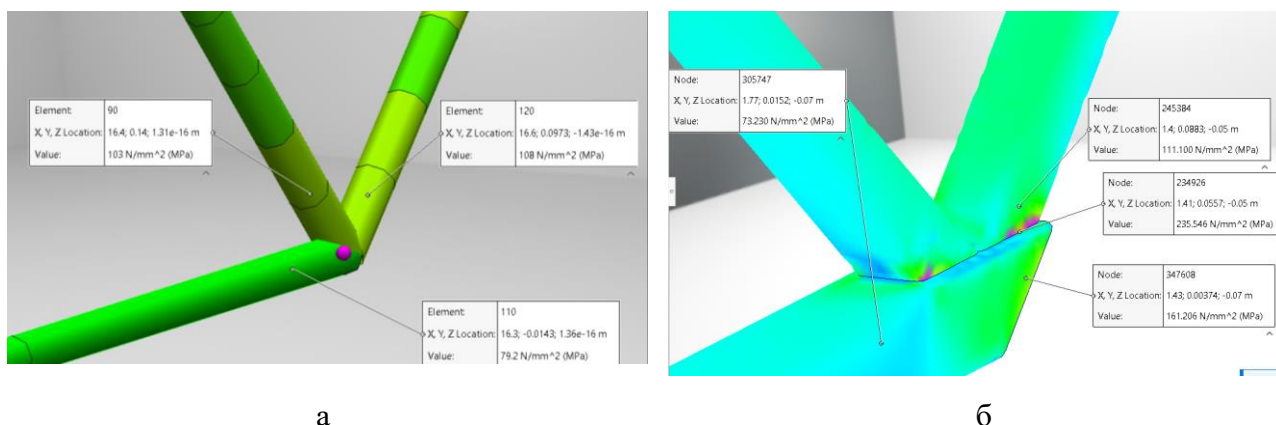
Таблиця 3.5 – Числові значення напружень по нижньому поясі ферми (місцях розміщень датчиків) при розрахунку методом спрощеної та повної розрахункової моделі

№ точки	Кординати точки, м			Різниця напружень σ , МПа.	Напруження σ , МПа. (Метод спрощеної розрахункової моделі)	Напруження σ , МПа. (Метод повної розрахункової моделі)
	X	Y	Z			
369006	16,643	0,053	-0,060	88,097	79,2	167,297
344131	13,420	0,053	-0,045	3,773	119	122,773
354578	10,384	0,056	-0,045	-4,03	122	117,97
376682	9,552	0,056	0,045	-7,703	112	104,297
341981	7,616	0,056	-0,045	-7,333	127	119,667
350551	4,493	0,053	-0,045	13,672	119	132,672
379541	1,413	0,020	-0,070	77,815	79,2	157,015

Проаналізувавши результати досліджень методом повної та спрощеної розрахункової моделі виявлено що в місцях опирання розкосу P1(опорного) на

нижній пояс ферми, точкові напруження значно вищі при дослідженні методом повної розрахункової моделі, що свідчить про те, що даний вузол рекомендовано зміцнити для збільшення довговічності ферми, а саме додати фасонку в даному вузлі для розподілення напруження на нижній пояс від опорного розкосу ферми.

Графічну візуалізацію порівняння розподілень навантажень в даному вузлі наведено на рис 3.25.



а) - за спрощеною розрахунковою моделлю; б) - повна розрахункова модель.

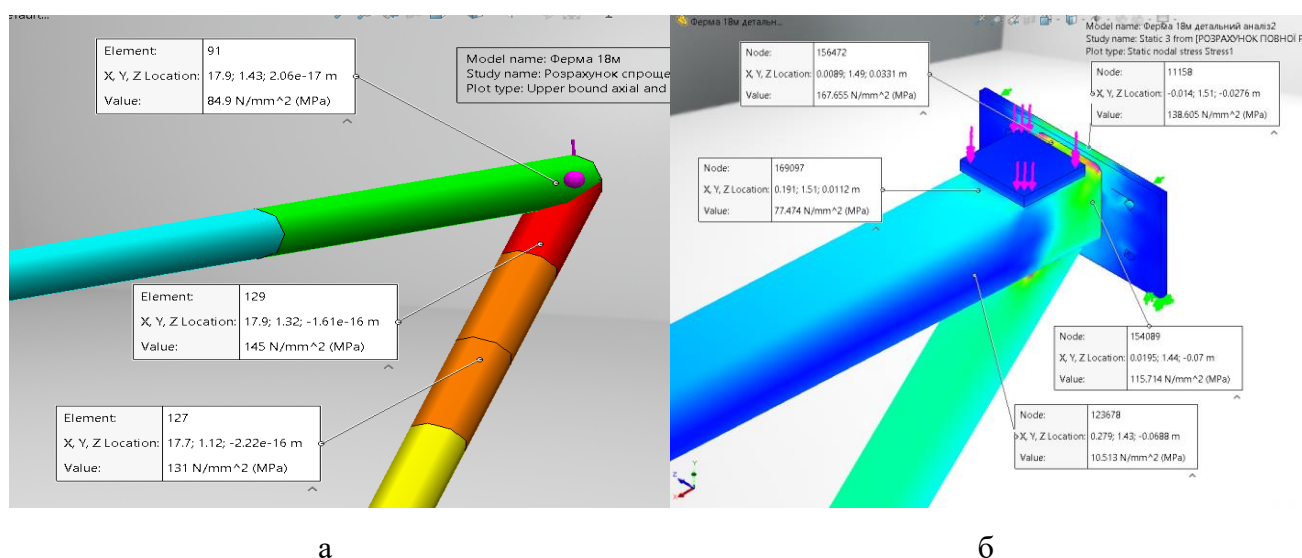
Рисунок 3.25 – Графічне відображення порівняння напружень в вузлі опираю розкосу Р1 на нижній пояс ферми

Порівняння напружень в верхньому поясі ферми методом спрощеної та повної розрахункової моделі наведено в табл. 3.6. Проаналізувавши результати досліджень методом повної та спрощеної розрахункової моделі виявлено, що напруження в вузлах вищі особливо в опорному вузлі ферми, точкові напруження значно вищі при дослідженні методом повної розрахункової моделі, що свідчить про те, що необхідно зміцнити вузли опираю прогонів збільшивши площу передачі навантаження від прогонів на верхній пояс ферми за допомогою фасонки, в свою чергу опорний вузол ферми також рекомендовано зміцнити додатковими фасонками для збільшення довговічності ферми.

Таблиця 3.6 – Числові значення напружень в вузлах по нижньому поясі ферми (місцях розміщень датчиків) при розрахунку методом спрощеної та повної розрахункової моделі

№ точки	Кординати точки, м			Різниця напружень σ , МПа.	Напруження σ , МПа. (Метод спрощеної розрахункової моделі)	Напруження σ , МПа. (Метод повної розрахункової моделі)
	X	Y	Z			
136332	0,010	1,495	-0,052	134,835	84,8	219,635
163945	3,010	1,531	-0,070	51,62	45,5	97,12
160591	5,870	1,659	-0,070	45,752	44,7	90,452
37548	9,110	1,800	-0,035	6,074	64,6	70,674
85490	12,120	1,650	-0,045	47,186	44,7	91,886
72340	14,990	1,531	-0,070	52,8	45,6	98,4
92292	17,980	1,497	-0,050	153,152	84,9	238,052

Графічну візуалізацію порівняння розподілень навантажень в даному опорному вузлі наведено на рис 3.26.

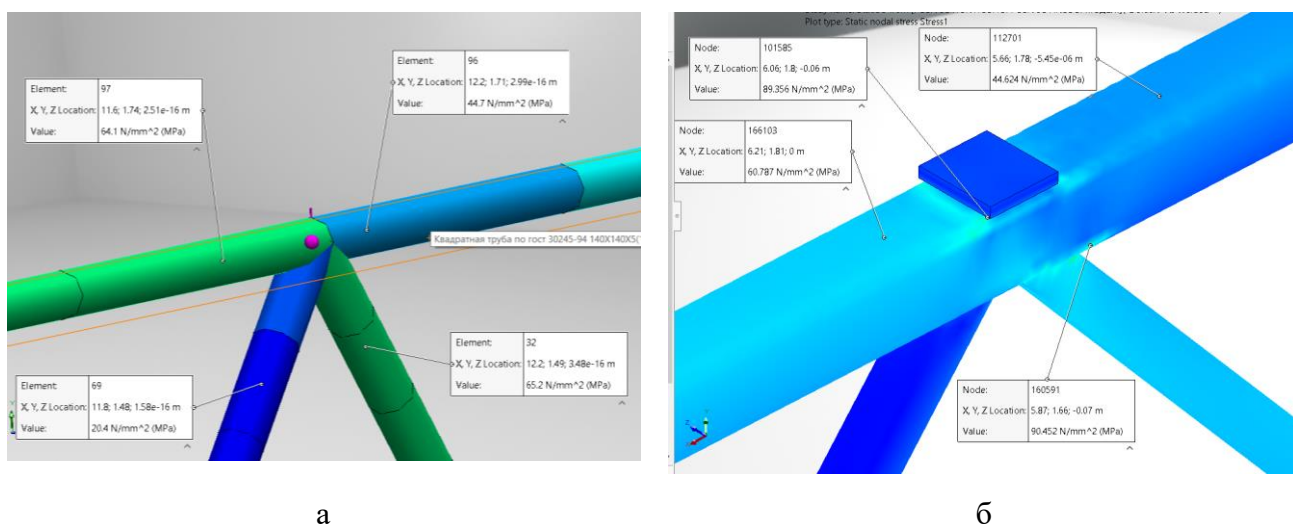


а) - за спрощеною розрахунковою моделлю; б) - повна розрахункова модель.

Рисунок 3.26 – Графічне відображення порівняння напружень в опорному вузлі ферми

Проаналізувавши рис. 3.26, можна зробити висновок, що за допомогою тілового аналізу в програмному комплексі SolidWorks можливо найбільш раціонально проробити вузли.

Графічну візуалізацію порівняння розподілень навантажень в вузлі прикладень навантаження від покрівельних прогонів наведено на рис 3.27



а) - за спрощеною розрахунковою моделлю; б) - повна розрахункова модель.

Рисунок 3.27 – Графічне відображення порівняння напружень в вузлі прикладання навантаження від прогону ферми

Для наочнішого порівняння результатів дослідження напруження в елементах ферми методом спрощеної та повної розрахункової моделі сформовано діаграми напружень та деформацій в елементах ферми.

Візуалізацію зміни напружень при розрахунку методом спрощеної (МСРМ) та методом повної (МПРМ) розрахункової моделі в нижньому поясі по довжині ферми подано на рис. 3.28.

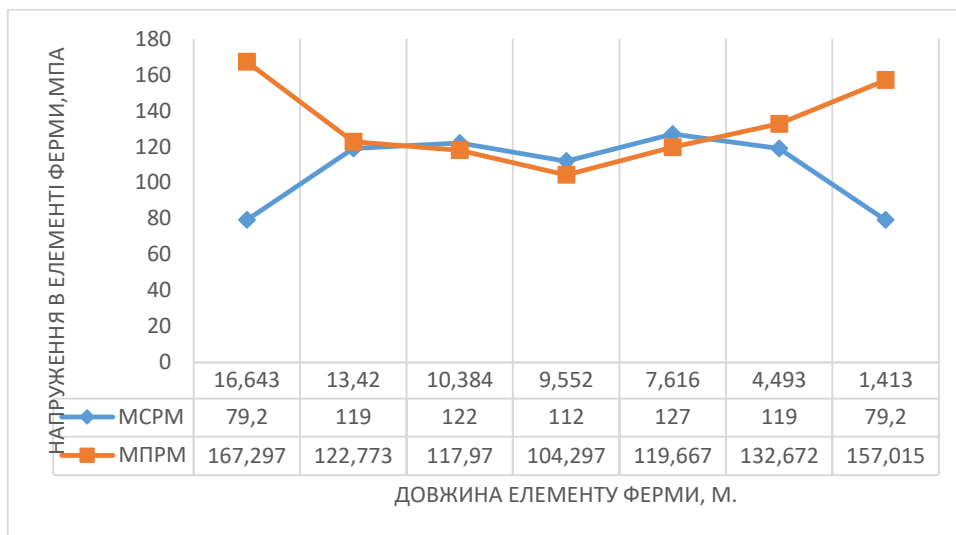


Рисунок 3.28 – Діаграма зміни напружень в нижньому поясі ферми від статичних навантажень

МПРМ враховує більше факторів і відображає реальнішу картину напружень особливо в опорних вузлах ферми тому і виникає така різниця між цими методами адже МСРМ є більш спрощеним.

Візуалізацію зміни напружень при розрахунку методом спрощеної (МСРМ) та методом повної (МПРМ) розрахункової моделі в верхньому поясі по довжині ферми подано на рис. 3.29.

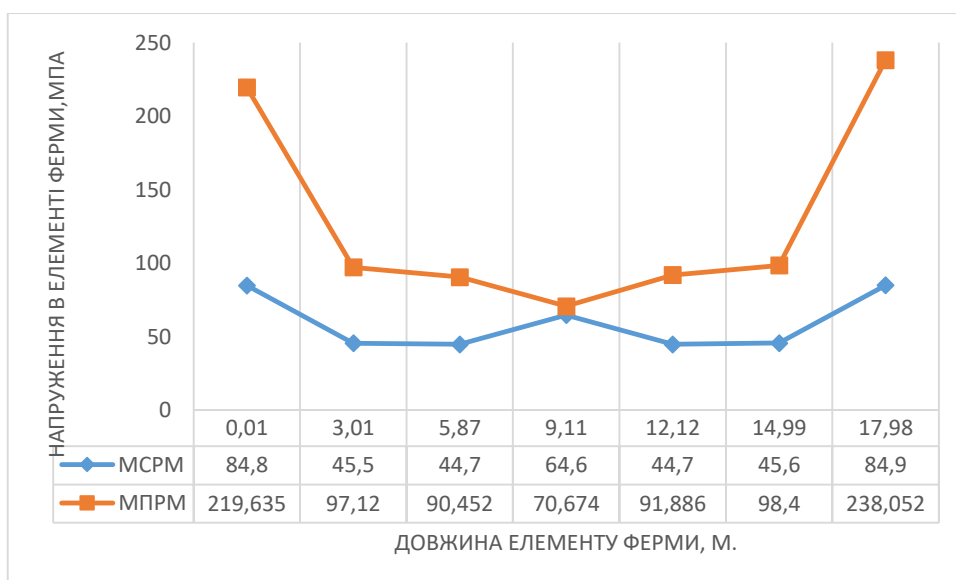


Рисунок 3.29 – Діаграма зміни напружень в верхньому поясі ферми від статичних навантажень

МПРМ напруження змінюються значно в ширших межах від 70,674 до 238,052 МПа, МСРМ напруження коливаються в межах 44,7 – 85,9 МПа.

Візуалізацію зміни переміщень вздовж осі Y при розрахунку методом спрощеної (МСРМ) та методом повної (МПРМ) розрахункової моделі в верхньому поясі по довжині ферми подано на рис. 3.30.

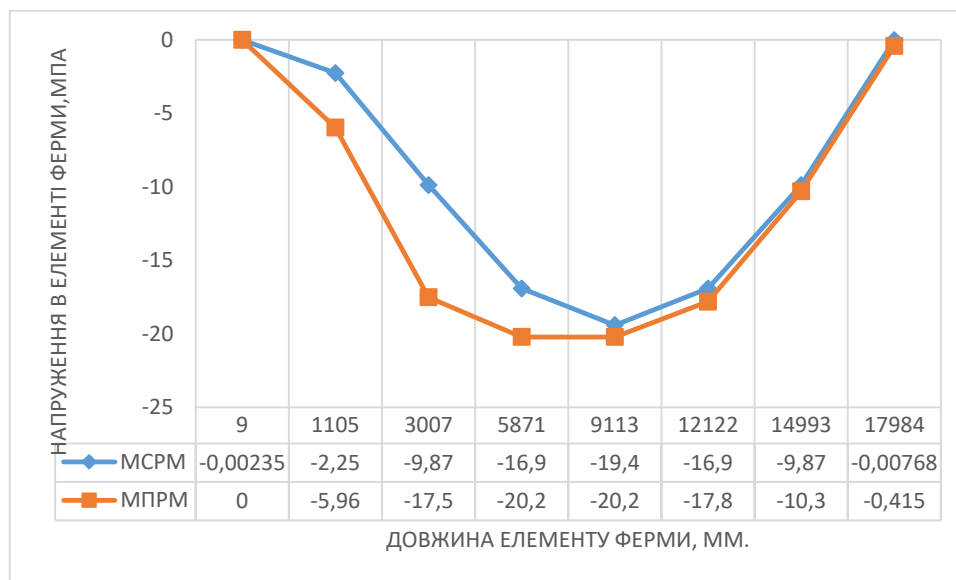


Рисунок 3.30 – Діаграма зміни переміщень вздовж осі Y в верхньому поясі ферми від статичних навантажень

Максимальне напруження в обох методах спостерігається близько центру ферми.

Візуалізацію зміни переміщень вздовж осі Y при розрахунку методом спрощеної (МСРМ) та методом повної (МПРМ) розрахункової моделі в нижньому поясі по довжині ферми подано на рис. 3.31.

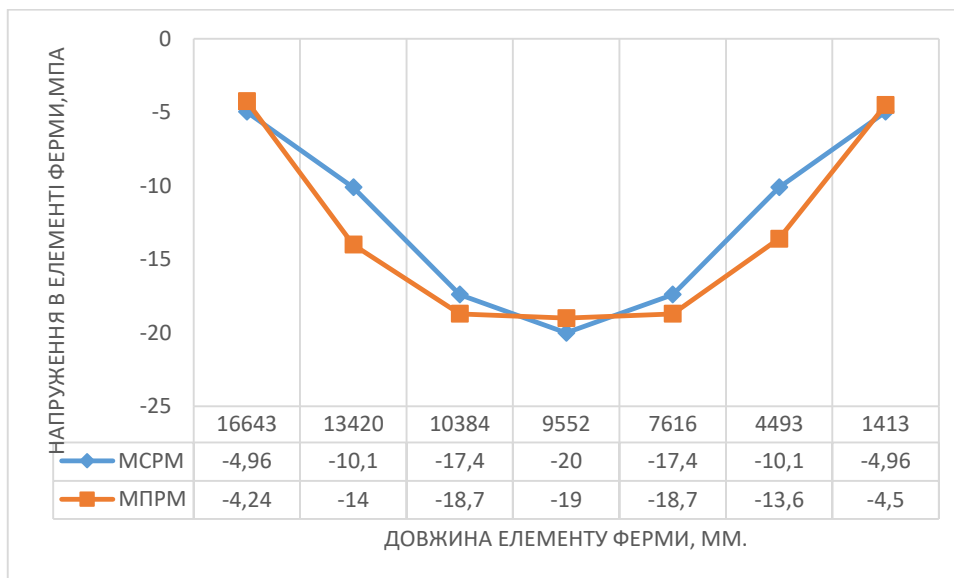


Рисунок 3.31 – Діаграма зміни переміщень вздовж осі У в нижньому поясі ферми від статичних навантажень

Максимальний прогин в обох методах спостерігається близько центру ферми.

Також різницю між методами дослідження можна побачити на графічній візуалізації запасу несучої здатності елементів ферми. Для методу спрощеної розрахункової моделі характерне рівномірне розподілення запасу несучої здатності в елементах ферми (рис 3.32). А от для методу повної розрахункової моделі характерне нерівномірне розподілення запасу несучої здатності (НЗС) в елементах ферми, а саме значна різниця між НЗС в вузлах та елементах ферми вцілому (рис 3.33).

Можна зробити висновок, що спрощенна розрахункова модель характеризується рівномірним розподіленням напружень в елементах ферми, на відміну від повної розрахункової моделі, яка навпаки характеризується точковою локалізацією максимальних напружень.

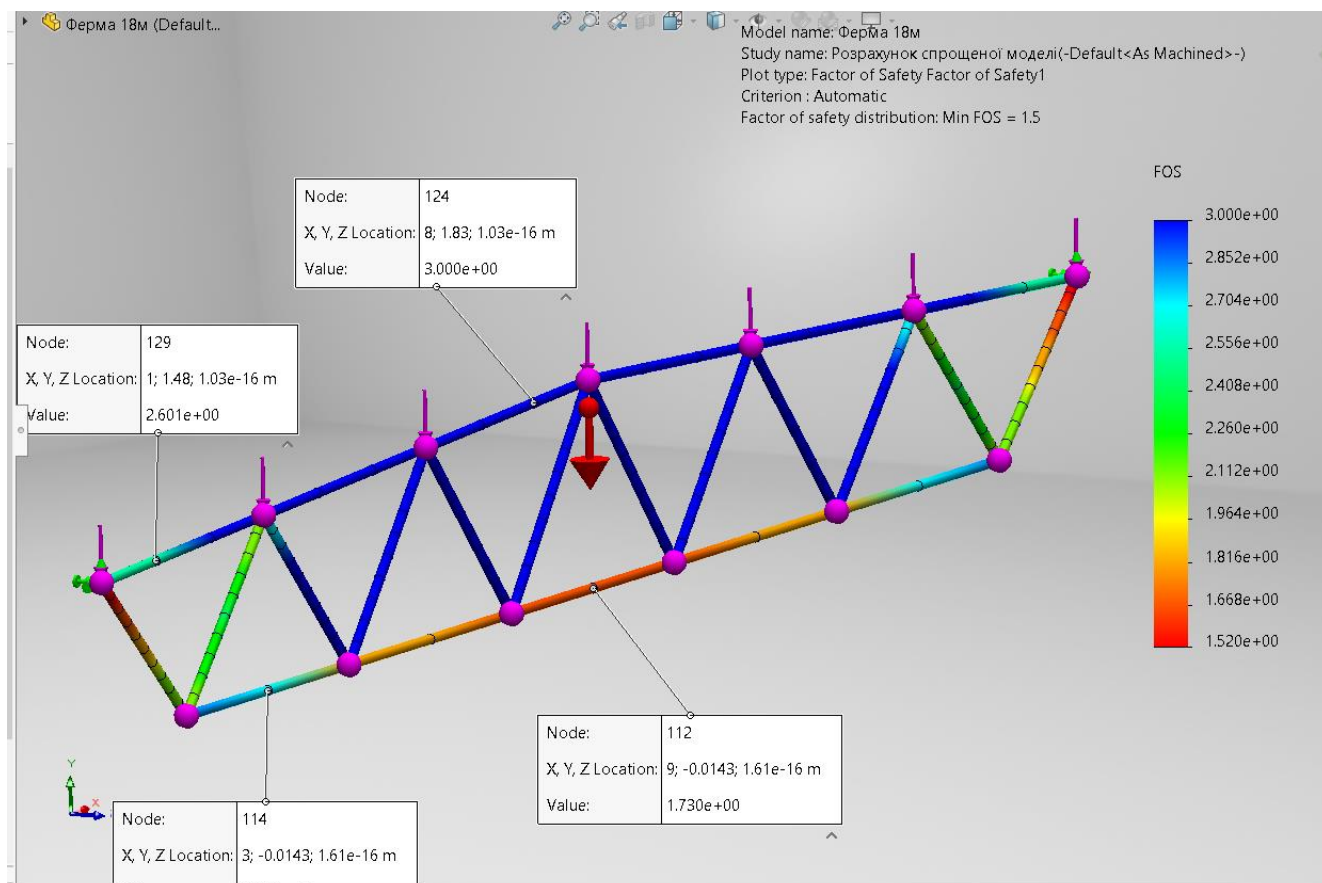
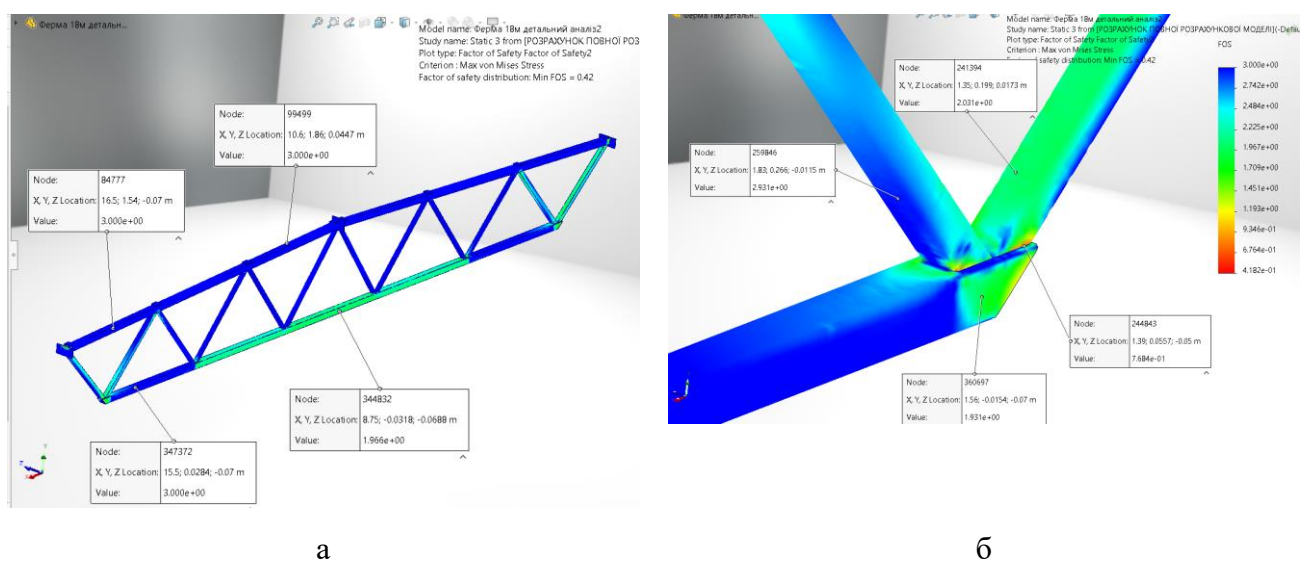


Рисунок 3.32 – Графічне відображення запасу несучої здатності в елементах ферми при спрощеній розрахунковій моделі



а

б

а) – загальний вид; б) – вид вузла.

Рисунок 3.33 – Графічне відображення запасу несучої здатності в елементах ферми при повній розрахунковій моделі

3.4 Узагальнюючі результати та рекомендації по використанню методів дослідження зварних ферм в програмному комплексі SolidWorks

У ході виконаного дослідження виконано порівняльний аналіз напружено-деформованого стану зварної ферми за допомогою двох підходів:

- методу спрощеної розрахункової моделі (лінійний стержневий аналіз);
- методу повної розрахункової моделі (тіловий об'ємний аналіз із використанням solid-елементів).

Отримані результати дозволяють сформулювати узагальнення за категоріями такими як :

Точність результатів:

- спрощена модель забезпечує прийнятну точність для оцінки внутрішніх зусиль та загальних переміщень конструкції при припущенні про ідеальне з'єднання елементів та їхню роботу тільки на розтяг або стиск;
- повна розрахункова модель дає більш деталізовану картину розподілу напружень і деформацій, особливо у зонах зварних з'єднань, місцях концентрації напружень та ділянках вигину елементів.

Обчислювальні витрати:

- спрощене моделювання вимагає значно менше часу на побудову сітки та проведення аналізу, що є вигідним на етапі попереднього проєктування або оптимізації варіантів конструкцій;
- повний тілесний аналіз потребує суттєво більших обчислювальних ресурсів і часу на моделювання та розрахунок, особливо для великих або складних ферм.

В порівнянні готова спрощена модель з заданими навантаженнями побудованою сіткою та всіма іншими етапами описаними вище в методиці розрахунку триває від 1 до 3 хвилин, в той час як при розрахунку методом повної розрахункової моделі від запуску розрахунку до його завершення після якого можна формувати звіти НДС, переміщень та відносного видовження ферми

тривало від 4 до 5 годин і при коригуванні будь якого елемента ферми повторний розрахунок триває таку ж кількість часу.

Особливості моделювання зварних вузлів:

- у спрощеній моделі неможливо достовірно врахувати вплив геометрії зварних швів на загальний НДС конструкції;
- у повній моделі SolidWorks Simulation дозволяє деталізувати форму та властивості швів, що дає змогу більш точно оцінити поведінку конструкції в критичних вузлах.

Практичні рекомендації:

- на стадії попереднього проєктування зварних ферм доцільно використовувати спрощену стержневу модель для швидкого аналізу несучої здатності та попередньої оптимізації конструкції;

- на стадії детального проєктування або для аналізу складних ферм із великими прогонами, нерівномірними навантаженнями чи підвищеними вимогами до надійності, рекомендовано застосовувати повну тілесну модель.

Особливу увагу при повному аналізі слід приділяти моделюванню зварних швів, контактів між елементами, граничних умов, розмірів, форм та товщині фасоночних елементів.

Вибір методу в залежності від завдання:

- якщо головною метою є оцінка зусиль у стрижнях та контроль загальної міцності, достатньо використання спрощеної моделі;
- якщо необхідно оцінити напруження у вузлових зонах, аналізувати місцеві ефекти або розрахувати довговічність зварних швів, обов'язковим є використання повної тілесної моделі.

Провівши аналіз можна стверджувати, що програмний комплекс SolidWorks забезпечує значний функціонал для зручного попереднього і точного розрахунку зварних конструкцій і має ряд переваг над такими програмними комплексами як ЛІРА САПР та SCAD office, які в своєму функціоналі мають лише спрощену модель розрахунку та вимагають додаткового використання такого програмного комплексу як IDEA.StatiCa для конструювання та розрахунку вузлів.

3.5 Висновок за розділом 3

1. Одержані результати дослідження свідчать про те, що навіть при дослідженню статичної міцності ферми методом спрощеної розрахункової моделі слід проводити розрахунок за повною розрахунковою моделлю для коректного проектування вузлів зварних ферм, оскільки саме в вузлах локалізуються максимальні напруження і для забезпечення довговічності конструкції ферми доцільно проводити найбільш ефективне конструювання вузлів ферми.

2. Згідно отриманих результатів дослідження можна зробити висновок, що кожен з методів розрахунку в моделюючо-розрахунково-програмному комплексі SolidWorks має ряд переваг і преспективу для практичного використання їх в комплексі.

3. Одержані результати роботи доцільно використовувати для подальших досліджень та в інженерній практиці для проектування та зміцнення зварних ферм, які експлуатуються при впливі на них різного виду навантажень.

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Законодавча база про охорону праці

Охорона праці розглядає трудовий процес з точки зору збереження життя та здоров'я працівників. Основні засади державної політики у сфері охорони праці передбачають узгоджену діяльність органів влади, установ, організацій і громадських об'єднань, що займаються питаннями безпеки, гігієни та умов праці. Важливу роль відіграє також співпраця та консультації між роботодавцями і працівниками (або їхніми представниками), а також між різними соціальними групами під час прийняття рішень у сфері охорони праці як на місцевому, так і на державному рівнях [32].

Закон України «Про охорону праці» є основоположним нормативно-правовим актом, який визначає правові, організаційні та соціально-економічні засади реалізації конституційного права громадян на безпечні та здорові умови праці. Він спрямований на забезпечення захисту життя, здоров'я і працездатності працівників у процесі їх трудової діяльності.

Цей закон регламентує взаємовідносини між роботодавцем і працівником з питань безпеки праці, виробничої санітарії, гігієни праці та умов трудового середовища. Крім того, у ньому визначено єдиний порядок організації та управління системою охорони праці в Україні за участю органів державної влади.

В Законі України «Про охорону праці», містяться статті, які визначають його характеристики.

Стаття 6 «Права працівників на охорону праці під час роботи» згідно з цією нормою, працівники мають право на безпечні умови праці без ризику для життя і здоров'я. У разі виникнення небезпечної виробничої ситуації, яка може становити загрозу для працівника або інших осіб, а також для довкілля чи виробничого середовища, працівник має законне право відмовитися від виконання дорученої роботи. При цьому він не несе дисциплінарної чи матеріальної відповідальності за таку відмову, якщо вона обґрунтована вимогами безпеки.

В Статті 8 «Забезпечення працівників спецодягом, іншими засобами індивідуального захисту, мийними та знешкоджувальними засобами». Закон зобов'язує роботодавця безкоштовно забезпечувати працівників засобами індивідуального захисту відповідно до характеру виконуваних робіт, ступеня ризику та вимог безпеки. До таких засобів належать спецодяг, спеціальне взуття, засоби захисту органів дихання, слуху, зору, шкіри тощо. Також роботодавець повинен забезпечити працівників мийними та знешкоджувальними засобами і несе відповідальність за своєчасну видачу, належне утримання та періодичну перевірку стану цих засобів.

Стаття 22 «Розслідування та облік нещасних випадків, професійних захворювань і аварій» Роботодавець зобов'язаний забезпечити належну організацію розслідування та обліку нещасних випадків, професійних захворювань та аварій, які трапляються на підприємстві. Ці дії мають здійснюватися відповідно до порядку, встановленого чинними нормативно-правовими актами. За підсумками розслідування складається спеціальний акт, у якому фіксуються обставини та причини події. Цей акт повинен бути переданий потерпілому або іншій заінтересованій особі не пізніше трьох днів з моменту його оформлення. У випадках, коли роботодавець відмовляється скласти акт або існує незгода з його змістом, вирішення конфліктної ситуації покладається на посадову особу органу державного нагляду за охороною праці. Її рішення має обов'язковий характер для виконання всіма сторонами. Водночас, якщо заінтересована сторона вважає рішення інспектора неправомірним, його можна оскаржити у судовому порядку відповідно до чинного законодавства України.

4.2 Правила охорони праці і техніка безпеки при монтажі зварних ферм

Для запобігання впливу небезпечних та шкідливих виробничих факторів при виконанні монтажних робіт застосовуються як засоби колективного, так і засоби індивідуального захисту.

До засобів колективного захисту, що широко застосовуються під час монтажу металоконструкцій, належать: захисні та сигнальні огороження, які використовуються для обмеження доступу сторонніх осіб до небезпечних зон, де проводяться монтажні роботи. Висота таких огорожень повинна бути не меншою за 1,1 метра, щоб ефективно запобігати падінню людей з висоти. Знаки безпеки, що інформують працівників про потенційні небезпеки в зоні виконання робіт. Вони є важливою складовою профілактики виробничого травматизму. Захисні сітчасті пристрої, виготовлені з міцних синтетичних матеріалів, призначені для запобігання падінню працівників і для вловлювання інструментів або матеріалів, які можуть впасти з висоти. Такі сітки встановлюються по периметру будівлі, а також через кожні 3–4 метри по висоті конструкції.

При виконанні монтажних робіт використовуються такі індивідуальні засоби захисту: спецодяг, зокрема комбінезони з бавовняних тканин, які захищають працівника від пилу, забруднень та незначних механічних ушкоджень. Запобіжні пояси, які є обов'язковими при роботі на висоті. Вони забезпечують страховку у разі падіння та використовуються разом із системами канатного страхування.

Порядок та послідовність монтажу конструкцій визначаються у проекті виконання робіт (ПВР), і він має ключове значення для забезпечення безпеки працівників. При монтажі кроквяних та підкроквяних ферм використовують стропи та траверси для підйому конструкцій.

Стропи — це вантажозахоплювальні елементи (канати, ланцюги, стропи з текстильних стрічок або тросів), які використовуються в парі з вантажопідіймальними механізмами (кранами, тельферами) для фіксації, підйому та транспортування конструкцій — у цьому випадку зварних плоских ферм. Виконується перевірка та розрахунок строп для того щоб забезпечити безпеку працівників — стропи, які не витримують навантаження, можуть обірватися, що призведе до падіння ферми, травм або загибелі людей, захист конструкцій — неправильний розрахунок може призвести до деформації або пошкодження ферми при підйомі, дотримання норм — згідно з технікою безпеки та вимогами ДБН і

охорони праці, вантажозахоплювальні пристрої повинні бути перевірені та розраховані під конкретну масу й габарити вантажу.

Перевірка і розрахунок включає в себе:

- визначення маси ферми (включаючи запас на підйомні пристрої);
- вибір типу стропа (ланцюговий, канатний, текстильний);
- розрахунок коефіцієнта вантажопідйомності з урахуванням кута стропування (чим більший кут тим більше навантаження на кожен строп);
- оцінка зносу та справності стропів перед монтажем;
- перевірка сертифікатів відповідності і строку експлуатації.

До моменту встановлення постійних зв'язків по верхньому поясу ферм, необхідне їх тимчасове закріплення за допомогою розтяжок і розпірок. Монтаж часто здійснюється блоками з двох або трьох ферм, між якими встановлюють розпірки, що сприймають стискаючі зусилля та забезпечують просторову жорсткість блоку. Переміщення монтажників по верхніх поясах ферм заборонено, оскільки це створює значний ризик падіння. Дозволяється пересування нижніми поясами, за умови, що вздовж ферми натягнуто страхувальний канат, який повинен бути надійно закріплений, не ослаблюватись і не провисати. Для безпечного переміщення між фермами необхідно використовувати пересувні монтажні містки з перилами, які відповідають вимогам охорони праці. Усі монтажні роботи на висоті повинні виконуватись виключно з використанням запобіжного спорядження, а організація таких робіт має відповідати чинним нормам і стандартам безпеки.

4.3 Оцінка стійкості плоскої металевої ферми до дії ударної хвилі ядерного (техногенного) вибуху і заходи щодо її підвищення

У разі ядерного вибуху одним із найнебезпечніших чинників, що загрожують будівлям і конструкціям, є повітряна ударна хвиля в зокрема

надлишковий тиск (ΔP_f) є головним параметром, який визначає руйнівну дію повітряної ударної хвилі.

Стійкість елементів ферми до ударної хвилі оцінюється за максимальним значенням надлишкового тиску, за якого конструктивні елементи не зазнають руйнування або пошкоджуються лише незначно. Це значення називають граничним тиском стійкості об'єкта до ударної хвилі ($\Delta P_f \lim$). Умова стійкості виконується, якщо $\Delta P_f \lim \geq \Delta P_f \max$, де $\Delta P_f \max$ — це найбільше очікуване значення надлишкового тиску ударної хвилі на об'єкті в разі вибуху [33]. Якщо ця умова не виконується (тобто $\Delta P_f \lim < \Delta P_f \max$), елементи конструкції вважаються нестійкими до дії ударної хвилі. Умовами стійкості є $\Delta P_f \lim \geq \Delta P_f \max$. Впливом ударної хвилі на фермову конструкцію є імпульс навантаження на пояси та вузли ферми, конструкція піддається раптовому динамічному навантаженню, можливі явища: пластичні деформації, порушення з'єднань, втрата стійкості елементів.

Для ядерного вибуху вихідними даними є:

- потужність ядерного боєприпасу (q , кт);
- тип вибуху (наземний або повітряний);
- відстань від центру міста до об'єкта (R_m , км);
- максимальне ймовірне відхилення центра вибуху від точки прицілювання ($r_{\text{відх}}$).

На плані місцевості визначають ймовірну точку прицілювання — нею, зокрема, зазвичай є центр міста. Від цієї точки (ТП) з радіусом $r_{\text{відх}}$ креслять коло, в межах якого з найбільшою ймовірністю можуть потрапити боєприпаси (рис.4.1). Чим ближче центр вибуху (ЦВ) до об'єкта, тим значнішими будуть пошкодження. Розраховують мінімальну можливу відстань від епіцентру вибуху до об'єкта за формулою:

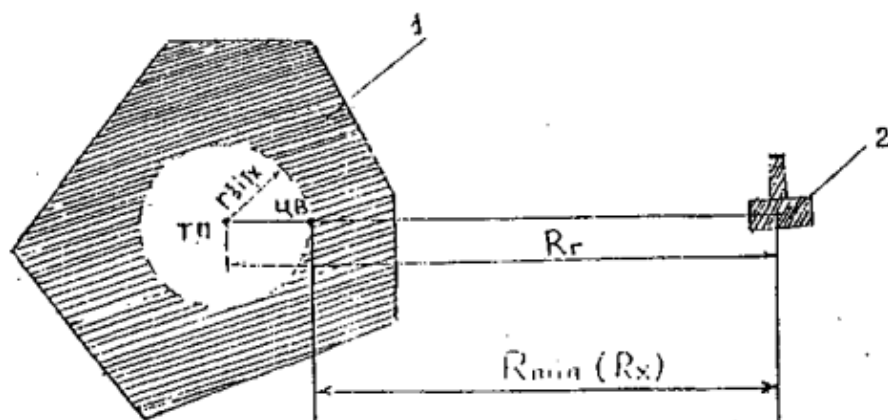
$$R_{\min} = R - r_{\text{відх}},$$

4.1

де R — відстань від точки прицілювання до об'єкта. Залежно від потужності ядерного боєприпасу та типу вибуху, у таблиці 4.1 визначають максимальне значення надлишкового тиску ударної хвилі, яке може діяти на об'єкт $\Delta P_{\text{ф.мах}}$.

Таблиця 4.1 – Ступінь руйнування елементів ферми при надмірному тиску $\Delta P_{\text{ф.мах}}$, з можливим збитком, залежно від ступеня руйнування елемента [33]

Ступінь руйнувань	Слабкі	Середні	Сильні	Повні
Очікуваний збиток, %	10...30	30...50	50...90	90...100



1-місто; 2-об'єкт.

Рисунок 4.1 – Визначення мінімальної відстані до імовірного центру вибуху

Порівнюючи граничне значення надлишкового тиску, який може витримати об'єкт, з очікуваним максимальним тиском ударної хвилі, оцінюють його стійкість. Якщо $\Delta P_{\text{ф. lim}} \geq \Delta P_{\text{ф. мах}}$, об'єкт вважається стійким до дії ударної хвилі. У протилежному випадку $\Delta P_{\text{ф. lim}} < \Delta P_{\text{ф. мах}}$, об'єкт не забезпечує необхідної стійкості.

Під час аналізу також визначають найбільш уразливі елементи конструкції — ті, для яких значення є найменшим. Це дозволяє сформулювати обґрунтовані пропозиції щодо посилення об'єкта. Доцільно підвищувати загальну стійкість до рівня очікуваного тиску, якщо такі заходи не потребують значних фінансових витрат. Якщо ж витрати є невиправдано високими, достатньо підсилити найслабші елементи до рівня, що відповідає стійкості основної маси конструкції.

На основі отриманих висновків розробляють технічні заходи з підвищення стійкості об'єкта та зменшення ризику виникнення надзвичайних ситуацій. До таких заходів належать:

- посилення несучих конструкцій та перекриттів шляхом встановлення додаткових опор — колон, ферм, контрфорсів або підкосів, збільшення перерізів поясових і розкосних елементів, застосування високоякісної сталі з високим межею текучості (наприклад, С355, С390), перенесення обладнання на нижні поверхи або в підвальні приміщення, його жорстке закріплення на фундаментах, встановлення захисних кожухів або кожухоподібних елементів;
- прокладка трубопроводів та кабельних мереж під землею або розміщення за природними бар'єрами (укосами, насипами);
- створення резервного фонду контрольно-вимірювальної апаратури для відновлення функціональності після пошкоджень [34].

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. В кваліфікаційній роботі для дослідження вибрано одну типову двохскатну зварну ферму, довжиною 18 м та висотою при опира́ні на колону 1,440м і 1,890м по середині (в гребені).

2. Вибрано дві комп'ютерно моделюючі інженерні методики дослідження зварних ферм, які представлені в функціоналі потужного програмного комплексу SolidWorks, який дозволяє, як розробляти креслення конструкцій так і проводити розрахунки.

3. Визначено статичні навантаження на вузли верхнього поясу досліджуваної зварної ферми. Експлуатаційні навантаження на проміжні вузли верхнього поясу становить 37,80 кН, а на крайні вузли 18,90 кН;

4. Проведено дослідження методів розрахунку міцнісних характеристик елементів ферми, детально описано порядок дій для отримання правильного результату розрахунку НДС зварної ферми методом спрощеної та повної розрахункової моделі. Визначено відмінні та спільні етапи при розрахунку даними методами в програмному комплексі SolidWorks.

5. З використанням прикладного програмного пакету SolidWorks проведено дослідження комп'ютерно моделюючим експериментом методом спрощеної розрахункової моделі визначено, що найбільші напруження виникають в центральній панелі нижнього поясу ферми 127 МПа. Проаналізувавши результати НДС в верхньому поясі ферм можна зробити висновок, що найбільша локалізація НДС в даному елементі становить в вузлі опира́ння і рівне 84,8 МПа. Виявлено, що напруження в верхньому поясі ферми значно менші, ніж напруження в нижньому поясі ферми.

6. З використанням прикладного програмного пакету SolidWorks проведено дослідження комп'ютерно моделюючим експериментом методом спрощеної розрахункової моделі визначено, що найбільші напруження виникають в вузлі опира́ння розкосу Р1 на нижній пояс ферми 219,6 МПа. Проаналізувавши результати НДС в верхньому поясі ферм можна зробити що найбільша локалізація НДС в

даному елементі становить в вузлі опиранні і рівне 167,297 МПа. Виявлено, що напруження в верхньому поясі ферми значно менші напруження, ніж в нижньому поясі ферми.

7. Встановлено, що спрощена розрахункова модель дозволяє значно скоротити час розрахунку та обчислювальні ресурси, при цьому дає результати з допустимою для інженерної практики точністю у випадках простих конструкцій та рівномірних навантажень. Повна розрахункова модель забезпечує вищу точність результатів, особливо при складній геометрії, локальних концентраціях напружень або нерівномірному розподілі навантажень, однак потребує більших обчислювальних ресурсів і часу.

8. Надано рекомендації щодо вибору методики розрахунку залежно від складності ферми, вимог до точності аналізу та доступних обчислювальних ресурсів.

9. Підтверджено, що SolidWorks Simulation є ефективним інструментом для моделювання плоских металевих ферм при правильному виборі типу розрахункової моделі відповідно до поставлених задач.

БІБЛІОГРАФІЯ

1. ДБН В-2.6-163:2010 Конструкції будівель і споруд. Сталеві конструкції. Норми проектування, виготовлення і монтажу : – К.: Укрархбудінформ, 2009. – 206 с.
2. ДБН В.1.2-14:2018 Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд. Зі Зміною № 1 , : К., Мінрегіон України, – 2018, 41 с
3. ДБН В.2.6-198:2014 Сталеві конструкції. Норми проектування. Зі зміною №1, : К., Мінрегіон України, – 2014, 128 с.
4. ДБН В.1.2-6:2021 Основні вимоги до будівель і споруд. Механічний опір та стійкість: -К., Державний науково-дослідний інститутбудівельних конструкцій, – 2021, 28 с
5. Металеві конструкції: підруч. [для студ. вищ. навч. закл.] / [Нілов О. О., Пермяков В. О., Шимановський О. В. та ін.]. – К.: Вид-во “Сталь”, 2010. – 869 с.
6. Юркевич А.М. Особливості сучасного будівництва під впливом цифрових технологій /А. Юркевич// Матеріали: XIII Міжнародної студентської науково - технічної конференції «Актуальні задачі сучасних технологій», 11-12 грудня 2024 року., Т.: ТНТУ, 2024 — С. 104
7. Розрахунок плоских ферм: методичні рекомендації і завдання з дисципліни «Теоретична механіка» для студентів будівельних спеціальностей / Упоряд. : Л.Д. Мисник, М.В. Соломаха ; М-во освіти і науки України, Черкас. держ. технол. ун-т. – Черкаси : ЧДТУ, 2016. – 28 с.
8. Шингера Н. Я. Моделювання пошкодження зварних будівельних ферм / Н. Я. Шингера, Я. О. Ковальчук, І. Б. Окіпний // Вісник Тернопільського нац. техн. унту ім. І. Пулюя. – 2011. – Спецвип., част. 2 – С. 112–117.
9. Ковальчук Я. О. Моделювання напружено-деформованого стану нижнього пояса будівельної зварної ферми / Я. О. Ковальчук, Н. Я. Шингера, О.І.Рибачок // Вісник ТНТУ ім. Івана Пулюя. – 2014. № 2– С. 34 – 39.

10. Ковальчук Я. О. Моделювання поведінки зварної кроквяної ферми при розподілених навантаженнях / Я. О. Ковальчук, Н. Я. Шингера, О.І.Качка // Вісник ТНТУ ім. Івана Пулюя. – 2015. № 3(79)– С. 46 – 51 — (Механіка та матеріалознавство).

11. Ковальчук Я.О. Деформування зварної будівельної ферми при дії теплових впливів / Я.О. Ковальчук, М.П.Бобик, О.І.Рибачок, А.В.Бойчук // II наук.- техн. конф. мех.-техн. ф-ту Тернопільського нац. тех. ун-ту ім. І. Пулюя, 24–25 квіт. 2013р. : тези доп. – , Тернопіль, 2013. – С. 12.

12. Ковальчук Я. О. Моделювання напружень в елементах зварної ферми при нагріванні / Я. Ковальчук, Н. Шингера // Матеріали XXI наукової конференції ТНТУ ім. І. Пулюя, 16-17 травня 2019 року. — Т. : ТНТУ, 2019. — С. 107. — (Матеріалознавство, міцність матеріалів і конструкцій, будівництво).

13. Шингера Н.Я. Статистична модель для визначення залишкового ресурсу типової зварної ферми при циклічних навантаженнях : дис. канд. техн. наук : 01.05.02 / Н. Я. Шингера; Терноп. нац. техн. ун-т ім. І. Пулюя. - Т., 2012. - 157 с.

14. Ясній П. В. Верифікація результатів моделювання напруженодеформованого стану зварної ферми / Ясній П. В., Ковальчук Я. О., Шингера Н. Я., Рибачок О. І. // Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій [Текст]: Зб. наук. статей / За заг. ред. Лучка Й.Й. – Львів: Каменярь, 2014. – Вип. 10. – С.461

15. Рибачок О.І. Деформування зварної підкроквяної ферми при статичних навантаженнях: Пояс. зап. до дип. роб. / І. О. Рибачок; Терноп. нац. техн. ун-т ім. І. Пулюя. - Т., 2013. - 96с. -укр

16. Сидорак Д.П. РАЦІОНАЛЬНІ СТАЛЕВІ КОМБІНОВАНІ КРОКВЯНІ ФЕРМИ: дис. канд. техн. наук / П. Д. Сидорак; Львів нац.. ун-т «Львівська Політехніка. - Т., 2024. - 218с. -укр

17 . Проектування металевих конструкцій. Сталевий каркас одноповерхової виробничої будівлі. Теоретичні основи проектування з прикладами розрахунку / М.І. Підгурський, І.М. Підгурський. – Тернопіль: ФОП Паляниця В.М, 2021. – 236 с.

18. Мирзяєв І.О. Деформування зварної підкрюв'яної ферми при статичних навантаженнях: квал. роб. / О. І. Мирзяєв ; Терноп. нац. техн. ун-т ім. І. Пулюя. - Т., 2020. - 86с. -укр
- 19 . Рябоконт П.О. Деформування зварної підкрюв'яної ферми при статичних навантаженнях: квал. роб. / О. П. Рябоконт ; Терноп. нац. техн. ун-т ім. І. Пулюя. - Т., 2020. - 64с. -укр
20. Ковальчук Я.О. Моделювання втомної пошкоджуваності вузлів підкрюв'яних ферм / Я.О. Ковальчук, Н.Я. Шингера, О.І. Качка // XVIII наук. конф. Тернопільського нац. тех. ун-ту ім. І. Пулюя, 29–30 жовт. 2014р. : тези доп. – Тернопіль, 2014. – С. 87.
21. Ковальчук Я.О. Вплив циклічних навантажень на пошкодження вузлів зварної ферми / Я.О. Ковальчук, Н.Я. Шингера // Всеукр. наук.-практ. конф. «Обладнання і технології сучасного машинобудування», 11–12 трав. 2017 р.: тези доп. – Тернопіль, 2017. – С. 90.
22. Kovalchuk Y. The influence of height of angular profile of rods on rectangular welded truss deformation / Yaroslav Kovalchuk, Natalya Shynhera // Scientific Journal of TNTU. – Tern. : TNTU, 2017. – Vol 88. – No 4. – P. 82–87. – (Mechanics and materials science).
23. Dong, P., Hong, J. K., Cao, Z., Structural stress based master S-N curve for welded joints, IIW Doc. XIII -1930-02/XV-1119-02, (2002) pp. 24. 76
24. Rand O., Givoli D. «Thermal analysis of space trusses including threedimensional», International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow, Vol. 2 Iss: 2. – P.115 – 125.
25. Ковальчук Я.О. Втомна пошкоджуваність вузлів зварних фермених мостів / Я.О. Ковальчук, Н.Я. Шингера, О.І. Качка // Міжнар. наук.-практ. конф. ім. д.т.н. Сокола Е.М. «Безпека руху і наукові засади експертних досліджень транспортних пригод та інженерних споруд», 9–11 верес. 2015 р.: тези. доп. – Львів, 2015. – С. 76.

26. Ковальчук Я. О. Комп'ютерне моделювання деформації зварної ферми з косинками у вузлах / Я. О. Ковальчук, Н. Я. Шингера // Вісник ТНТУ, – Т. : ТНТУ, 2016 – Том 83. – № 3. – С. 73-78. – (Механіка та матеріалознавство).

27. Ковальчук Я.О. Вплив експлуатаційних пошкоджень у вузлах зварних ферм на їх тримкість / Я.О Ковальчук, Н.Я. Шингера, В.В.Лазар // XX наук.-техн. конф. ТНТУ, 17–18 трав. 2017 р.: тези доп. – Тернопіль, 2017. – С. 146 (Матеріалознавство, міцність матеріалів і конструкцій, будівництво).

28. Ковальчук Я.О. Вплив циклічних навантажень на пошкодження вузлів зварної ферми / Я.О Ковальчук, Н.Я. Шингера // Всеукр. наук.-практ. конф. «Обладнання і технології сучасного машинобудування», 11–12 трав. 2017 р.: тези доп. – Тернопіль, 2017. – С. 90.

29. Sturm, S., Nussbaumer, A., Hirt, M. A., Fatigue behaviour of cast steel nodes in bridge structures, Proceed. of the 10th Int. Symp. on Tubular Structures, pp. 357-364, Tubular Structures X, A.A. Balkema Publishers, Madrid, 2003.

30. M. A. Lotfollahi-Yaghin, H. Ahmadi, “Effect of geometrical parameters on SCF distribution along the weld toe of tubular KT-joints under balanced axial loads,” International Journal of Fatigue, vol. 32, pp. 703–719, 2010.

31. H. Ahmadi, M. A. Lotfollahi-Yaghin, Y. B. Shao, M. H. Aminfar, “Parametric study and formulation of outer-brace geometric stress concentration factors in internally ring-stiffened tubular KT-joints of offshore structures,” Applied Ocean Research, vol. 38, pp. 74–91, 2012

32. Методичні вказівки до написання розділу з Охорони праці в будівництві для спеціальності 192 "Будівництво та цивільна інженерія"/ В.Б. Каспрук - Тернопіль : ТНТУ, 2024-15с.

33. Навчальний посібник «ТЕХНОЕКОЛОГІЯ ТА ЦИВІЛЬНА БЕЗПЕКА. ЧАСТИНА «ЦИВІЛЬНА БЕЗПЕКА»» / автор-укладач В.С. Стручок– Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., – 156 с.

34. Методичний посібник для здобувачів освітнього ступеня «магістр» всіх спеціальностей денної та заочної (дистанційної) форм навчання «БЕЗПЕКА В

НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ» / В.С. Стручок –Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., –156 с.