

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: Напружено-деформований стан елементів зварної трапецевидної
ферми 8000x580 при дії експлуатаційних чинників

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

Будівництво та цивільна інженерія

(шифр і назва спеціальності)

Волянський В.А.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Керівник

(підпис)

Ковальчук Я.О.

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

(підпис)

Мещерякова О.М

(прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри

(підпис)

Ясній В.П.

(прізвище та ініціали)

Рецензент

(підпис)

Бобик М.П.

(прізвище та ініціали)

Тернопіль
2024

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)
« » _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

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

1. Тема роботи: «Напружено-деформований стан елементів зварної трапецевидної ферми 8000x580 при дії експлуатаційних чинників»

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

Затверджені наказом ректора від « 15 » квітня 2024 року № 4/7 - 346

2. Термін подання студентом завершеної роботи 20.05.2024р

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

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

Вступ; Фермові конструкції в будівництві; Вплив статичних навантажень на міцність зварних ферм; Міцність зварних ферм за умов статичних навантажень; Циклічні навантаження та їхній вплив на параметри напружено-деформівного стану ферми; Аналіз результатів досліджень інших авторів і формування власних досліджень; Методика дослідження ферми при дії циклічних навантажень; Визначення поведінки досліджуваної ферми при дії статичних навантажень; Визначення параметрів напружено-деформівного стану при дії статичних навантажень; Визначення параметрів напружено-деформівного стану при дії циклічних навантажень; Конструктивні і технологічні пропозиції щодо підсилення даної ферми; Визначення параметрів напружено-деформуваного стану ферми після підсилення при дії циклічних навантажень; Охорона праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях; Загальний висновок; Бібліографія.

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

1.Базова конструкція ферми.

2.НДС в елементах ферми (без навантаження підйимального обладнання, сендвіч панель і снігу).

3.Варіанти підсилення ферми.

4.НДС в елементах ферми з навантаженням підйимального обладнання, сендвіч панель і снігу.

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 01.04.2024

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Зварні ферми й особливості їх роботи за умов різних силових факторів	12.04.2024	
2	Використання методичних підходів задля забезпечення міцності й довговічності зварних ферм	16.04.2024	
3	Дослідження даної ферми в умовах експлуатації з фактором впливу зовнішніх чинників	23.04.2024	
4	Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	10.05.2024	
5	Загальний виновок	15.05.2024	

Студент

_____ (підпис)

Волянський В.А.

_____ (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

_____ (підпис)

Ковальчук Я.О.

_____ (прізвище та ініціали)

ЗМІСТ

		Стор.
	ВСТУП.....	5
Розділ 1	ЗВАРНІ ФЕРМИ Й ОСОБЛИВОСТІ ЇХ РОБОТИ ЗА УМОВ РІЗНИХ СИЛОВИХ ФАКТОРІВ.....	7
1.1	Значення фермових конструкцій у будівельній галузі.....	7
1.2	Основні типи зварних ферм.....	8
1.3	Тривалість експлуатації зварних ферм під впливом циклічних навантажень.....	10
1.4	Узагальнення результатів дослідження інших авторів й формування для власних досліджень.....	14
1.6	Висновки за розділом 1.....	15
Розділ 2	МЕТОДИЧНІ АСПЕКТИ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ НДС В ЕЛЕМЕНТАХ ФЕРМОВИХ КОНСТРУКЦІЙ.....	16
2.1	Вибір умов навантаження ферми.....	16
2.2	Методика дослідження з застосуванням програмних комплексів	18
2.3	Комп'ютерно-моделюючий експеримент і його порядок проведення.....	19
2.5	Висновок за розділом 2.....	24
Розділ 3	НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ЕЛЕМЕНТІВ ДОСЛІДЖУВАНОЇ ФЕРМИ.....	25
3.1	Поведінка ферми при дії рівномірно- розподіленого.....	25
	навантаження вздовж верхнього поясу ферми.....	
3.2	Поведінка ферми при дії зосередженого навантаження на середину верхнього поясу.....	32
3.3	Поведінка ферми при дії зосередженого навантаження на вузли нижнього поясу.....	39
3.4	Циклічне навантаження на ферму під впливом зовнішніх чинників.....	49

3.5	Пошкодження і руйнування базової ферми при дії циклічних навантажень.....	51
3.6	Висновок за розділом 3.....	58
Розділ 4	ДОСЛІДЖЕННЯ ЗМІЦНЕНОЇ ФЕРМИ.....	59
4.1	Пропозиції щодо зміцнення ферми.....	59
4.2	Дослідження зміцненої ферми під дією статичного й циклічного навантажень.....	59
4.3	Висновок за розділом 4.....	65
Розділ 5	ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....	66
5.1	Охорона праці.....	66
5.2	Правила охорони праці при зварюванні елементів ферми.....	67
5.3	Оцінка стійкості елементів ферми до впливу ударної хвилі ядерного вибуху і заходи щодо її підвищення.....	68
	ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВОКИ.....	71
	БІБЛІОГРАФІЯ.....	72
	ДОДАТОК А Довідка про використання результатів роботи.....	

ВСТУП

Використання металевих фермових конструкцій в сучасному будівництві зумовлено високими показниками міцності при відносно низькій матеріаломісткості в порівнянні із залізобетонними конструкціями аналогічного функціонального призначення.

Однак існує проблема проєктування зварних ферм за класичними розрахунковими методиками зумовлена тим, що всі вузли вважаються шарнірними, а стержні такими, що працюють лише на розтяг і стиск.

Сучасні методики дослідження зварних ферм базуються на прикладних програмних пакетах і дають можливість комп'ютерно-моделюючим експериментам виявити фактичні показники напружено-деформованого стану (НДС) в елементах ферми при впливі конструкційних, технологічних та експериментальних чинників.

Актуальність теми зумовлена тим, що її розкриття дає можливість забезпечити міцнісні показники типової зварної ферми з врахуванням багатофакторного впливу, досягнувши при цьому високий ступінь достовірності отриманих результатів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Роботу виконано у рамках наукових досліджень кафедри будівельної механіки ТНТУ.

Мета й задачі роботи. Метою роботи є визначення параметрів НДС в конструктивних елементах ферми і їх з'єднаннях при дії статичних та циклічних навантаженнях, які характерні для експлуатаційних умов конструкції.

Для розкриття теми і досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі задачі:

- вибрати типову зварну ферму, вказати її тип, розміри, схеми базування і прикладання навантажень, їх величину і тип;
- дослідити параметри НДС зварної ферми при дії статичних навантажень;
- оцінити міцність елементів ферми;
- дослідити вплив циклічних навантажень на поведінку ферми;

- визначити місця локалізації максимальних параметрів НДС у конструктивних елементах ферми та запропонувати варіанти їх підсилення;
- оцінити поведінку ферми після підсилення.

Об'єктом дослідження є зварна ферма 8000x580мм, яка використовується для дахового накриття виробничої будівлі.

Предметом дослідження є параметри НДС в елементах зварної ферми при дії на конструкцію експлуатаційних чинників.

Методи дослідження: аналіз наявних джерел інформації за результатами досліджень інших авторів та релевантні нормативні документи за темою роботи; комп'ютерний моделюючий експеримент в середовищі SolidWorks.

Наукова новизна одержаних результатів. Отримала подальший розвиток методика комп'ютерного моделювання для оцінювання міцності зварної ферми.

Практичне значення одержаних результатів. Результати, отримані в даній роботі, рекомендується застосовувати при проектуванні ферм, що зазнають дії циклічних і статичних навантажень, для оцінювання параметрів НДС та можливості зміцнення ферми. Результати досліджень впроваджено на ТОВ «Смарттехбуд» м. Тернопіль.

Апробація результатів магістерської роботи. Результати роботи доповідались на VII Міжнародній студентській науково-технічній конференції (м. Тернопіль, ТНТУ, 25-26 квітня, 2024 р.).

Публікації. Результати роботи опубліковано в матеріалах збірника тез VII-ї Міжнародної студентської науково-технічної конференції [1].

Ключові слова: зварні ферми, статичні навантаження, циклічні навантаження, руйнування, опорні вузли, проміжні вузли, напружено-деформований стан.

РОЗДІЛ 1

ЗВАРНІ ФЕРМИ Й ОСОБЛИВОСТІ ЇХ РОБОТИ ЗА УМОВ РІЗНИХ СИЛОВИХ ФАКТОРІВ

1.1 Значення фермових конструкцій у будівельній галузі

Ферма – це конструктивний елемент, складений із стрижнів, які формують трикутні з'єднання, забезпечуючи поведінку всієї конструкції як одного цілого. Фермові системи часто застосовуються у будівництві мостів, дахів та веж [2].

Ферма забезпечує міцну форму, здатну витримати значні зовнішні навантаження на великих прольотах, де її компоненти переважно відчують осьове розтягнення чи стиснення. Компоненти ферми перехрещуються в кроквяних точках або панельних вузлах.

З'єднані елементи, що формують верхню і нижню частини ферми, називаються верхнім і нижнім поясами відповідно. Похилі та вертикальні частини, які з'єднують ці пояси, утворюють так звану павутину ферми. Конструкція ферми також включає похилі розкоси та вертикальні стійки.

Фермові конструкції відіграють ключову роль у будівельній індустрії, оскільки вони забезпечують високу міцність та стабільність при мінімальному використанні матеріалів. Ці конструкції ефективно розподіляють навантаження завдяки своїй геометрії, що дозволяє будувати мости, дахи, ангари та інші споруди з великими прольотами без потреби в масивних опорах.

Ферми дають можливість оптимізувати просторові планування, забезпечуючи відкриті простори без перегородок, що є особливо корисним у комерційних та промислових будівлях [3, 4].

Перевагою фермових конструкцій є їхня здатність до ефективного розподілу навантажень, що дозволяє конструкціям витримувати великі навантаження при використанні порівняно меншої кількості матеріалів. Це робить ферми ідеальними для створення великих відкритих просторів без необхідності в масивних опорах або стінах, забезпечуючи більшу гнучкість у плануванні архітектурних рішень. Також, завдяки своїй конструктивній ефективності, ферми забезпечують зниження

вартості матеріалів та монтажу, що робить їх економічно вигідними для різноманітних будівельних проєктів [5, 6, 7].

1.2 Основні типи зварних ферм

Зварні ферми є критично важливими конструкціями у сучасному будівництві, оскільки забезпечують міцність, довговічність та економічність великих прогонів. Їхня конструкція дозволяє різноманітність форм і типів, які відповідають конкретним інженерним та архітектурним вимогам. Ось декілька поширених типів зварних ферм:

1. Плоскі ферми (Flat trusses): Цей тип характеризується прямою нижньою хордою та верхньою хордою, що може мати злегка опуклу або вигнуту форму. Вони ідеально підходять для покриття великих просторів і часто використовуються у комерційних та промислових будівлях (рис. 1.1).



Рисунок 1.1 – Плоска ферма [8]

2. Трикутна ферма (Triangular trusses): З класичною трикутною формою, ці ферми мають високу структурну міцність і широко застосовуються для покрівельних конструкцій та мостів (рис 1.2).

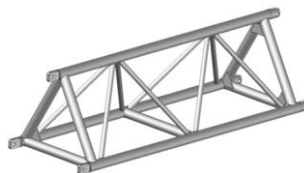


Рисунок 1.2 – Трикутна ферма [8]

3. Параболічні ферми (Parabolic trusses): Ці ферми мають параболічну форму верхньої хорди, що дозволяє оптимальний розподіл навантаження і

використовується в архітектурних конструкціях, де важливий естетичний вигляд, переважно використовуються в мостобудуванні (рис. 1.3).

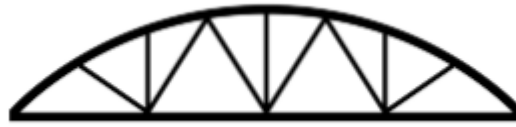


Рисунок 1.3 – Параболічна ферма [8]

4. Арочні ферми (Arch trusses): Використовуються для створення аркових структур, арочні ферми забезпечують естетично привабливі, але водночас міцні конструкції, ідеально підходящі для великих відкритих просторів (рис. 1.4).



Рисунок 1.4 – Арочна ферма [9]

5. Ферми з похилим павутинням «ножиці» (Scissors trusses): Цей тип має перехрещені верхні хорди, що формують піднятий центр, ідеальний для будівель з високими стелями (рис. 1.5).

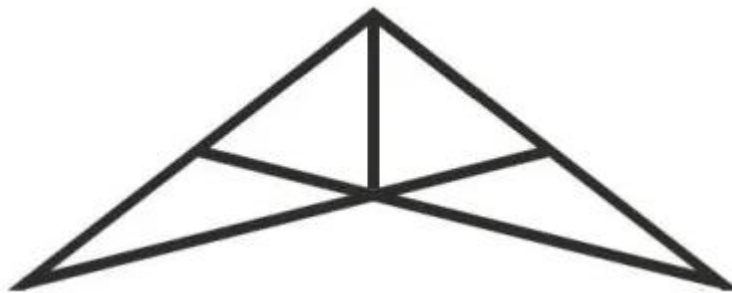


Рисунок 1.5 – Ферма «ножиці» [9]

6. Кроквяна ферма (Pitched trusses): Це традиційні ферми з нахилом, що часто застосовуються в житловому будівництві для підтримки дахів (рис. 1.6).

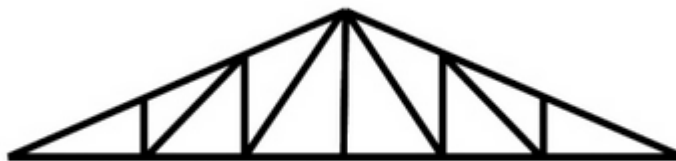


Рисунок 1.6 – Кроквяна ферма [9]

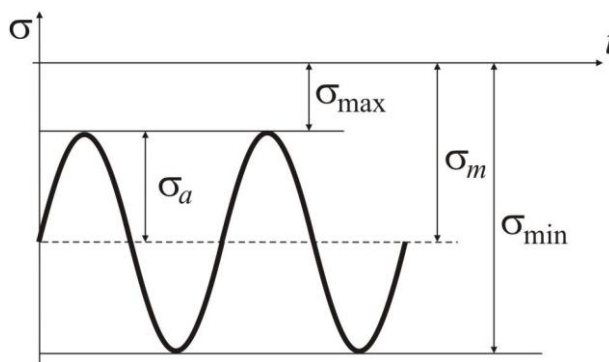
Кожен з цих типів може бути спроектований і змонтований з урахуванням специфічних технічних і естетичних потреб проєкту, використовуючи переваги зварних з'єднань для забезпечення міцності та довговічності конструкції [10, 11].

1.3 Тривалість експлуатації зварних ферм під впливом циклічних навантажень

Стійкість зварних ферм до зносу визначається такими чинниками, як: конструкція ферми, типи та інтенсивність навантажень, частота циклів навантаження. Безпека використання ферм зберігається до досягнення граничного стану [12].

Критичний стан ферми під циклічними навантаженнями досягається, коли втомна тріщина зростає до такого розміру, що ферма більше не може витримувати задане навантаження. Такі тріщини зазвичай формуються в місцях з максимальними напруженнями і з часом розширюються до критичних розмірів [13, 14].

Конструкція може мати певні ознаки накопичення й розвитку втомної тріщини в елементах під впливом циклічних навантажень (рис. 1.7).



σ_{\min} – мінімальне напруження; σ_{\max} – максимальне напруження; σ_m – середнє напруження; σ_a – амплітуда

Рисунок 1.7 – Характерні напруження при циклічних навантаженнях [15]

З іншого боку, втомна тріщина - це результат втомного пошкодження, що призводить до змін фізико-механічних властивостей матеріалу компоненту. Ключовою властивістю матеріалу при оцінюванні довговічності конструкції є тріщиностійкість. Завдяки їй матеріал може існувати й витримувати певні навантаження без руйнування протягом визначеного часу уже з існуючою тріщиною [16].

Стан напруження і деформації у конструктивних елементах ферм та зварних з'єднаннях визначає міцність ферми загалом. Аналіз цих параметрів є важливим для інженерів при проектуванні нових зварних ферм і оцінюванні стійкості існуючих конструкцій. На жаль, стандартні методики проектування зварних ферм зазвичай включають проєктні розрахунки, що виконуються вручну за допомогою традиційних аналітичних формул (рис. 1.8) [17, 18], які не дозволяють адекватно оцінити НДС в умовах впливу різноманітних конструктивних, технологічних, експлуатаційних і аварійних чинників [19].

Проведення натурних випробувань (рис. 1.9) [20, 21], повномасштабних зварних ферм є складним через високу вартість експериментальних зразків, значні габарити та велику енергоємність випробувального устаткування. Тому в багатьох дослідженнях зварних ферм застосовується методика натурних експериментів з фізичними моделями або методика комп'ютерного моделювання за допомогою сучасних програмних комплексів.

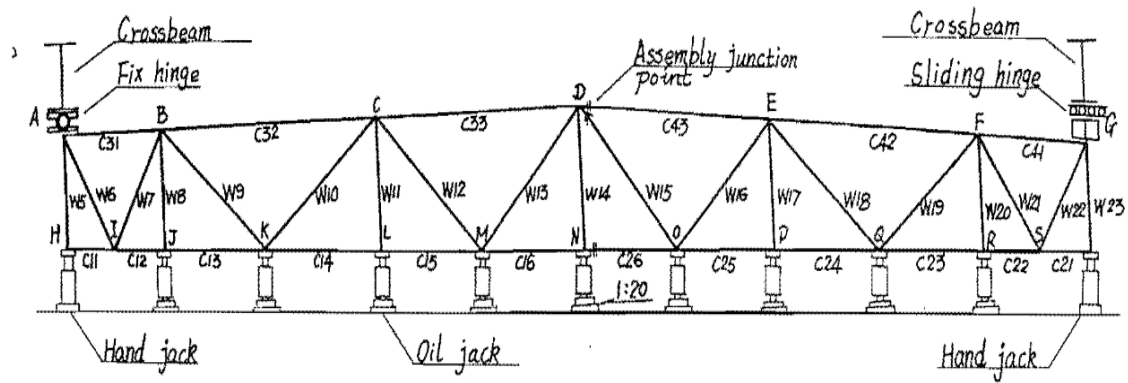


Рисунок 1.8 – Конструкція зварної ферми 30000x2300 [22]

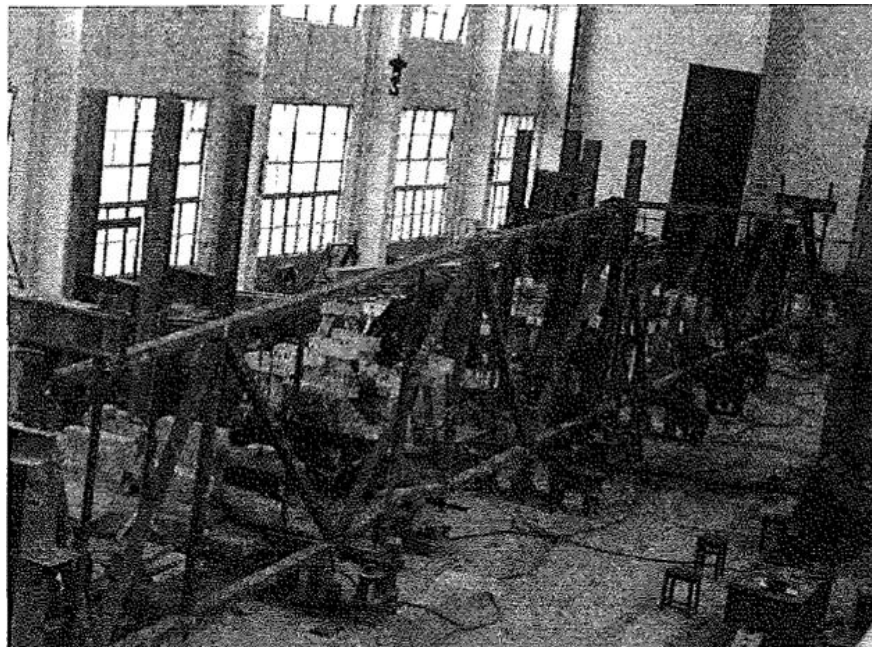


Рисунок 1.9 – Зварна ферма 30000x2300 після руйнування на випробувальному комплексі [22]

Дослідження зварних з'єднань у фермі зображено на рисунку 1.10.

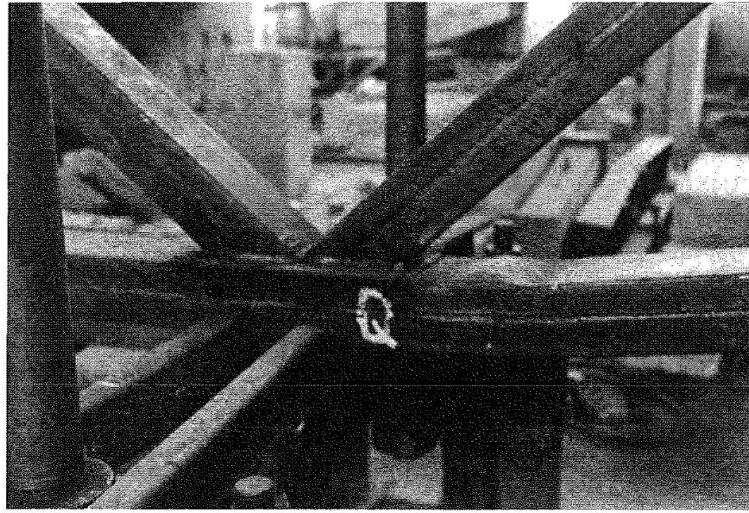


Рисунок 1.10 – Фото зварного з'єднання Q після руйнування на випробувальному комплексі [22]

Водночас сучасні комп'ютерні технології дозволяють аналізувати параметри НДС в елементах зварної ферми як подано на рис. 1.11, так і з графічно-чисельним поданням.

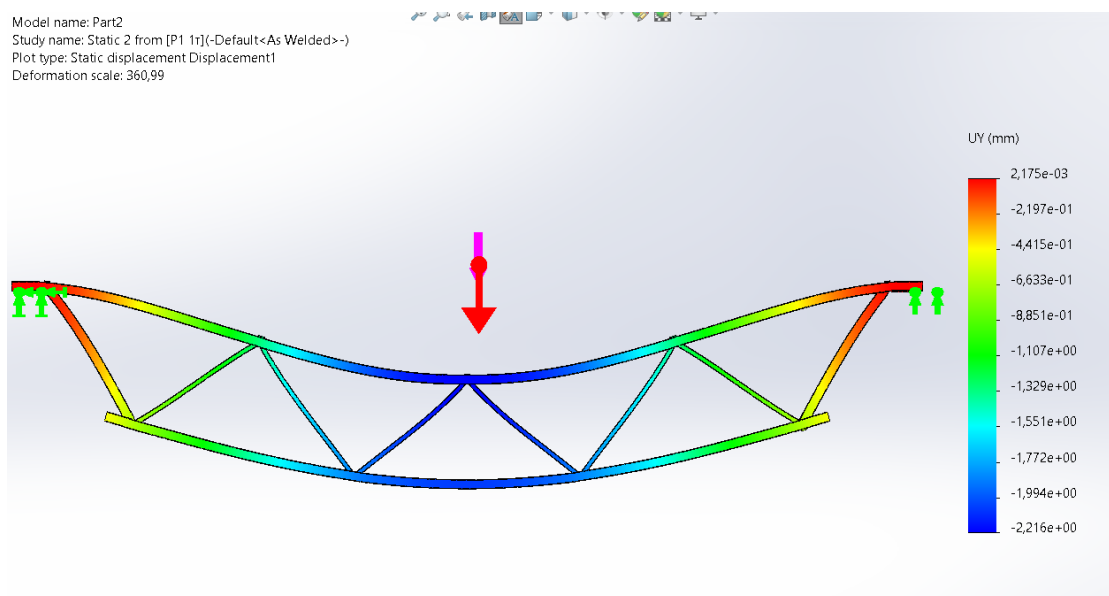


Рисунок 1.11 – Візуалізація деформації зварної ферми, отримана комп'ютерним моделюванням за умов навантаження на рівні граничного стану [23]

Визначивши параметри НДС в елементах зварної ферми, можна знайти найслабші місця конструкції й розглянути варіанти їх підсилення.

Найчастіше застосовують два типи зміцнення ферм:

- збільшення перерізу стержнів(рис. 1.12);
- підсилення пластинами.

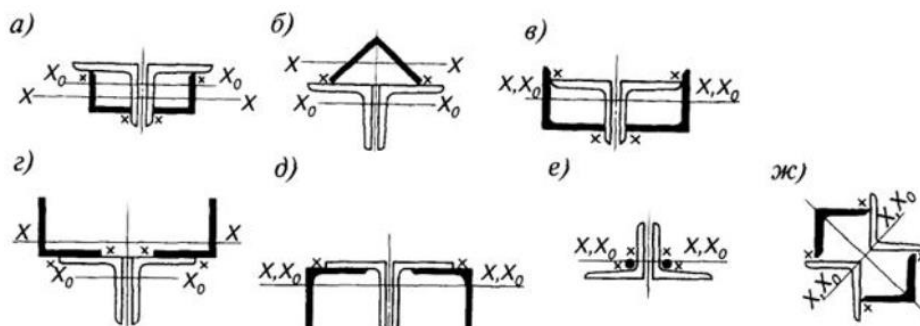


Рисунок 1.12 – Переріз окремих стержнів [24]

Також існує метод підсилення стислих стержнів ферм додаванням шпренгелів. Вони зменшують розрахункову довжину стержнів. Даний метод лише підвищує стійкість стержнів, а його використання відбувається лише при невеликих збільшеннях зусиль в стержнях або при їх викривленні [25].

1.4 Узагальнення результатів дослідження інших авторів й формування задач для власних досліджень

За результатами огляду існуючих досліджень зварних ферм виявлено, що зварні вузли є місцем локалізації напружень, тому є доцільним підсилення цих вузлів.

У дослідженні також потрібно з'ясувати параметри НДС в елементах ферми при циклічних і статичних навантаженнях. Для цього потрібно вирішити наступні завдання:

- вибрати типову зварну ферму, вказати її тип, розміри, схему базування і прикладання навантажень, їх величину і тип;
- дослідити параметри НДС зварної ферми при дії статичних навантажень;

- оцінити міцність елементів ферми;
- дослідити вплив циклічних навантажень на поведінку ферми;
- визначити місця локалізації максимальних параметрів НДС у конструктивних елементах ферми та запропонувати варіанти їх підсилення;
- оцінити поведінку ферми після підсилення.

1.5 Висновки за розділом 1

1. Розглянуто та проаналізовано інформаційну базу, що стосується дослідження зварних ферм для оцінювання параметрів НДС при їх навантажуванні.
2. Вивчено сучасні методи аналізу зварних ферм, використовуючи повномасштабні, напівнатурні та комп'ютерні моделювальні експерименти.
3. Досліджено причини виникнення тріщин у зварних вузлах ферм під впливом циклічних навантажень.
4. Вивчено традиційні способи підсилення для збільшення їх міцності.
5. Визначено завдання для власних досліджень.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИЧНІ АСПЕКТИ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ НДС В ЕЛЕМЕНТАХ ФЕРМОВИХ КОНСТРУКЦІЙ

2.1 Вибір умов навантаження ферми

Метою роботи є визначення параметрів НДС в конструктивних елементах ферми і їх з'єднаннях при дії статичних та циклічних навантаженнях, які характерні для експлуатаційних умов конструкції [26]. Вибрані типи навантажень:

- рівномірно-розподілене навантаження вздовж верхнього поясу ферми;
- зосереджене навантаження на середину верхнього поясу;
- зосереджене навантаження на крайні вузли нижнього поясу;
- зосереджене навантаження на середні вузли нижнього поясу;
- в циклічному режимі під впливом кран-балки й вантажу на нижній пояс ферми і при статичному навантаженні під впливом ваги покрівлі з навантаженням снігу.

Для дослідження вибрано 8-ми метрову ферму. Вибрана кроквяна ферма з паралельними горизонтальними нижнім (6м) і верхнім поясами і рівномірною трикутною решіткою. Розмір панелей 1,85 м. Пояси кроквяної ферми виготовлено з одної відправої частини профільної труби довжиною 8 м. Висота ферми 0,58 м. З'єднання елементів решітки з поясами ферми без фасонки. Конструктивну схему ферми наведено на рис. 2.1 [27].

Верхній пояс ферми виготовлено з гнутого зварного квадратного профілю зі перерізом 80x40x3 мм. Нижній пояс також зроблено з гнутого зварного квадратного профілю, з таким же перерізом 80x40x3 мм. Опорні стійки виготовлені з гнутого зварного квадратного профілю з перерізом 80x40x3 мм. Опорні розкоси також зроблені з гнутого зварного квадратного профілю, переріз яких становить 80x40x3 мм. Проміжні розкоси виконані з гнутого зварного квадратного профілю з перерізом 40x40x3 мм.

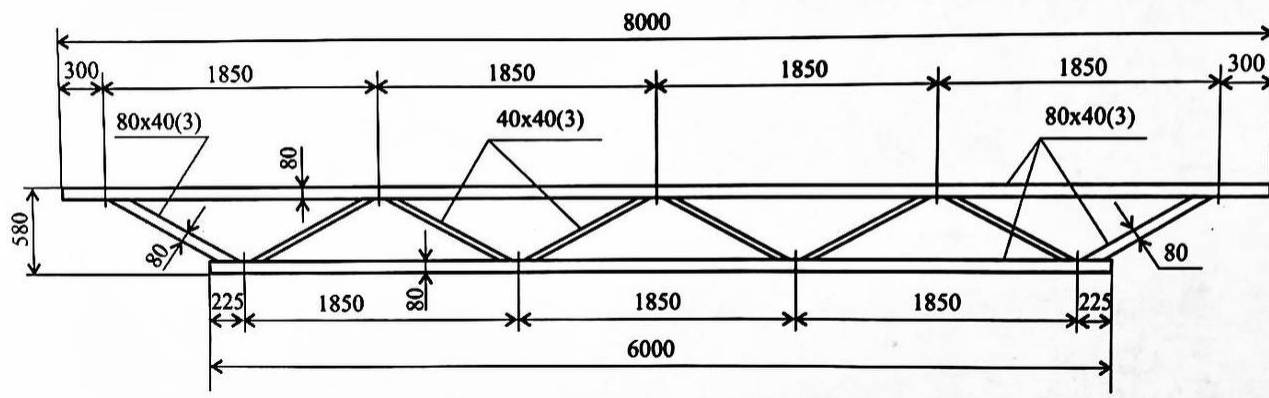


Рисунок 2.1 – Конструкція досліджуваної ферми

Експлуатаційні навантаження від ваги покрівлі згідно з технічним завданням приведено в табл 2.1.

Таблиця 2.1 – Навантаження від власної ваги покрівлі

№ п/п	Найменування навантаження	Нормативне навантаження мПа	Коефіцієнт надійності по навантаженню	Розрахункове навантаження мПа
	Сендвіч панель t-100мм	0,20	1,2	0,24
	Утеплювач, мінеральні жосткі плити	0,20	1,05	0,21
	Всього	0,4		0,45

Снігове навантаження на покрівлю визначено згідно [28, 29] (табл. 2.2).

Експлуатаційне розрахункове значення навантаження $S_e = \gamma_f S_0 C = 1,4$ МПа, $\gamma_f = 1$ – коефіцієнт надійності.

$S_0 = 1,4$ МПа – характеристична вага снігового настилу в четвертому сніговому районі [28, 29].

$$C = \mu C_e C_{alt} = 0,8$$

$\mu = 1$, коефіцієнт, що врахує вагу снігу залежно від ухилу поверхні.

$C_e = 1$, коефіцієнт особливостей експлуатації покрівлі.

$C_{alt} = 1$, коефіцієнт, що залежить від висоти споруди над рівнем моря

Таблиця 2.2 – Снігові навантаження на покрівлю

Район по вазі снігового покриву	Нормативне навантаження мПа	Коефіцієнт надійності по навантаженню	Розрахункове навантаження мПа	Примітка
4	1,4	1,2	1,68	

Досліджено, що розрахункове статичне навантаження на вузол середньої кроквяної ферми дорівнюватиме реакції опор покрівельних прогонів $(1.68\text{мПа}+0.45\text{мПа})\times 1.85\text{м} \times 3\text{м}=11,82\approx 12\text{кН}$

Також нам відомо, що при експлуатації на всі 4 ферми діє маса кран-балки, вона розміщена на нижньому поясі ферми й дає навантаження у 700 кг, а також рухомих вантаж 500 кг.

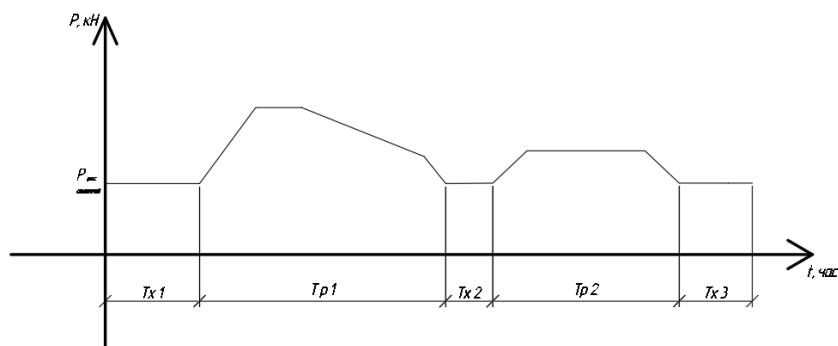
2.2 Методика дослідження з застосуванням програмних комплексів

У ході дослідження застосовано набір спеціалізованих та взаємодоповнюючих наукових методів: метод скінченних елементів, реалізований у програмному комплексі Solidworks. Руйнування може настати при навантаженнях, значно нижчих за межу текучості матеріалу, це явище відоме як втома матеріалу [30,31].

В роботі досліджується фермова конструкція, яка піддається циклічним навантаженням від кран-балки, розміщеної на нижніх поясах ферми, і від рухомого вантажу. Для цього потрібно вивчити реальні умови роботи кран-балки і використати ці дані для проведення комп'ютерного моделювального експерименту.

Реальні умови роботи включають опис процесу виробництва, його фізичний вплив на конструкцію, частоту навантажень і розвантажень, а також середню кількість цих навантажень за певний період часу. Також необхідно врахувати не лише частоту, а й інтенсивність навантажень, які діятимуть протягом цього часу.

Схему циклічних навантажень зображено на рисунку 2.2.



T_x - це проміжок часу, коли конструкція не піддається циклічним навантаженням.

T_{p1} , T_{p2} - це періоди, протягом яких конструкція зазнає циклічних навантажень.

P_{max} означає максимальне статичне навантаження, яке може витримати конструкція.

T_p - це тривалість одного циклу навантаження.

Рисунок 2.2 – Схема циклічних навантажень [32]

При проведенні комп'ютерного моделювального експерименту для аналізу циклічних навантажень необхідно спростити циклограму до базової форми, як показано на рис. 2.3.

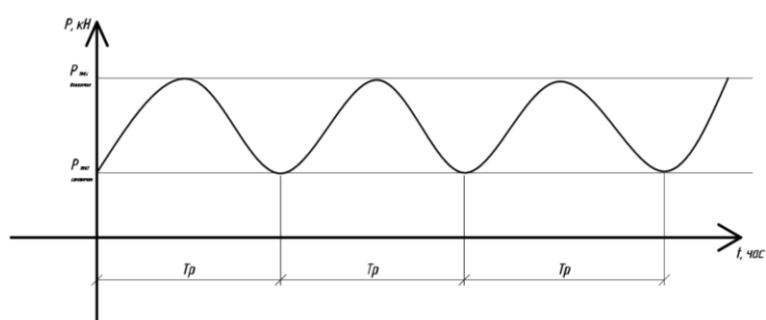


Рисунок 2.3 – Схематичне зображення циклограми узагальнених навантажень [32]

2.3 Комп'ютерно-моделюючий експеримент і його порядок проведення

У SolidWorks для розрахунку навантажень та переміщень під час статичного навантаження на ферму використовують модуль SolidWorks Simulation (раніше відомий як COSMOSWorks) [33,34]. Процес включає кілька основних кроків:

Моделювання конструкції - створюється 3D модель ферми в SolidWorks з використанням інструментів для побудови елементів (балок, колон, вузлів тощо).

Визначення матеріалів – кожному елементу моделі призначається відповідний матеріал. SolidWorks містить бібліотеку матеріалів з необхідними механічними властивостями (модуль пружності, межа міцності тощо).

Задання граничних умов - встановлюються точки кріплення конструкції, де вона підтримується або закріплена. Задаються навантаження: сили, моменти, тиск або інші види навантажень, які діють на ферму.

Мережування (Mesh) - модель розбивається на маленькі елементи, сітк (скінченні елементи), які використовуються для чисельного аналізу. Від точності cs залежить точність результатів.

Аналіз - виконується статичний аналіз. SolidWorks Simulation використовує метод скінченних елементів (FEM), щоб обчислити розподіл напружень, деформацій та переміщень у моделі.

Результати - після завершення аналізу, результати представлені у вигляді графіків, кольорових карт розподілу напружень, переміщень, деформацій та інших параметрів.

Ось короткий опис процесу розрахунку в SolidWorks Simulation:

1. Підготовка моделі - створення 3D моделі ферми.
2. Призначення матеріалів - вибір відповідних матеріалів для кожного елемента.
3. Задання граничних умов - встановлення точки закріплення та прикладання навантаження.
4. Сіткування - розбиття моделі на елементи для аналізу.
5. Запуск аналізу - виконання розрахунків методом скінченних елементів.
6. Аналіз результатів - перегляд результатів та прийняття рішень щодо міцності та безпеки конструкції.

SolidWorks Simulation є потужним інструментом для аналізу і оптимізації конструкцій, що дозволяє інженерам забезпечувати надійність і ефективність своїх розробок.

Можна переглядати максимальні та мінімальні значення напружень, переміщень, а також перевіряти, чи відповідає конструкція вимогам міцності.

Кожному елементу моделі призначається відповідний матеріал. SolidWorks містить бібліотеку матеріалів з необхідними механічними властивостями (модуль пружності, межа міцності тощо).

Важливим буде виконати розрахунок існуючої конструкції на параметри НДС, а також при необхідності розглянути їх опісля підсилення. В кваліфікаційній роботі буде використано програму SolidWorks, вона дозволяє точно визначати НДС у елементах, наближаючи показники до реальних умов [34].

Для аналізу поведінки ферми за допомогою програмного комплексу Solidworks потрібно пройти наступні етапи роботи:

1. Програмування ескізу ферми (рис. 2.6).

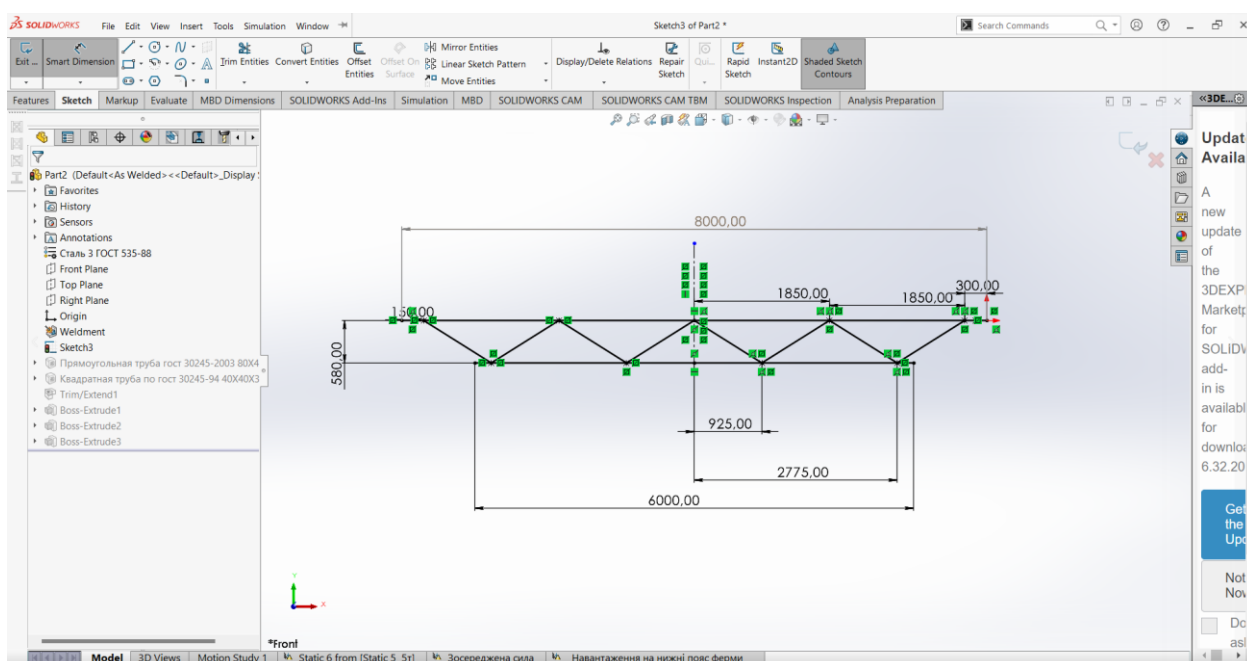


Рисунок 2.4 – Процес програмування ескізу

2. Вибір характеристик матеріалів (рис. 2.5).

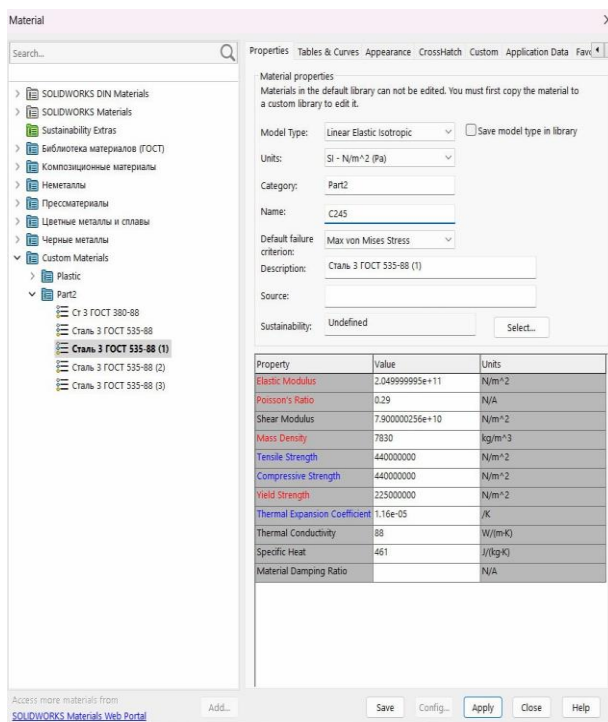


Рисунок 2.5 – Вибір характеристик матеріалів

3. Задання типу кріплення опирання ферми (рис. 2.6).

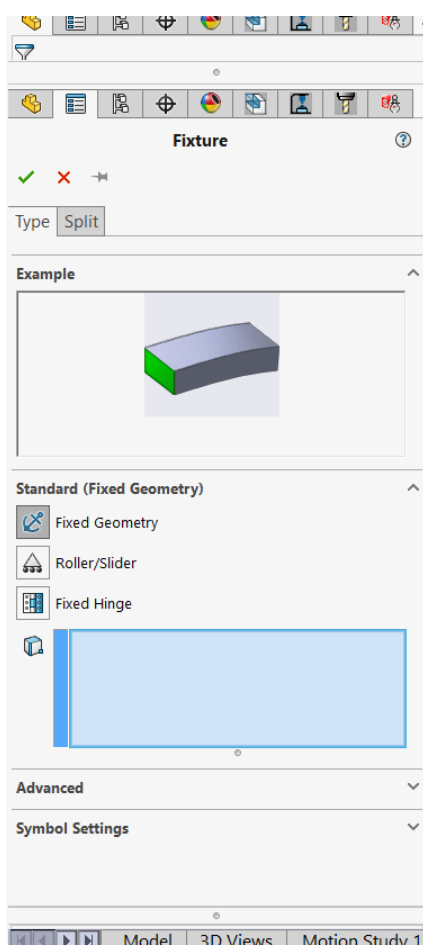


Рисунок 2.6 – Задання типу кріплення опирання ферми

4. Розбивання елементів ферми на сітку напруження задля отримання більш детальних результатів досліджень (рис. 2.7).

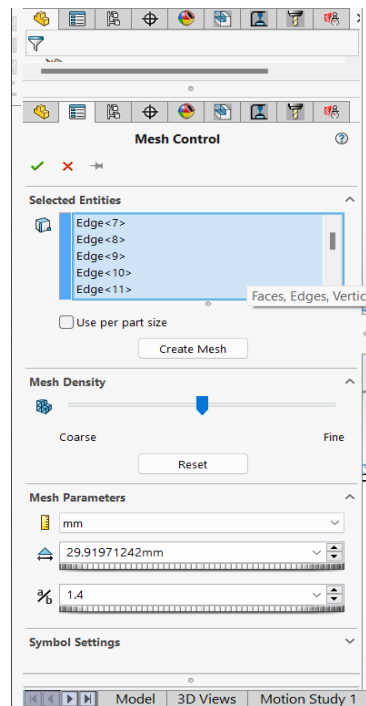


Рисунок 2.7 – Розбивання елементів ферми на сітку напружень

4. Задання навантажень та їх характеристики (рис. 2.8)

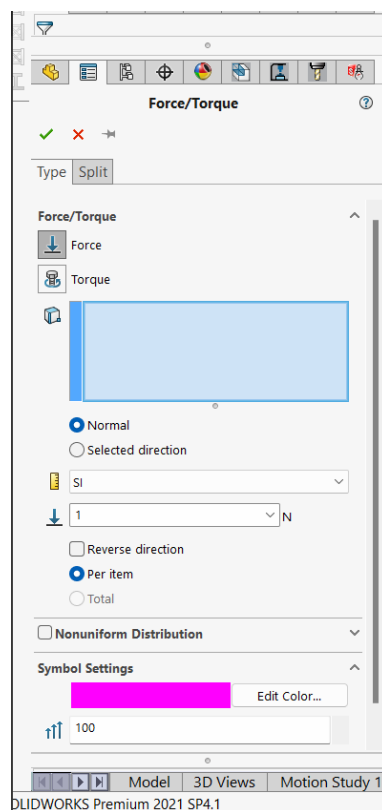


Рисунок 2.8 – Задання навантажень та їх характеристики

6. Задання схеми навантажень (рис. 2.9)

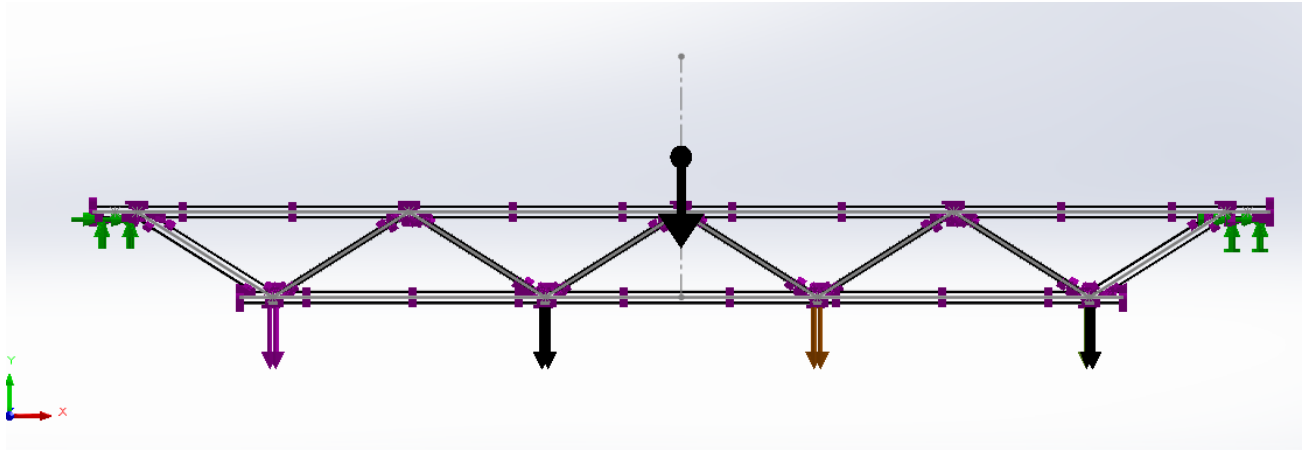


Рисунок 2.9 – Задання схеми навантаження

2.4 Висновок за розділом 2

1. Сучасні програмні пакети дозволяють враховувати комбінацію статичних та циклічних навантажень на конструкції.

2. Після аналізу програмного комплексу SolidWorks, встановлено, що він може використовуватись для дослідження різних типів конструкцій, включаючи зварні ферми під час експлуатації за методом визначення НДС в елементах ферми під час дії статичних та циклічних навантажень.

3. Проаналізовано роботу SolidWorks й визначено порядок роботи в програмі задля отримання параметрів НДС в елементах ферми.

РОЗДІЛ 3

НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНІЙ СТАН ЕЛЕМЕНТІВ ДОСЛІДЖУВАНОЇ ФЕРМИ

3.1 Поведінка ферми при дії рівномірно-розподіленого навантаження вздовж верхнього поясу ферми

Рівномірно-розподілене навантаження розглядається від 0 до руйнування ферми (плинності). Для цього виконано візуалізацію напружень по конструктивних елементах ферми і графіки їх зміни при зміні величини навантаження з наведеними таблицями отриманих результатів. Схему ферми вказано на рис. 3.1.

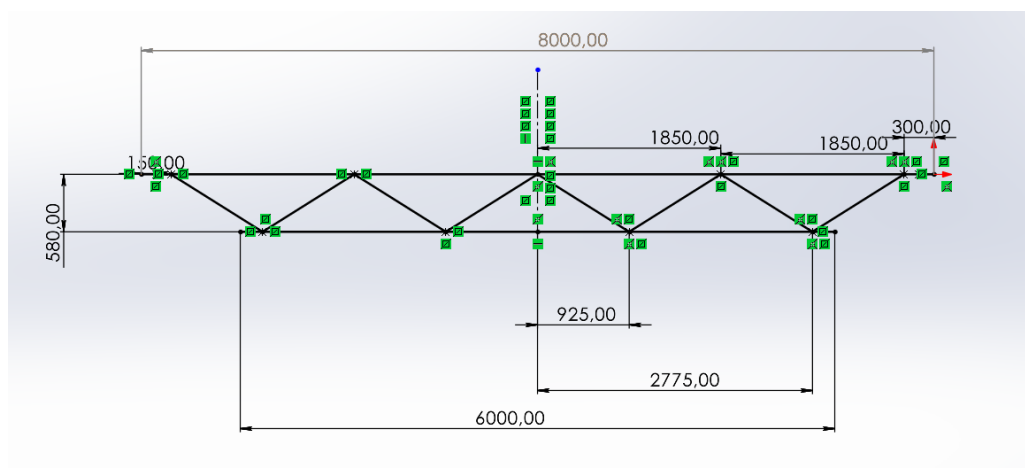


Рисунок 3.1 – Розрахункова схема зварної ферми

Аналіз ферми за допомогою програмного комплексу SolidWorks дав такі результати:

- створено просторову модель ферми з графічним відображенням результатів дослідження;
- отримано табличні дані напружено-деформованого стану (НДС) елементів ферми
- отримано запас несучої здатності

Розподіл напружень у фермі подано на рис. 3.2

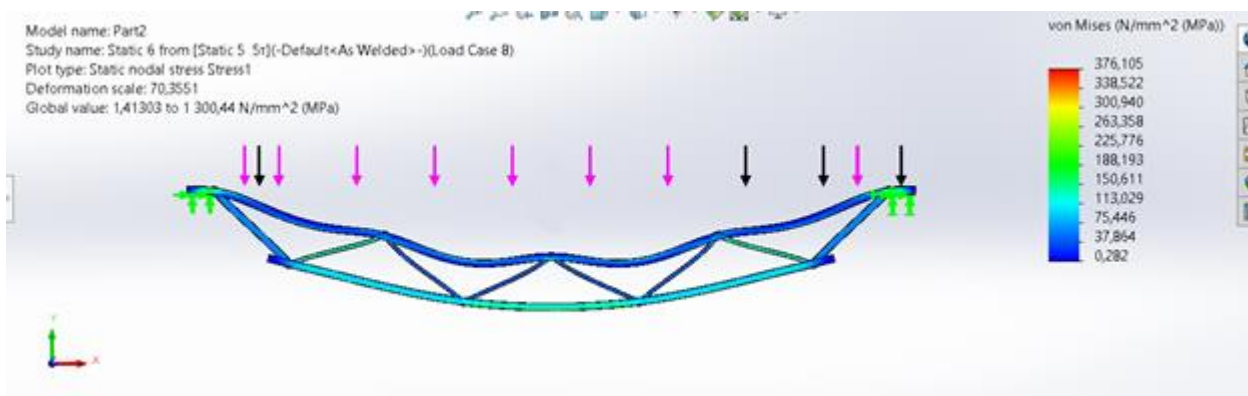


Рисунок 3.2 – Візуалізація напружень в елементах ферми.

Максимальні напруження зосереджені в опорних вузлах ферми (рис. 3.3) та проміжних вузлах нижнього пояса (рис. 3.4).

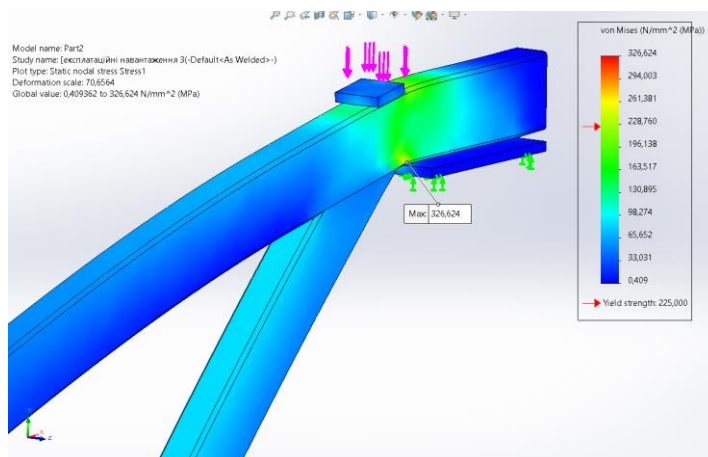


Рисунок 3.3 – Максимальні напруження в правому опорному вузлі ферми

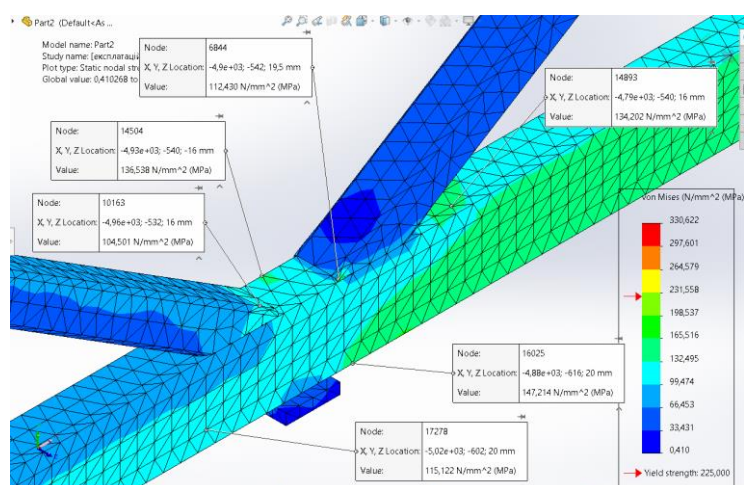


Рисунок 3.4 – Максимальні напруження в проміжному вузлі ферми

Переміщення ферми уздовж осі Y (прогин) під впливом заданих навантажень подано на рис. 3.6.

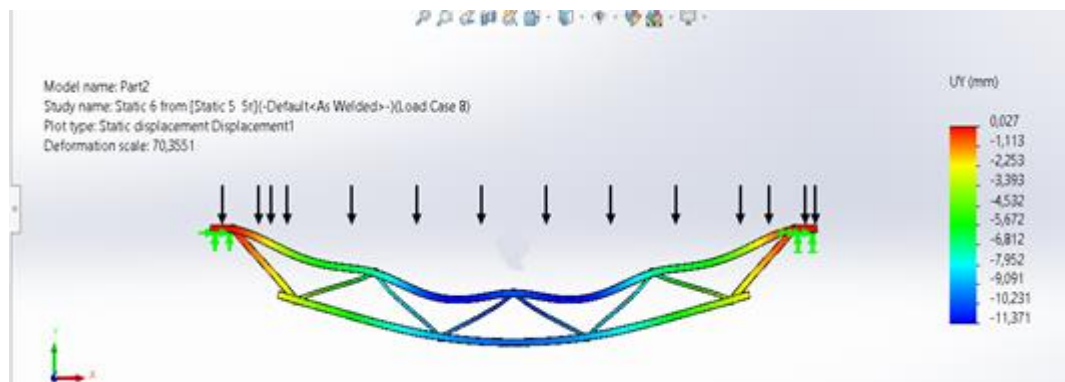


Рисунок 3.6 – Прогин ферми вздовж осі Y

Діаграма переміщень точок нижнього поясу, при дії рівномірно-розподіленого навантаження у 70 кН/м на верхній пояс, вздовж осі Y(прогин), по довжині ферми подано на рис. 3.7.



Рисунок 3.7 – Переміщення точок нижнього поясу вздовж осі Y

Діаграма переміщень точок верхнього поясу при дії рівномірно-розподіленого навантаження 70 кН/м на верхній пояс вздовж осі Y(прогин) по довжині ферми можна побачити на рис. 3.8.

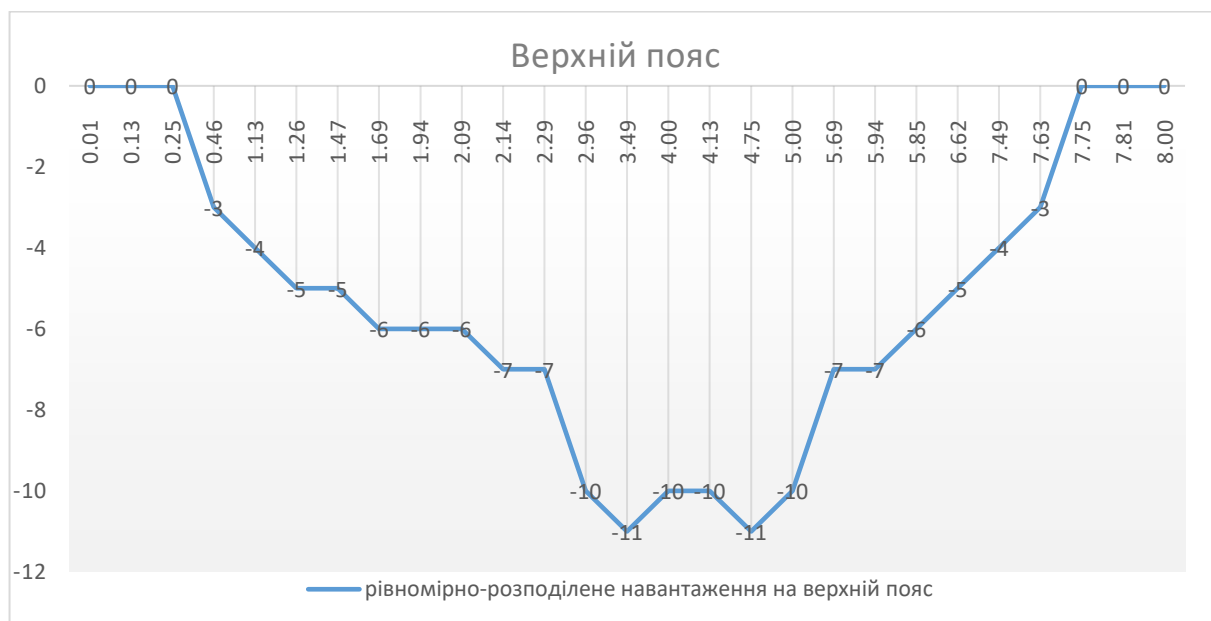


Рисунок 3.8 – Переміщення точок верхнього поясу вздовж осі Y

Проведено дослідження напружень в точках локалізації максимальних навантажень у нижньому поясі ферми по зовнішній поверхні зображені в рис. 3.9 й у верхньому поясі ферми (рис 3.10).

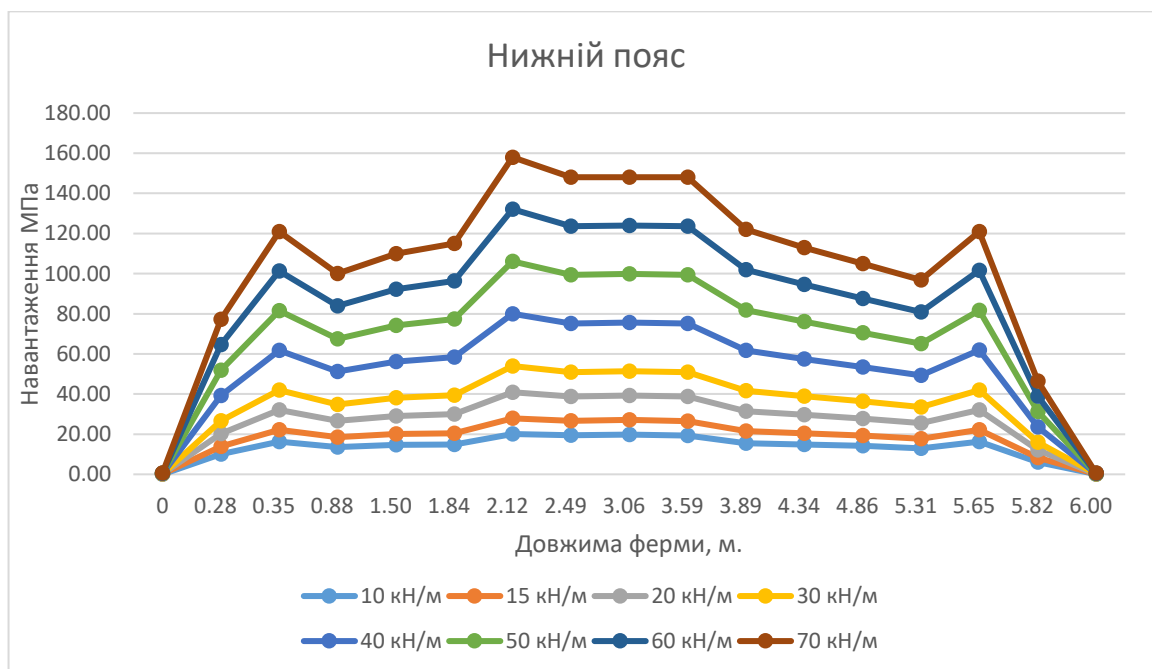


Рисунок 3.9 – Локалізація напружень по довжині нижнього поясу ферми при дії рівномірних навантажень

Аналізуючи графік напружень у точках локалізації максимальних напружень у нижньому поясі ферми по зовнішній поверхні, при дії рівномірно-розподіленого навантаження вздовж верхнього поясу ферми, можна зробити такі висновки:

1. Загальний характер розподілу напружень:

Напруження змінюється вздовж довжини ферми з різними піками та мінімумами.

Найбільші напруження спостерігаються в діапазоні від 2,1 м до 3,6 м, тобто в проміжних вузлах ферми

2. Максимальні напруження для навантаження в 70кН/м

Максимальне напруження досягає приблизно 160 МПа в ділянці від 2,1 м до 2.2 м.

Розрахунок запасу міцності для навантаження в 70 кН/м. Для розрахунку запасу міцності використовуємо формулу:

$$k = \frac{[\sigma]}{\sigma_{\max}}, \quad (3.1)$$

де k – запас міцності, $[\sigma]$ – максимально допустиме напруження, σ_{\max} – максимальне напруження).

Відомо, що максимальне напруження досягає приблизно 160 МПа проміжних вузлах ферми при навантаженні в 70 кН/м.

$$k = 225/160 = 1,4$$

Отже, запас міцності для навантаження в 70кН/м становить 1,4. Це означає, що ферма може витримувати навантаження, яке в 1,4 рази більше за максимальне напруження, яке виникає при навантаженні в 70 кН/м.

За результатами дослідження виявлено:

1. Найбільші напруження спостерігаються у проміжних вузлах.
2. Максимальне напруження для навантаження в 70кН/м становить 160 МПа.
3. Запас міцності для навантаження в 70кН/м становить 1,4. Це вказує на достатню міцність ферми при таких умовах.

Цей аналіз є важливим для оцінки надійності конструкції та прийняття рішень щодо можливих модифікацій або підсилень ферми.

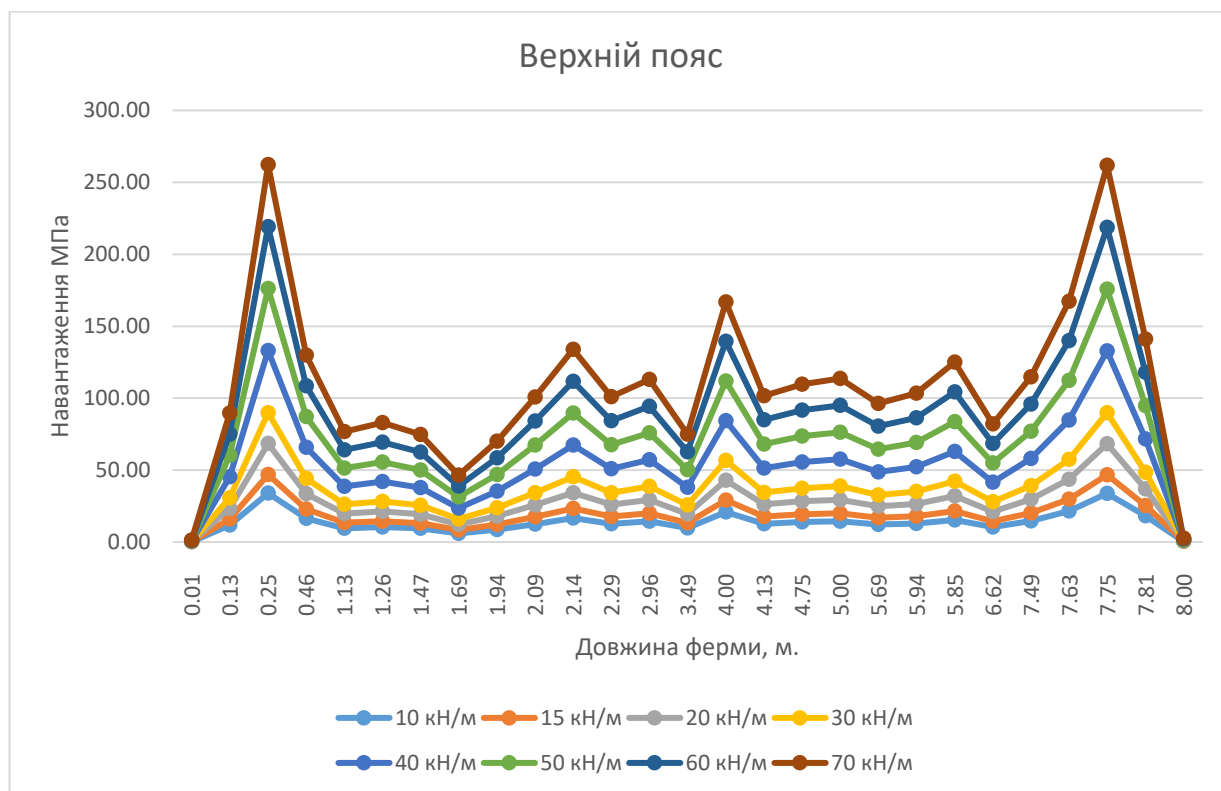


Рисунок 3.10 – Локалізація максимальних напружень по довжині верхнього поясу ферми при дії рівномірно-розподілених навантажень

Аналізуючи графік напружень у точках локалізації максимальних напружень у верхньому поясі ферми по зовнішній поверхні, при дії рівномірно-розподіленого навантаження вздовж верхнього поясу ферми, можна зробити такі висновки:

1. Напруження коливаються вздовж довжини ферми з вираженими піками. Найбільші напруження спостерігаються на початку та кінці ферми, а також в кількох проміжних точках.

2. Максимальні напруження для навантаження в 70 кН/м. Максимальне напруження досягає приблизно 260 МПа на початку (0,25 м) і наприкінці (7,75 м) ферми, тобто в опорних вузлах ферми.

Розрахунок запасу міцності для навантаження в 70 кН/м. Для розрахунку запасу міцності використовуємо формулу 3.1.

Відомо, що максимальне напруження досягає приблизно 260 МПа в опорних вузлах ферми.

$$k = 225/260 = 0,86$$

Отже, запас міцності для навантаження в 70 кН/м становить 0,86. Це означає, що ферма не може витримувати навантаження в 70 кН/м при максимальному напруженні 250 МПа, оскільки запас міцності менший за одиницю.

За результатами дослідження виявлено:

1. Найбільші напруження спостерігаються на початку та кінці ферми.
2. Запас міцності для навантаження в 70 кН/м становить 0,86. Це свідчить про недостатню міцність ферми при таких умовах, що вказує на необхідність перегляду конструкції ферми або зменшення прикладеного навантаження для забезпечення безпечної експлуатації.

Локалізація максимальних напружень, при дії рівномірно-розподіленого навантаження в точках по нижньому поясу ферми, наведена в таблиці 3.3

Таблиця 3.3 – Чисельні значення σ_{\max} вздовж нижнього поясу ферми

Коорд. вздовж осі X	Довж. ферми, м	10кН/м, МПа	15кН/м, МПа	20кН/м, МПа	30кН/м, МПа	40кН/м, МПа	50кН/м, МПа	60кН/м, МПа	70кН/м, МПа
-7000,00	0,00	0,090	0,120	0,180	0,230	0,340	0,460	0,570	0,680
-6721,49	0,28	10,11	13,91	20,20	26,58	39,24	51,90	64,56	77,20
-6649,87	0,35	16,21	22,14	32,00	41,92	61,70	81,48	101,3	121,0
-6116,71	0,88	13,54	18,45	26,60	34,81	51,17	67,54	83,90	100,0
-5503,98	1,50	14,67	20,08	29,10	38,10	56,11	74,13	92,15	110,0
-5155,19	1,84	14,81	20,50	30,00	39,46	58,42	77,38	96,35	115,0
-4875,33	2,12	20,08	27,89	40,90	53,95	80,01	106,1	132,1	158,0
-4509,28	2,49	19,42	26,69	38,80	50,95	75,21	99,47	123,7	148,0
-3936,34	3,06	19,81	27,08	39,20	51,32	75,56	99,81	124,0	148,0
-3411,14	3,59	19,28	26,56	38,70	50,83	75,09	99,36	123,6	148,0
-3108,75	3,89	15,46	21,48	31,50	41,58	61,68	81,77	101,9	122,0
-2663,13	4,34	14,84	20,40	29,70	38,95	57,49	76,03	94,57	113,0
-2137,93	4,86	14,16	19,28	27,80	36,34	53,40	70,46	87,52	105,0
-1692,31	5,31	12,91	17,66	25,60	33,48	49,31	65,13	80,96	96,80
-1350,13	5,65	16,25	22,20	32,10	42,04	61,88	81,73	101,6	121,0
-1178,62	5,82	6,020	8,310	12,10	15,95	23,59	31,23	38,87	46,50
-1000,00	6,00	0,080	0,110	0,160	0,210	0,310	0,410	0,510	0,610

Локалізація максимальних напружень в точках по довжині верхнього поясу ферми наведена в таблиці 3.4

Таблиця 3.4 - Чисельні значення σ_{\max} вздовж верхнього поясу ферми

Коорд. вздовж осі X	Довж. ферми, м	10кН/м, МПа	15кН/м, МПа	20кН/м, МПа	30кН/м, МПа	40кН/м, МПа	50кН/м, МПа	60кН/м, МПа	70кН/м, МПа
-7992,02	0,01	0,170	0,230	0,340	0,450	0,670	0,890	1,110	1,330
-7872,51	0,13	11,60	16,01	23,36	30,71	45,41	60,11	74,81	89,51
-7745,02	0,25	33,89	46,82	68,37	89,92	133,0	176,1	219,2	262,3
-7537,85	0,46	16,45	22,87	33,58	44,29	65,70	87,12	108,5	129,9
-6868,53	1,13	9,570	13,38	19,72	26,06	38,74	51,42	64,10	76,78
-6741,04	1,26	10,37	14,48	21,32	28,17	41,86	55,55	69,24	82,93
-6533,86	1,47	9,420	13,11	19,27	25,42	37,74	50,05	62,37	74,68
-6310,76	1,69	6,020	8,300	12,12	15,93	23,56	31,18	38,81	46,43
-6055,78	1,94	8,690	12,16	17,94	23,72	35,28	46,84	58,41	69,97
-5912,35	2,09	12,47	17,47	25,79	34,11	50,76	67,41	84,05	100,7
-5859,76	2,14	16,56	23,20	34,26	45,32	67,45	89,57	111,7	133,8
-5705,18	2,29	12,62	17,61	25,95	34,28	50,94	67,60	84,26	100,9
-5035,86	2,96	14,33	19,91	29,22	38,53	57,14	75,76	94,38	113,0
-4509,96	3,49	9,660	13,36	19,51	25,67	37,98	50,29	62,61	74,92
-4000,00	4,00	20,83	29,10	42,88	56,66	84,23	111,8	139,4	166,9
-3872,51	4,13	12,67	17,71	26,10	34,50	51,29	68,08	84,86	101,7
-3251,00	4,75	13,92	19,34	28,37	37,40	55,46	73,53	91,59	109,7
-2996,02	5,00	14,41	20,02	29,39	38,75	57,47	76,20	94,92	113,6
-2310,76	5,69	12,04	16,81	24,75	32,70	48,60	64,49	80,38	96,28
-2055,78	5,94	12,82	17,95	26,49	35,03	52,11	69,20	86,28	103,4
-2151,39	5,85	15,37	21,57	31,90	42,23	62,89	83,55	104,2	124,9
-1381,62	6,62	10,29	14,35	21,12	27,88	41,42	54,95	68,49	82,02
-509,960	7,49	14,58	20,25	29,69	39,13	58,02	76,91	95,80	114,7
-366,534	7,63	21,46	29,71	43,46	57,22	84,73	112,2	139,8	167,3
-254,980	7,75	33,83	46,73	68,23	89,73	132,7	175,7	218,7	261,8
-191,235	7,81	18,26	25,21	36,80	48,38	71,56	94,73	117,9	141,1
0,00000	8,00	0,340	0,470	0,680	0,900	1,330	1,770	2,200	2,600

3.2 Поведінка ферми при дії зосередженого навантаження на середину верхнього поясу

Дослідження виконано для пружних деформацій у рамках статичного лінійного аналізу. Дане навантаження розглянуто від 0 до руйнування ферми (плинності). Виконано візуалізацію напружень по конструктивних елементах ферми і графіки їх зміни при зміні величини навантаження. Візуалізація напружень в елементах ферми подано на рис. 3.11.

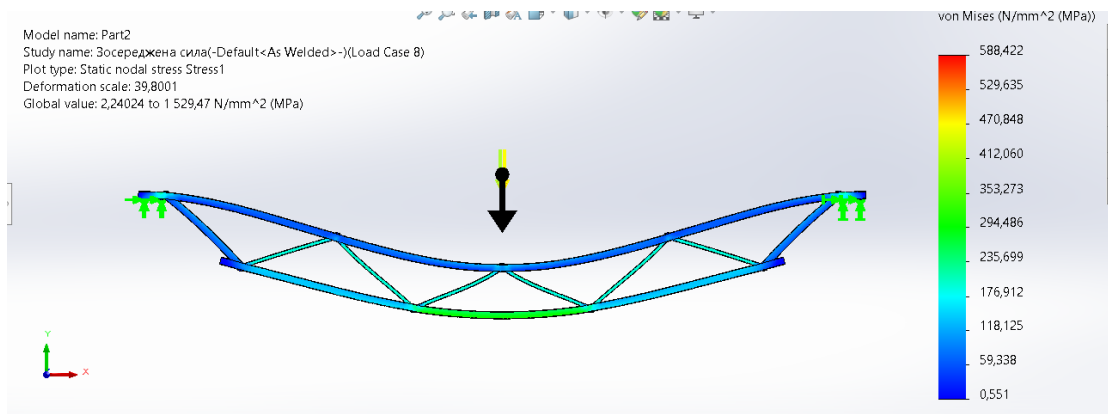


Рисунок 3.11 – Візуалізація напружень в елементах ферми, при дії зосередженого навантаження на середину верхнього поясу

Переміщення ферми уздовж осі Y (прогин), під впливом зосередженого навантаження на середину верхнього поясу, подано на рис. 3.12.

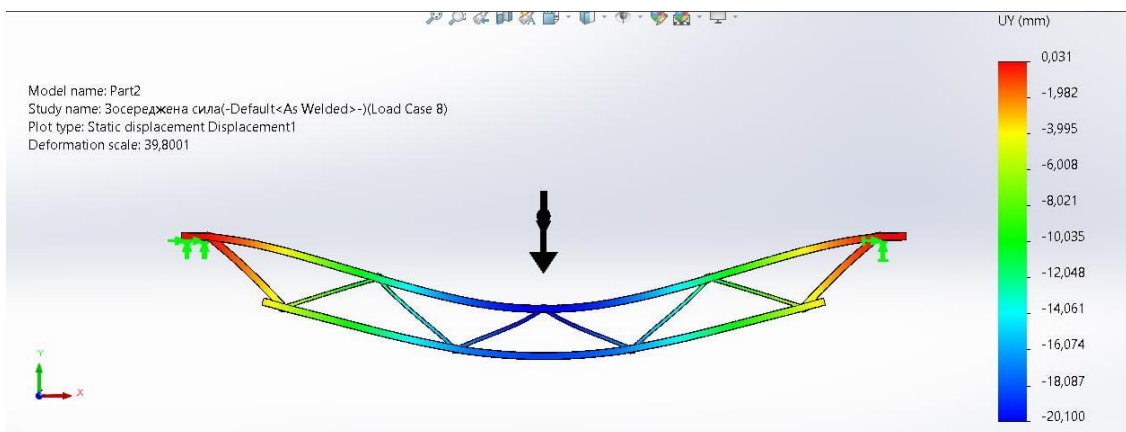


Рисунок 3.12 – Прогин ферми вздовж осі Y під дією зосередженого навантаження на середину верхнього поясу

Діаграма переміщень точок нижнього поясу при дії зосередженого навантаження на середину верхнього поясу вздовж осі Y(прогин) по довжині ферми при дії рівномірно-розподіленого навантаження на верхній пояс подано на рис. 3.13.

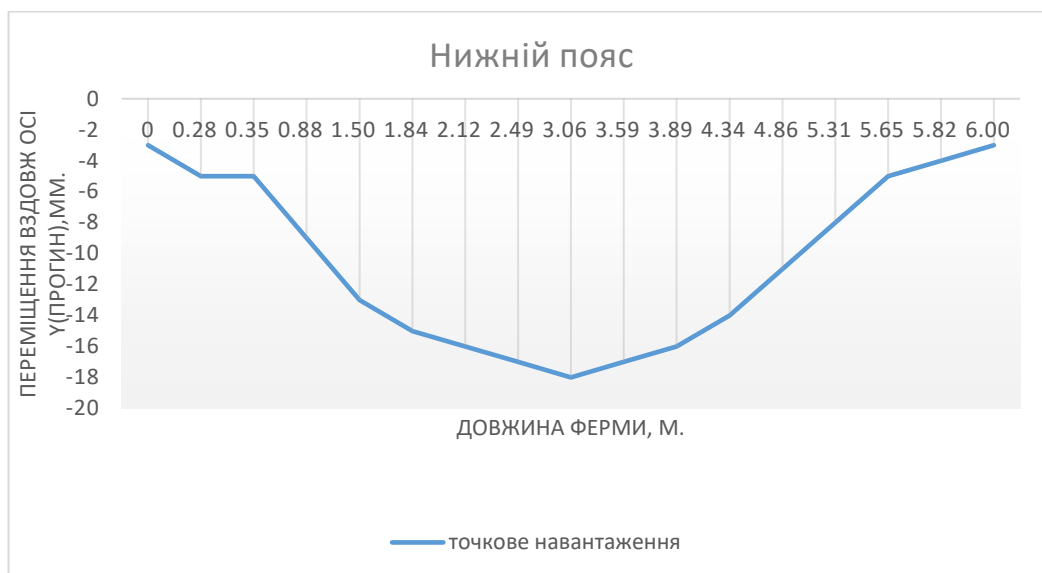


Рисунок 3.13 – Переміщення точок нижнього поясу вздовж осі Y, при дії зосередженого навантаження на середину верхнього поясу у 70кН/м

Діаграма переміщень точок верхнього поясу вздовж осі Y(прогин) по довжині ферми подано на рис.3.14.

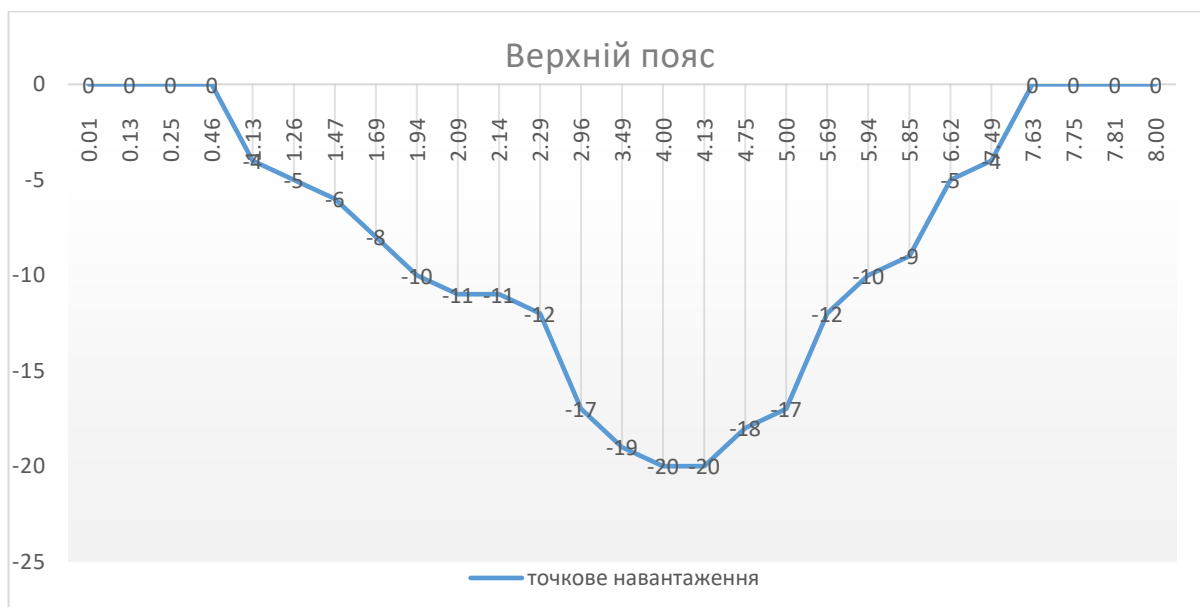


Рисунок 3.14 – Переміщення точок верхнього поясу вздовж осі Y, при дії зосередженого навантаження на середину верхнього поясу у 70кН/м

Як і в розподіленому навантаженні так й під час дії зосередженого навантаження було проведено дослідження напружень в точках локалізації

максимальних напружень у нижньому поясі ферми (рис. 3.15) й у верхньому поясі ферми (рис 3.16) по зовнішній поверхні.

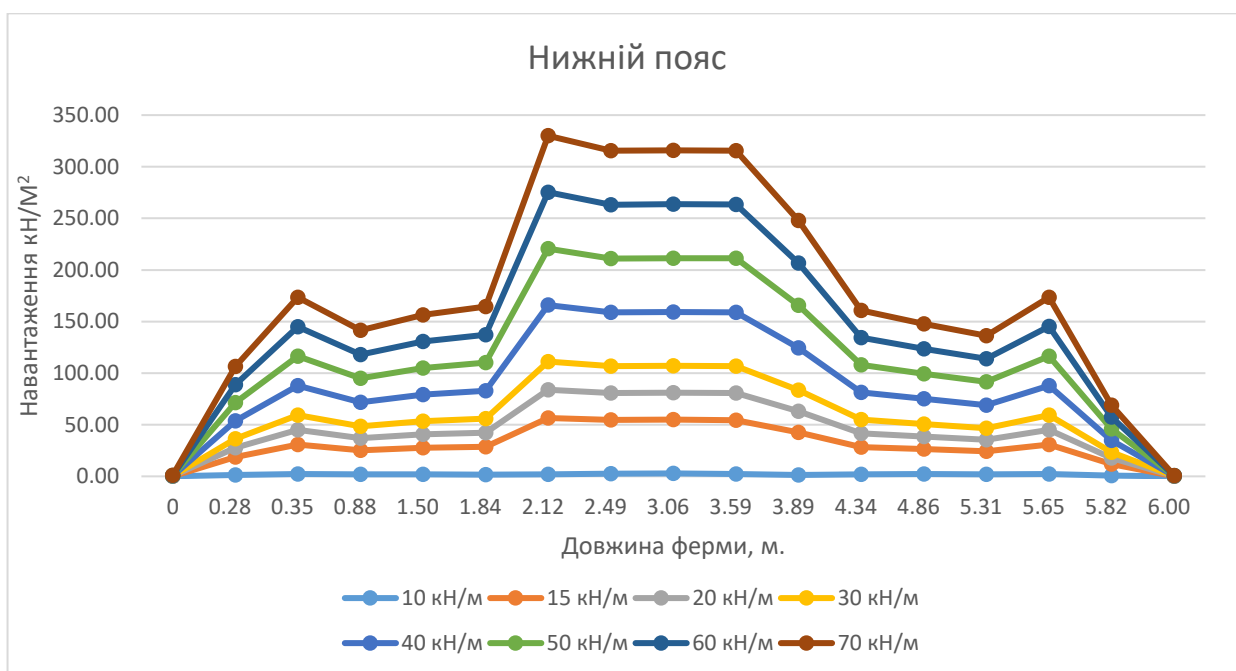


Рисунок 3.15 – Локалізація максимальних напружень по довжині нижнього поясу ферми, при дії зосередженого навантаження на середину верхнього поясу

Аналізуючи графік напружень у точках локалізації максимальних напружень у нижньому поясі ферми по зовнішній поверхні, при дії зосередженого навантаження на середину верхнього поясу ферми, можна зробити такі висновки:

1. Напруження змінюється вздовж довжини ферми, з вираженими піками в центральній частині. Найбільші напруження спостерігаються в ділянках від 2,12 м до 3,59 м., тобто в проміжних вузлах ферми.

2. Максимальне напруження для навантаження у 70 кН/м досягає приблизно 340 МПа в проміжних вузлах ферми.

Розрахунок запасу міцності для навантаження у 70 кН/м. Для розрахунку запасу міцності використовуємо формулу 3.1.

Відомо, що максимальне напруження досягає приблизно 340 МПа в проміжних вузлах ферми.

$$k = 225/340 = 0,66$$

Отже, запас міцності для навантаження у 70кН/м становить 0,66. Це означає, що ферма не може витримувати навантаження при максимальному напруженні 250 МПа, оскільки запас міцності менший за одиницю.

Виявлено:

1. Найбільші напруження спостерігаються на початку та кінці ферми.
2. Запас міцності для навантаження у 70кН/м становить 0,66. Це свідчить про недостатню міцність ферми при таких умовах, що вказує на необхідність перегляду конструкції ферми або зменшення прикладеного навантаження для забезпечення безпечної експлуатації.

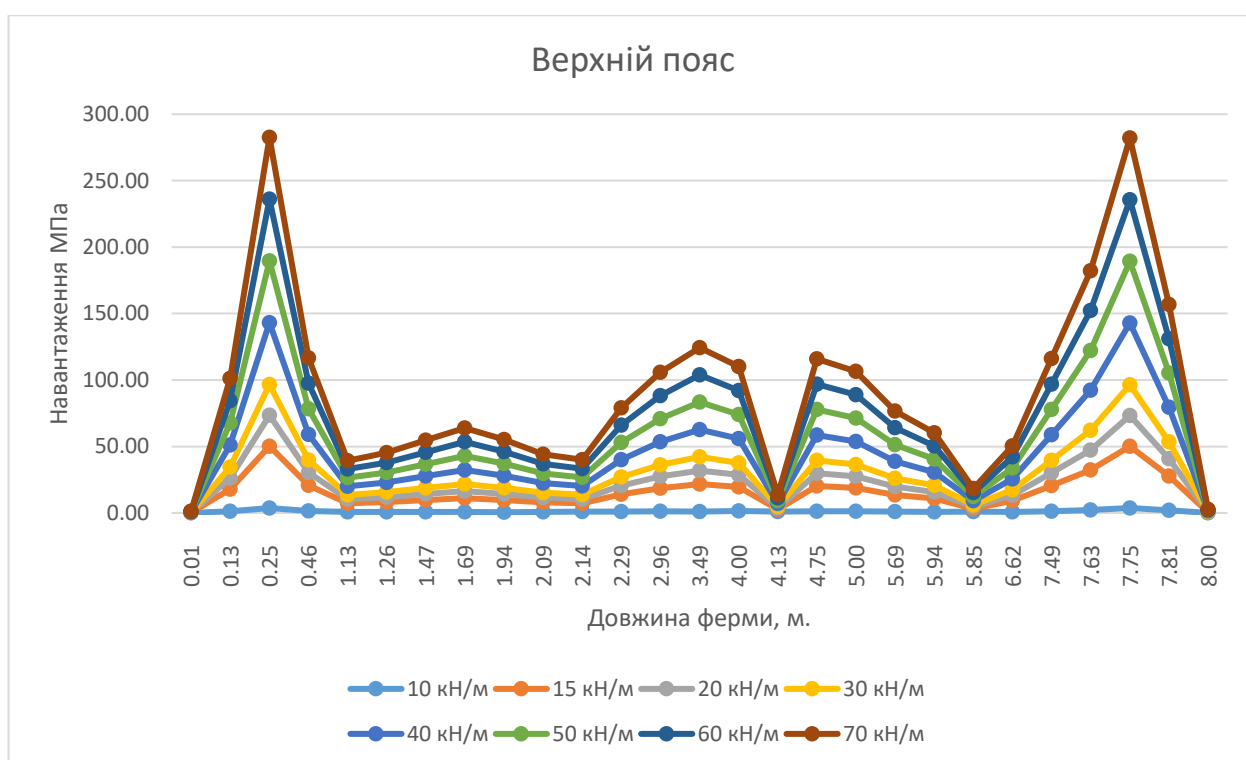


Рисунок 3.16 – Локалізація максимальних напружень по довжині верхнього поясу ферми при дії зосередженого навантаження на середину верхнього поясу у 70кН/м

Аналізуючи графік напружень у точках локалізації максимальних напружень у верхньому поясі ферми по зовнішній поверхні, при дії зосередженого навантаження у 70 кН/м на середину верхнього поясу ферми, можна зробити такі висновки:

1. Напруження коливаються вздовж довжини ферми, з вираженими піками

на початку, середині та кінці ферми, тобто в опорних вузлах.

2. Максимальне напруження для навантаження у 70кН/м досягає приблизно 280 МПа на початку (0,13 м) і наприкінці (7,81 м) ферми.

Розрахунок запасу міцності для навантаження у 70 кН/м. Для розрахунку запасу міцності використовуємо формулу 3.1.

Відомо, що максимальне напруження досягає приблизно 280 МПа в опорних вузлах ферми.

$$k = 225/280 = 0,80$$

Отже, запас міцності для навантаження у 70кН/м становить 0,8. Це означає, що ферма не може витримувати навантаження при максимальному напруженні 280 МПа, оскільки запас міцності менший за одиницю.

Виявлено:

1. Найбільші напруження спостерігаються на початку та кінці ферми.
2. Запас міцності для навантаження у 70кН/м становить 0,8. Це свідчить про недостатню міцність ферми при таких умовах, що вказує на необхідність перегляду конструкції ферми або зменшення прикладеного навантаження для забезпечення безпечної експлуатації

Локалізація максимальних напружень, при дії зосередженого навантаження на середину верхнього поясу, в точках по нижньому поясу ферми наведена в таблиці 3.5

Таблиця 3.5 - Чисельні значення σ_{\max} вздовж нижнього поясу ферми

Коорд. вздовж осі X	Довж. ферми, м	10кН/м, МПа	15кН/м, МПа	20кН/м, МПа	30кН/м, МПа	40кН/м, МПа	50кН/м, МПа	60кН/м, МПа	70кН/м, МПа
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-7000,00	0,00	0,01	0,170	0,250	0,330	0,490	0,650	0,800	0,960
-6721,49	0,28	1,25	18,79	27,56	36,32	53,86	71,40	88,94	106,5
-6649,87	0,35	2,36	30,89	45,16	59,42	87,95	116,5	145,0	173,5
-6116,71	0,88	2,09	25,30	36,90	48,51	71,72	94,93	118,1	141,4
-5503,98	1,50	2,06	27,80	40,68	53,55	79,29	105,0	130,8	156,5
-5155,19	1,84	1,54	28,68	42,26	55,83	82,98	110,1	137,3	164,4
-4875,33	2,12	1,84	56,53	83,88	111,2	165,9	220,6	275,3	330,0

Продовження таблиці 3.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-4509,28	2,49	2,44	54,59	80,67	106,7	158,9	211,0	263,2	315,4
-3936,34	3,06	2,84	54,98	81,05	107,1	159,3	211,4	263,6	315,7
-3411,14	3,59	2,30	54,52	80,63	106,7	159,0	211,2	263,4	315,6
-3108,75	3,89	1,39	42,45	62,99	83,52	124,6	165,7	206,7	247,8
-2663,13	4,34	1,86	28,37	41,62	54,87	81,38	107,9	134,4	160,9
-2137,93	4,86	2,22	26,49	38,62	50,76	75,03	99,30	123,6	147,8
-1692,31	5,31	1,84	24,24	35,44	46,64	69,05	91,45	113,9	136,3
-1350,13	5,65	2,36	30,90	45,17	59,44	87,99	116,5	145,1	173,6
-1178,62	5,82	0,68	12,03	17,71	23,39	34,76	46,12	57,49	68,85
-1000,00	6,00	0,01	0,150	0,220	0,290	0,440	0,580	0,720	0,870

Локалізація максимальних напружень в точках по довжині верхнього поясу ферми, при дії зосередженого навантаження на середину верхнього поясу, наведена в таблиці 3.6

Таблиця 3.6 - Чисельні значення σ_{\max} вздовж верхнього поясу ферми

Коорд, вздовж осі X	Довж, ферми, м	10кН/м, МПа	15кН/м, МПа	20кН/м, МПа	30кН/м, МПа	40кН/м, МПа	50кН/м, МПа	60кН/м, МПа	70кН/м, МПа
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-7992,02	0,01	0,01	0,220	0,32	0,420	0,620	0,820	1,020	1,220
-7872,51	1,31	0,13	17,93	26,25	34,56	51,18	67,81	84,44	101,1
-7745,02	3,72	0,25	50,20	73,44	96,68	143,2	189,6	236,1	282,6
-7537,85	1,46	0,46	20,67	30,28	39,89	59,10	78,32	97,53	116,7
-6868,53	0,70	1,13	7,150	10,37	13,60	20,05	26,50	32,94	39,39
-6741,04	0,78	1,26	8,190	11,89	15,60	23,00	30,41	37,82	45,22
-6533,86	0,80	1,47	9,770	14,26	18,75	27,72	36,70	45,68	54,65
-6310,76	0,68	1,69	11,23	16,50	21,77	32,32	42,87	53,42	63,97
-6055,78	0,59	1,94	9,710	14,26	18,82	27,94	37,05	46,16	55,28
-5912,35	0,82	2,09	8,030	11,63	15,23	22,44	29,65	36,86	44,06
-5859,76	1,08	2,14	7,200	10,46	13,72	20,27	26,82	33,37	39,92
-5705,18	0,95	2,29	13,95	20,45	26,95	39,96	52,96	65,96	78,96
-5035,86	1,30	2,96	18,70	27,41	36,11	53,51	70,92	88,32	105,7
-4509,96	1,04	3,49	21,61	31,89	42,17	62,73	83,30	103,9	124,4
-4000,00	1,53	4,00	19,62	28,67	37,72	55,82	73,92	92,02	110,1
-3872,51	0,92	4,13	2,600	3,670	4,760	6,960	9,180	11,41	13,63
-3251,00	1,28	4,75	20,39	29,95	39,51	58,62	77,74	96,86	116,0
-2996,02	1,30	5,00	18,82	27,57	36,33	53,85	71,36	88,88	106,4
-2310,76	0,91	5,69	13,54	19,86	26,17	38,80	51,43	64,05	76,68

Продовження таблиці 3.6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-2055,78	0,86	5,94	10,78	15,74	20,70	30,61	40,53	50,45	60,37
-2151,39	0,92	5,85	3,090	4,580	6,100	9,150	12,21	15,28	18,34
-1381,62	0,82	6,62	9,080	13,21	17,35	25,61	33,88	42,15	50,41
-509,960	1,36	7,49	20,48	30,05	39,61	58,74	77,86	96,99	116,1
-366,534	2,20	7,63	32,20	47,21	62,21	92,21	122,2	152,2	182,2
-254,980	3,72	7,75	50,11	73,31	96,50	142,9	189,3	235,7	282,1
-191,235	2,04	7,81	27,83	40,73	53,63	79,42	105,2	131,0	156,8
0,00000	0,03	8,00	0,490	0,720	0,950	1,410	1,870	2,320	2,780

3.3 Поведінка ферми при дії зосередженого навантаження на вузли нижнього поясу

Дослідження виконано для пружних деформацій у рамках статичного лінійного аналізу. Дане навантаження розглянуто при навантаженнях від 0 до руйнування ферми (плинності), для цього пункту виконано візуалізацію напружень по конструктивних елементах ферми і графіки їх зміни при зміні величини навантаження. Розміщення навантажень на нижній пояс ферми подано на рис. 3.17.

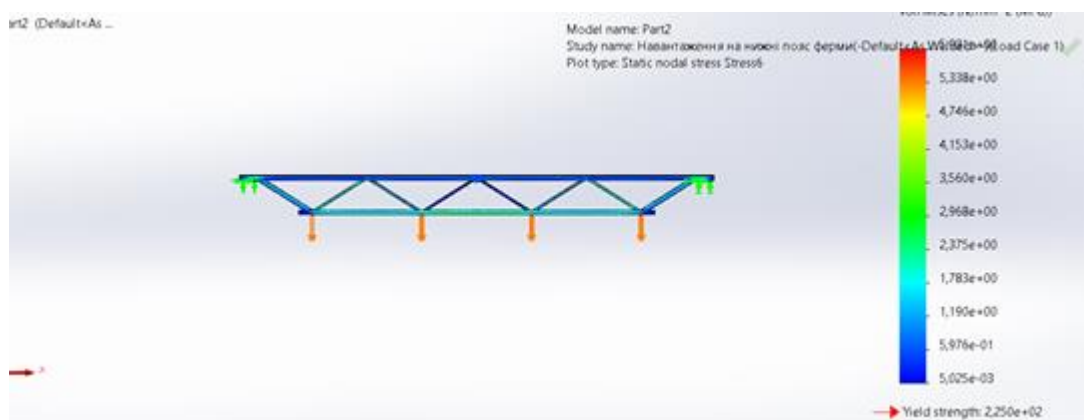


Рисунок 3.17 – Розміщення навантажень на нижній пояс ферми

Переміщення ферми уздовж осі Y (прогин) під впливом зосередженого навантаження на вузли нижнього поясу чітко видно на рис. 3.18.

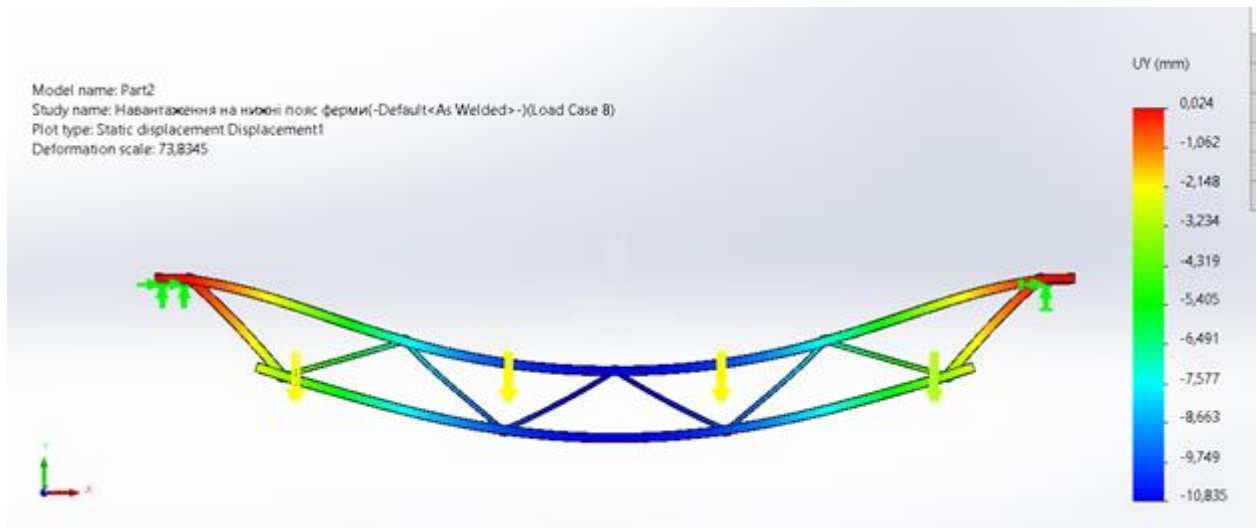


Рисунок 3.18 – Прогин ферми вздовж осі Y під дією зосередженого навантаження на вузли нижнього поясу

Діаграма переміщень точок нижнього поясу, при дії зосередженого навантаження у 70 кН/м на вузли нижнього поясу, вздовж осі Y(прогин) по довжині ферми подано на рис.3.19.

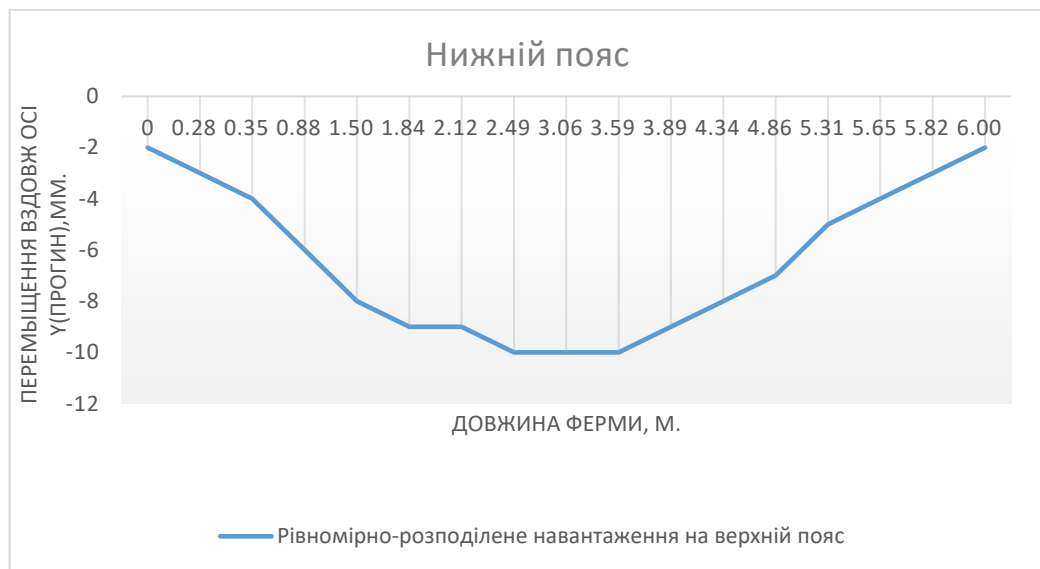


Рисунок 3.19 – Переміщення точок нижнього поясу вздовж осі Y при дії зосередженого навантаження у 70 кН/м на вузли нижнього поясу

Діаграма переміщень точок верхнього поясу вздовж осі Y(прогин) по довжині ферми можна побачити на рис.3.20.

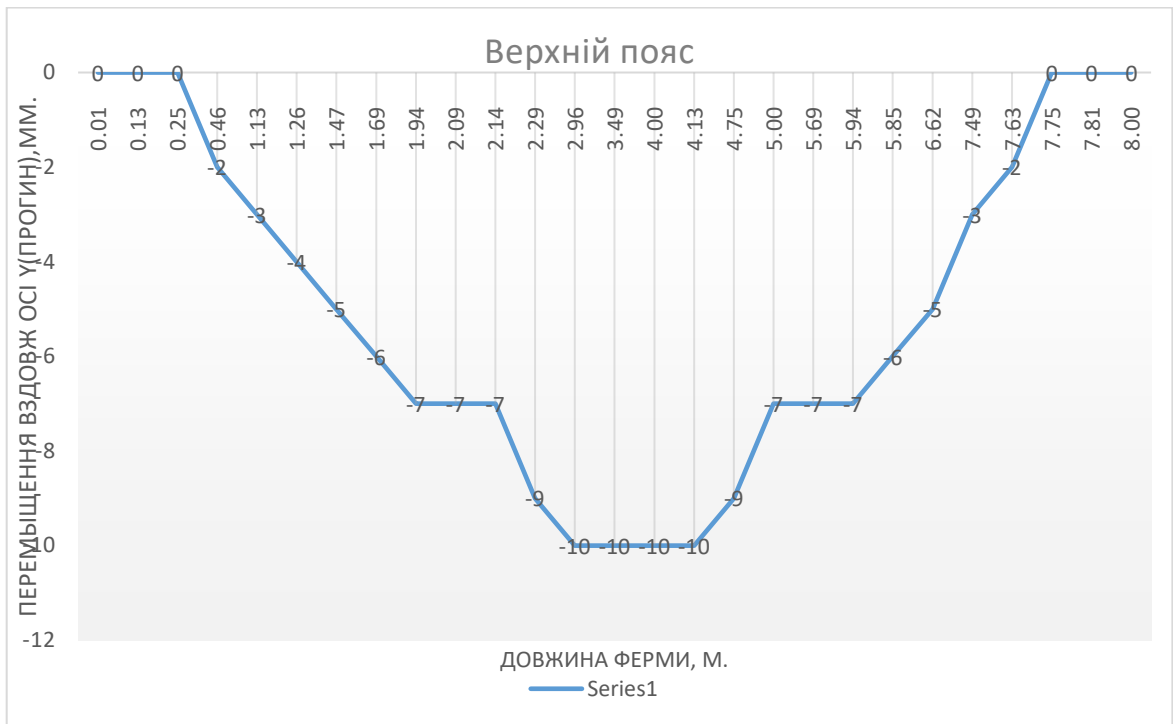


Рисунок 3.20 – Переміщення точок верхнього поясу вздовж осі Y при дії зосередженого навантаження у 70 кН/м на вузли нижнього поясу

Визначено навантаження в точках локалізації максимальних напружень у нижньому поясі ферми по зовнішній поверхні (рис. 3.21) й у верхньому поясі ферми (рис. 3.22).

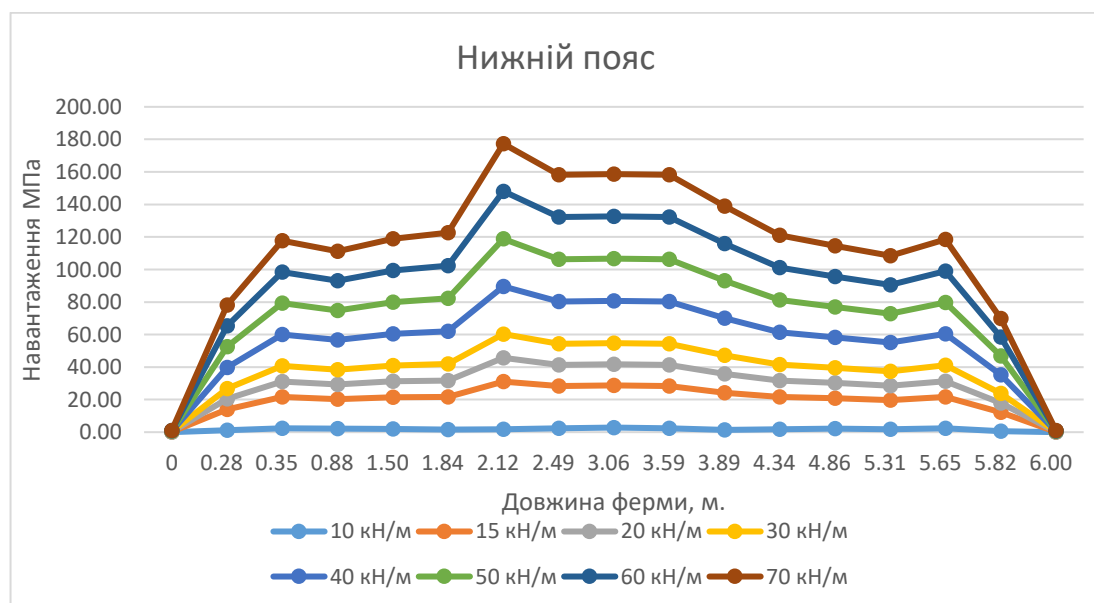


Рисунок 3.21 – Навантаження по нижньому поясу ферми при дії зосередженого навантаження у 70 кН/м на вузли нижнього поясу

Аналізуючи графік навантажень у точках локалізації максимальних напружень у нижньому поясі ферми по зовнішній поверхні при дії зосередженого навантаження на вузли нижнього поясу ферми, можна зробити такі висновки:

1. Напруження коливаються вздовж довжини ферми, з вираженими піками у середній частині ферми.
2. Найбільші напруження спостерігаються у ділянках від 2.12 м до 3.59 м, тобто в проміжних вузлах ферми.
3. Максимальне напруження для навантаження у 70 кН/м досягає приблизно 180 кН/м у проміжних вузлах ферми.

Розрахунок запасу міцності для навантаження у 70 кН/м. Для розрахунку запасу міцності використовуємо формулу 3.1.

Відомо, що максимальне напруження досягає приблизно 180 МПа у ділянці від 2,12 м до 3,59 м.

$$k = 225/180 = 1,25$$

Отже, запас міцності для навантаження у 70 кН/м становить 1,25.

Виявлено:

1. Найбільші напруження спостерігаються у проміжних вузлах ферми.
2. Запас міцності для навантаження у 70 кН/м становить 1,25. Це означає, що ферма витримує навантаження при максимальному напруженні 180 МПа, оскільки запас міцності більший за одиницю.

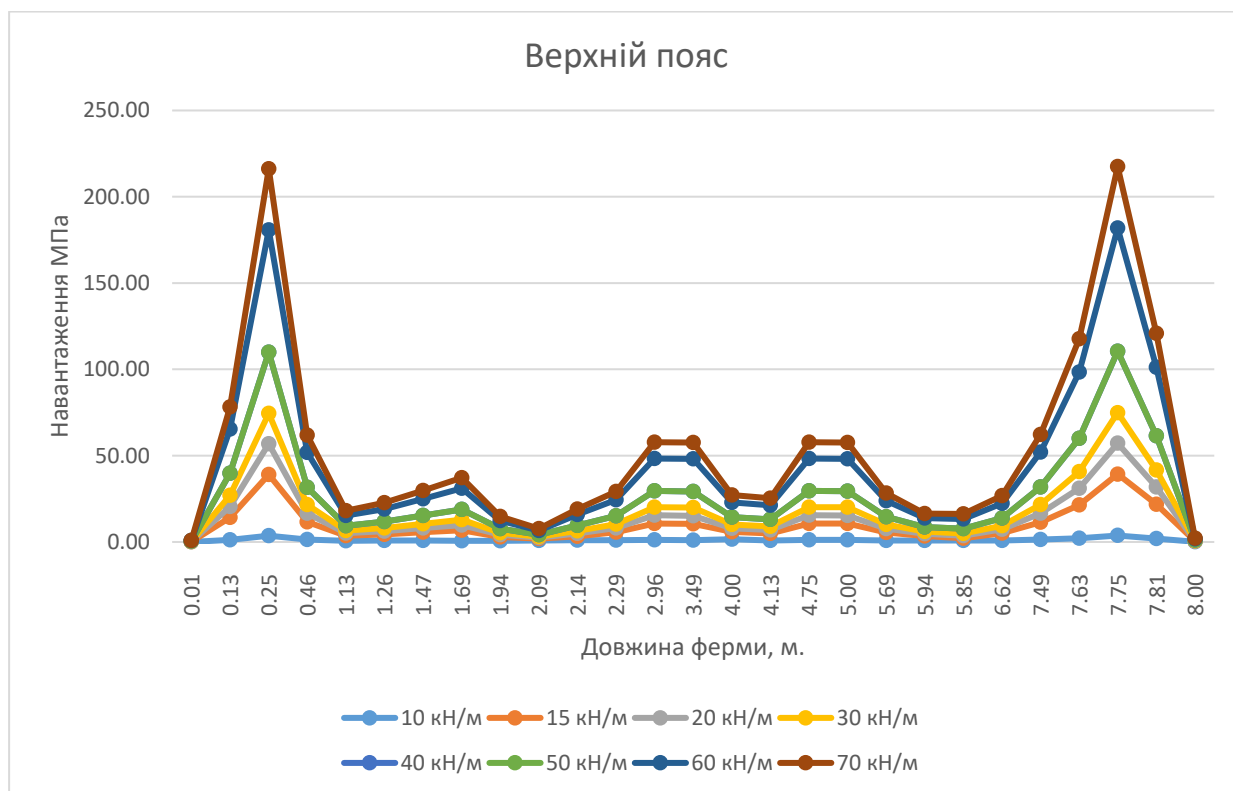


Рисунок. 3.22 – Локалізація максимальних по довжині верхнього поясу ферми

Аналізуючи графік навантажень в точках локалізації максимальних напружень у верхньому поясі ферми по зовнішній поверхні, при дії зосередженого навантаження на вузли нижнього поясу ферми, можна зробити такі висновки:

1. Напруження коливаються вздовж довжини ферми, з вираженими піками на початку та кінці ферми.

2. Найбільші напруження спостерігаються на початку (0,25 м) і наприкінці (7,75 м), тобто в опорних вузлах ферми.

3. Максимальне напруження для навантаження у 70 кН/м досягає приблизно 216 МПа на початку (0,25 м) і наприкінці (7,75 м).

Розрахунок запасу міцності для навантаження у 70 кН/м. Для розрахунку запасу міцності використовуємо формулу 3.1.

Відомо, що максимальне напруження досягає приблизно 216 МПа на початку (0,25 м) і наприкінці (7,75 м) ферми.

$$k = 225/180 = 1,04.$$

Отже, запас міцності для навантаження у 70 кН/м становить 1,04.

Досліджено :

1. Найбільші напруження спостерігаються в опорних вузлах ферми.
2. Запас міцності для навантаження у 70 кН/м становить 1,04. Це означає, що ферма витримує навантаження при максимальному напруженні 216 МПа, оскільки запас міцності більший за одиницю.

Локалізація максимальних напружень, при дії зосередженого навантаження на вузли нижнього поясу, в точках по нижньому поясу ферми наведена в таблиці 3.7

Таблиця 3.7 - Чисельні значення σ_{\max} вздовж нижнього поясу ферми

Коорд, вздовж осі X	Довж, ферми, м	10кН/м, МПа	15кН/м, МПа	20кН/м, МПа	30кН/м, МПа	40кН/м, МПа	50кН/м, МПа	60кН/м, МПа	70кН/м, МПа
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-7000,00	0,00	0,01	0,190	0,280	0,370	0,550	0,730	0,910	1,090
-6721,49	0,28	1,25	14,02	20,43	26,84	39,67	52,49	65,31	78,14
-6649,87	0,35	2,36	21,58	31,19	40,80	60,01	79,23	98,45	117,7
-6116,71	0,88	2,09	20,27	29,37	38,46	56,64	74,83	93,02	111,2
-5503,98	1,50	2,06	21,51	31,24	40,96	60,41	79,86	99,31	118,8
-5155,19	1,84	1,54	21,71	31,79	41,88	62,05	82,22	102,4	122,6
-4875,33	2,12	1,84	31,08	45,71	60,33	89,58	118,8	148,1	177,3
-4509,28	2,49	2,44	28,41	41,39	54,38	80,35	106,3	132,3	158,3
-3936,34	3,06	2,84	28,80	41,79	54,77	80,74	106,7	132,7	158,6
-3411,14	3,59	2,30	28,30	41,30	54,30	80,31	106,3	132,3	158,3
-3108,75	3,89	1,39	24,31	35,77	47,24	70,16	93,09	116,0	138,9
-2663,13	4,34	1,86	21,72	31,65	41,58	61,44	81,30	101,2	121,0
-2137,93	4,86	2,22	20,92	30,28	39,63	58,34	77,04	95,75	114,5
-1692,31	5,31	1,84	19,60	28,48	37,36	55,12	72,88	90,64	108,4
-1350,13	5,65	2,36	21,71	31,38	41,05	60,40	79,75	99,10	118,4
-1178,62	5,82	0,68	12,20	17,97	23,75	35,29	46,83	58,37	69,92
-1000,00	6,00	0,01	0,180	0,260	0,340	0,510	0,68	0,840	1,010

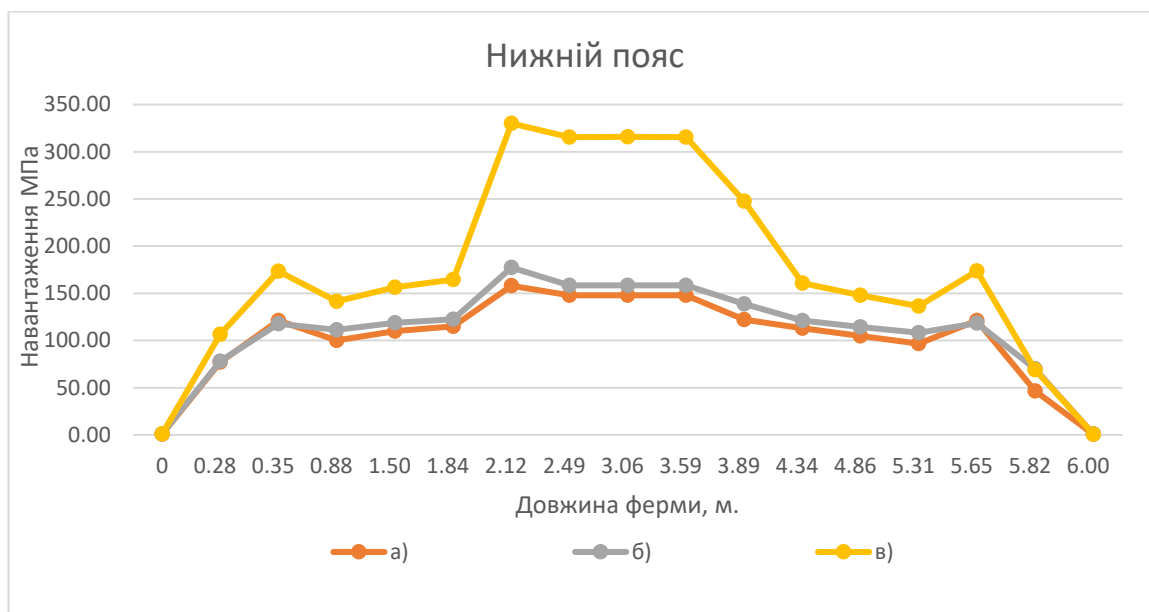
Локалізація максимальних навантажень, при дії зосередженого навантаження на вузли верхнього поясу, в точках по нижньому поясу ферми наведена в таблиці 3.8

Таблиця 3.8 - Чисельні значення σ_{\max} в точках максимальних напружень вздовж верхнього поясу ферми

Коорд, вздовж осі X	Довж, ферми, м	10кН/м, МПа	15кН/м, МПа	20кН/м, МПа	30кН/м, МПа	40кН/м, МПа	50кН/м, МПа	60кН/м, МПа	70кН/м, МПа
-7992,02	0,01	0,01	0,170	0,240	0,302	0,470	0,470	0,78	0,93
-7872,51	0,13	1,31	14,13	20,54	26,95	39,77	39,77	65,42	78,24
-7745,02	0,25	3,72	39,12	56,83	74,53	109,9	109,9	180,8	216,2
-7537,85	0,46	1,46	11,52	16,55	21,58	31,64	31,64	51,76	61,82
-6868,53	1,13	0,70	3,610	5,060	6,510	9,420	9,420	15,23	18,14
-6741,04	1,26	0,78	4,440	6,270	8,100	11,75	11,75	19,07	22,73
-6533,86	1,47	0,80	5,640	8,060	10,48	15,32	15,32	25,00	29,84
-6310,76	1,69	0,68	6,760	9,800	12,85	18,93	18,93	31,10	37,18
-6055,78	1,94	0,59	2,940	4,110	5,280	7,630	7,630	12,32	14,67
-5912,35	2,09	0,82	1,930	2,510	3,080	4,230	4,230	6,530	7,690
-5859,76	2,14	1,08	3,310	4,840	6,400	9,560	9,560	15,90	19,07
-5705,18	2,29	0,95	5,660	8,010	10,37	15,07	15,07	24,49	29,19
-5035,86	2,96	1,30	10,70	15,41	20,11	29,52	29,52	48,34	57,74
-4509,96	3,49	1,04	10,46	15,17	19,88	29,31	29,31	48,15	57,57
-4000,00	4,00	1,53	5,790	7,920	10,05	14,31	14,31	22,84	27,10
-3872,51	4,13	0,92	5,000	7,040	9,080	13,16	13,16	21,32	25,40
-3251,00	4,75	1,28	10,70	15,41	20,13	29,55	29,55	48,40	57,82
-2996,02	5,00	1,30	10,68	15,37	20,06	29,44	29,44	48,20	57,58
-2310,76	5,69	0,91	5,480	7,770	10,05	14,62	14,62	23,77	28,34
-2055,78	5,94	0,86	3,450	4,750	6,050	8,640	8,640	13,83	16,42
-2151,39	5,85	0,92	2,19	3,56	4,95	7,75	7,75	13,35	16,16
-1381,62	6,62	0,82	5,14	7,30	9,46	13,78	13,78	22,43	26,75
-509,960	7,49	1,36	11,51	16,59	21,67	31,82	31,82	52,13	62,28
-366,534	7,63	2,20	21,44	31,06	40,69	59,93	59,93	98,42	117,7
-254,980	7,75	3,72	39,33	57,14	74,94	110,5	110,5	181,8	217,4
-191,235	7,81	2,04	21,85	31,76	41,67	61,48	61,48	101,1	120,9
0,00000	8,00	0,03	0,390	0,560	0,740	1,090	1,090	1,790	2,140

3.3 Порівняння локалізації максимальних напружень при різних навантаженнях

Для порівняння напружень в точках локалізації максимального напруження по верхньому і нижньому поясах взято три навантаження з попередніх досліджень, а саме рівномірно-розподілене навантаження вздовж верхнього поясу ферми, зосереджене навантаження на вузли нижнього поясу, зосереджене навантаження на середину верхнього поясу. Графічне порівняння зображене на рис. 3.23.



а) – рівномірно-розподілене навантаження вздовж верхнього поясу ферми

б) – зосереджене навантаження на вузли нижнього поясу

в) – зосереджене навантаження на середину верхнього поясу

Рисунок 3.23 – Графічне порівняння локалізації максимальних напружень в точках по нижньому поясі ферми при різних навантаженнях

Локалізація максимальних напружень при дії різних максимальних навантаження на ферму в точках по нижньому поясу ферми наведена в таблиці 3.9.

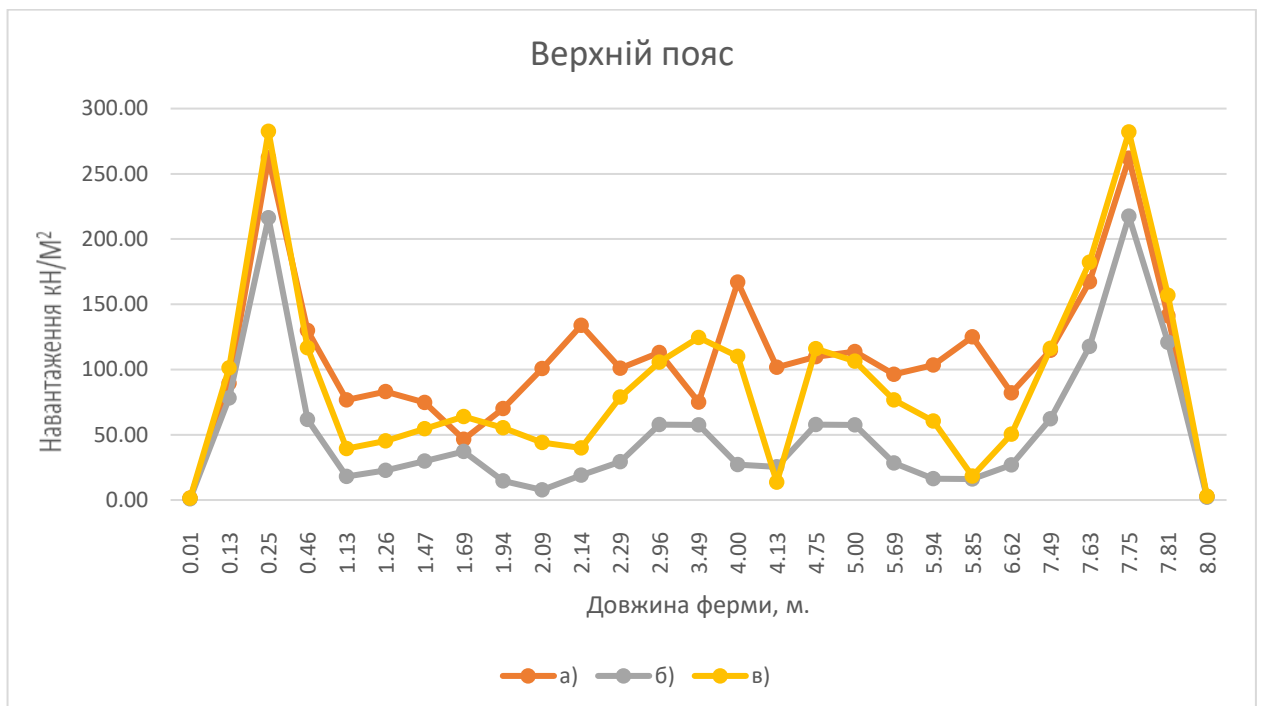
Таблиця 3.9 - Чисельні значення σ_{\max} в точках максимальних напружень вздовж нижнього поясу ферми

Координати вздовж осі X	Довж. ферми, м.	а) МПа	б) МПа	в) МПа
1	2	3	4	5
-7000.00	0.00	0.680	1.090	0.960
-6721.49	0.28	77.20	78.14	106.5
-6649.87	0.35	121.0	117.7	173.5
-6116.71	0.88	100.0	111.2	141.4
-5503.98	1.50	110.0	118.8	156.5
-5155.19	1.84	115.0	122.6	164.4
-4875.33	2.12	158.0	177.3	330.0
-4509.28	2.49	148.0	158.3	315.4
-3936.34	3.06	148.0	158.6	315.7
-3411.14	3.59	148.0	158.3	315.6
-3108.75	3.89	122.0	138.9	247.8
-2663.13	4.34	113.0	121.0	160.9

Продовження таблиці 3.9

1	2	3	4	5
-2137.93	4.86	105.0	114.5	147.8
-1692.31	5.31	96.80	108.4	136.3
-1350.13	5.65	121.0	118.0	173.6
-1178.62	5.82	46.50	69.92	68.85
-1000.00	6.00	0.610	1.010	0.870

Графічне порівняння локалізації максимальних напружень на ферму в точках по нижньому поясу ферми наведено на рис. 3.24.



- а) – рівномірно-розподілене навантаження вздовж верхнього поясу ферми
 б) – зосереджене навантаження на вузли нижнього поясу
 в) зосереджене навантаження на середину верхнього поясу

Рис. 3.24 – Графічне порівняння локалізації максимальних напружень в точках по верхньому поясі перфми при різних навантаженнях

Локалізація напружень, при дії різних максимальних навантаження на ферму в точках по верхньому поясу ферми, наведена в таблиці 3.10.

Таблиця 3.10 – Чисельні значення σ_{\max} в точках максимальних напружень вздовж верхнього поясу ферми

Координати вздовж осі Х	Довж. ферми, м.	а) МПа	б) МПа	в) МПа
-7992,02	0,01	1,330	0,93	1,220
-7872,51	0,13	89,51	78,24	101,1
-7745,02	0,25	262,3	216,2	282,6
-7537,85	0,46	129,9	61,82	116,7
-6868,53	1,13	76,78	18,14	39,39
-6741,04	1,26	82,93	22,73	45,22
-6533,86	1,47	74,68	29,84	54,65
-6310,76	1,69	46,43	37,18	63,97
-6055,78	1,94	69,97	14,67	55,28
-5912,35	2,09	100,7	7,690	44,06
-5859,76	2,14	133,8	19,07	39,92
-5705,18	2,29	100,9	29,19	78,96
-5035,86	2,96	113,0	57,74	105,7
-4509,96	3,49	74,92	57,57	124,4
-4000,00	4,00	166,9	27,10	110,1
-3872,51	4,13	101,7	25,40	13,63
-3251,00	4,75	109,7	57,82	116,0
-2996,02	5,00	113,6	57,58	106,4
-2310,76	5,69	96,28	28,34	76,68
-2055,78	5,94	103,4	16,42	60,37
-2151,39	5,85	124,9	16,16	18,34
-1381,62	6,62	82,02	26,75	50,41
-509,960	7,49	114,7	62,28	116,1
-366,534	7,63	167,3	117,7	182,2
-254,980	7,75	261,8	217,4	282,1
-191,235	7,81	141,1	120,9	156,8
0,00000	8,00	2,630	2,140	2,780

Аналізуючи порівняння графіків максимальних напружень, при дії навантаження в 70 кН/м у точках, як по верхньому так й по нижньому поясах ферми було визначено, що найбільші локалізації максимальних напружень, як у верхньому так й у нижньому поясах, були викликані при навантаженні в 70 кН/м у зосередженому навантаженні на середину верхнього поясу.

3.4 Циклічне навантаження на ферму під впливом зовнішніх чинників

Кран-балка закріплена на нижньому поясі ферми, а вантаж рухається по приміщенню СТО, як вздовж так і в поперек, тому по мірі пересування вантажу, вздовж кран-балки, навантаження на вузли ферми як зменшуються так й збільшуються. Дослідимо максимально несприятливі умови, а саме переміщення вантажу лише в площині однієї ферми. Розрахункові навантаження на вузли ферм приведено в таблиці 3.11.

Таблиця 3.11 – Збір навантажень

Статичні навантаження				
№ п/п	Найменування навантаження	Нормативне навантаження Кн	Коефіцієнт надійності по навантаженню	Розрахункове навантаження Кн
	Кран-балка	1,5	1,2	1,75
			$P_{стат.}$	1,75
Циклічні навантаження				
№ п/п	Найменування навантаження	Нормативне навантаження Кн	Коефіцієнт надійності по навантаженню	Розрахункове навантаження Кн
	Вага вантажу	4,2	1,2	5
			$P_{max.}$	6,75

Вузли прикладання робочих навантажень приведено на рис. 3.25.

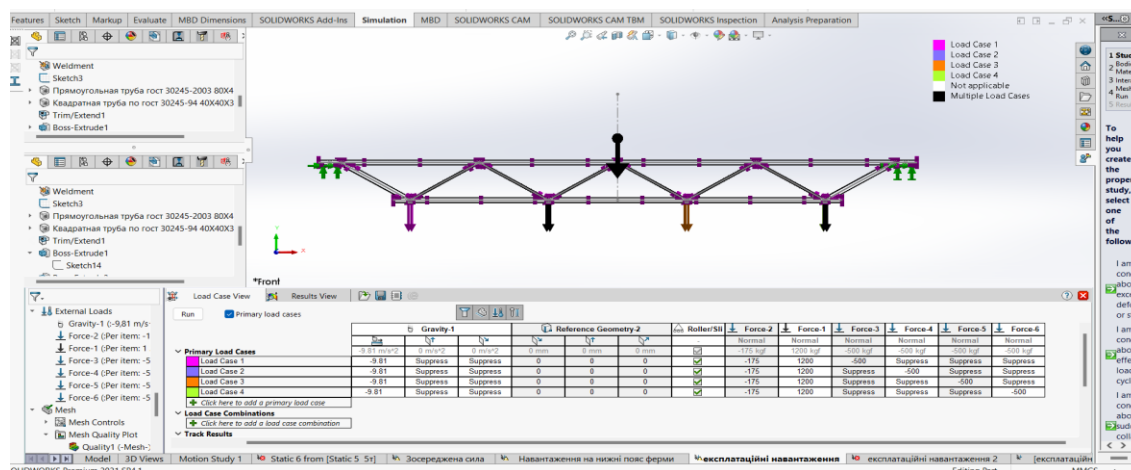


Рис 3.25 – Місця прикладання кранових навантажень

Навантаження в вузлах №1, 2, 3, 4 не змінне, а циклічне змінюється з часом. Середній цикл роботи - 28 секунд. На рис. 3.26 наведено навантаження впродовж одного циклу роботи у вузлі №1. На рис. 3.27 наведено навантаження впродовж одного циклу роботи у вузлі №2. На рис. 3.28 наведено навантаження впродовж одного циклу роботи у вузлі №3. На рис. 3.29 наведено навантаження впродовж одного циклу роботи у вузлі №4.

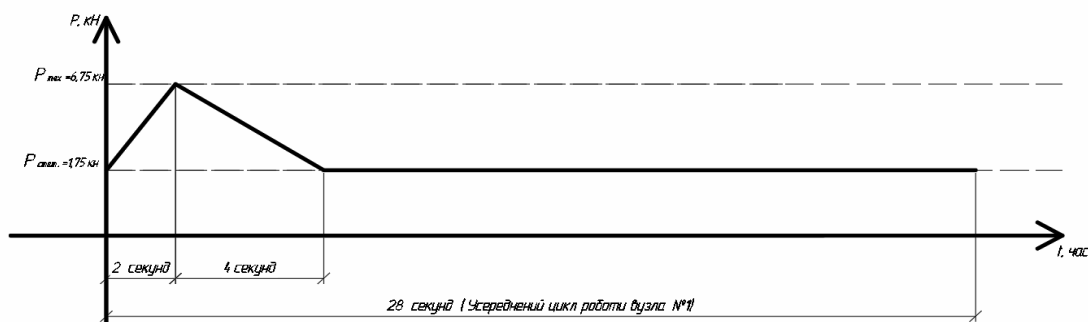


Рисунок 3.26 – Схема зміни циклічного навантаження з плином часу у вузлі №1

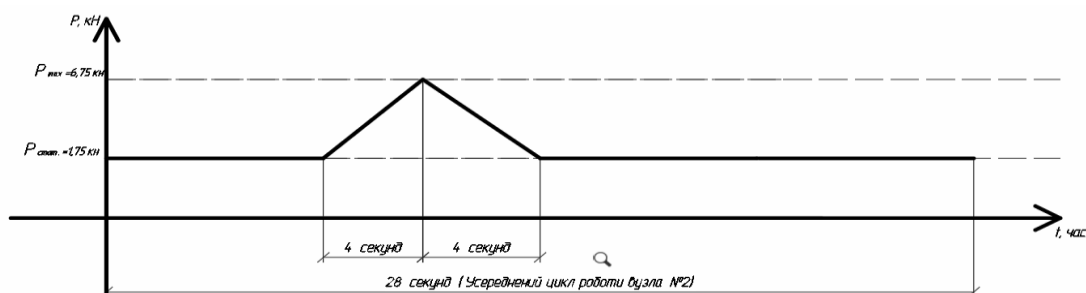


Рисунок 3.27 – Схема зміни циклічного навантаження з плином часу у вузлі №2

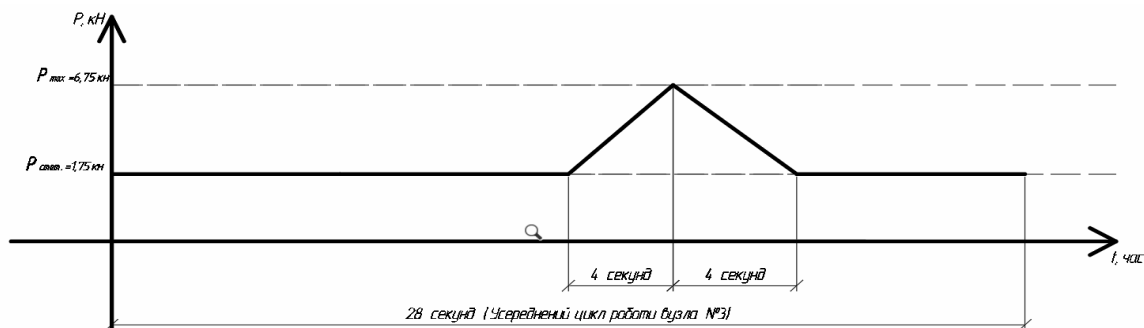


Рисунок 3.28 – Схема зміни циклічного навантаження з плином часу у вузлі №3

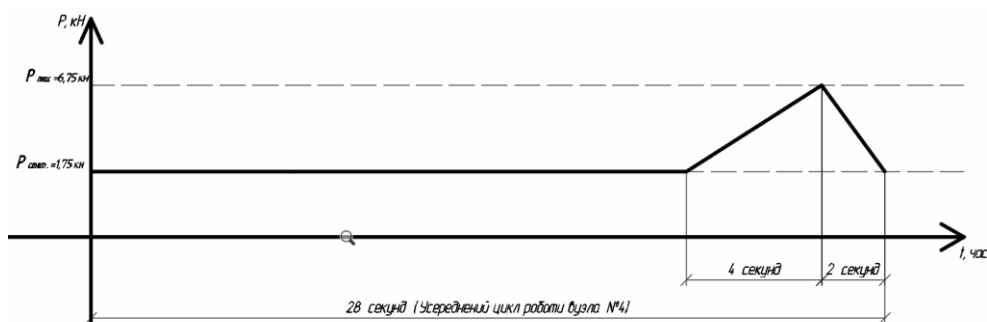


Рисунок 3.29 – Схема зміни циклічного навантаження з плином часу у вузлі №4

3.5 Пошкодження і руйнування базової ферми при дії циклічних навантажень

Дослідимо можливість даної ферми витримувати циклічні навантаження під час експлуатації задля визначення слабких елементів ферми, в яких формуються пошкодження, що призводять до руйнування ферм.

Навантаживши ферму в експлуатаційному режимі, визначено графічні результати дослідження. Переміщення вздовж осі U на 28 секунд наведено на рис. 3.30.

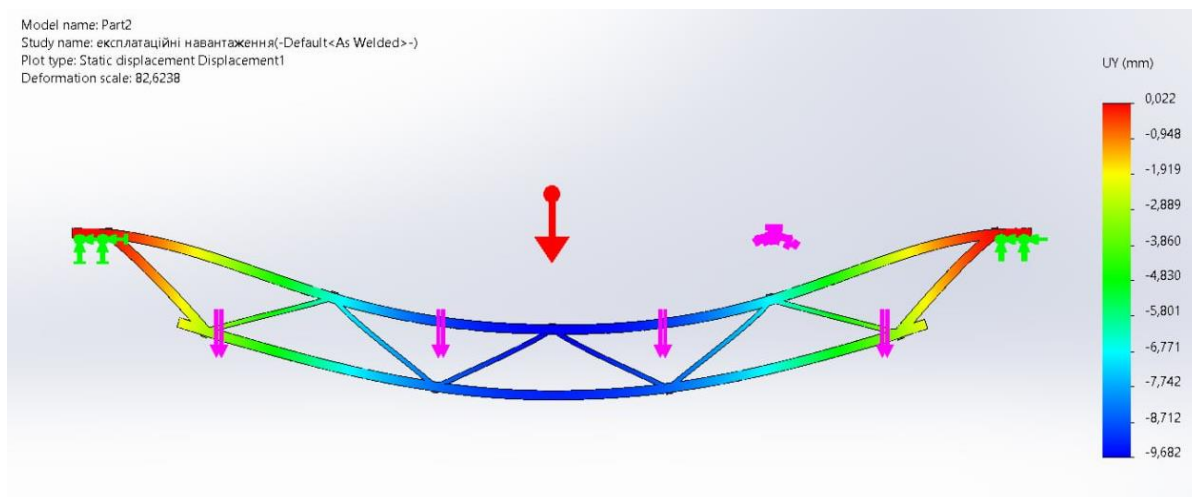


Рисунок 3.30 – Переміщення вздовж осі U при циклічному навантаженні

Досліджено максимальні напруження, як в опорних, так і проміжних вузлах ферми. На рис 3.31 зображено локалізації напружень в опорному вузлі. Зображено локалізації напружень проміжних вузлах ферми (рис.3.32, рис. 3.33, рис 3.34).

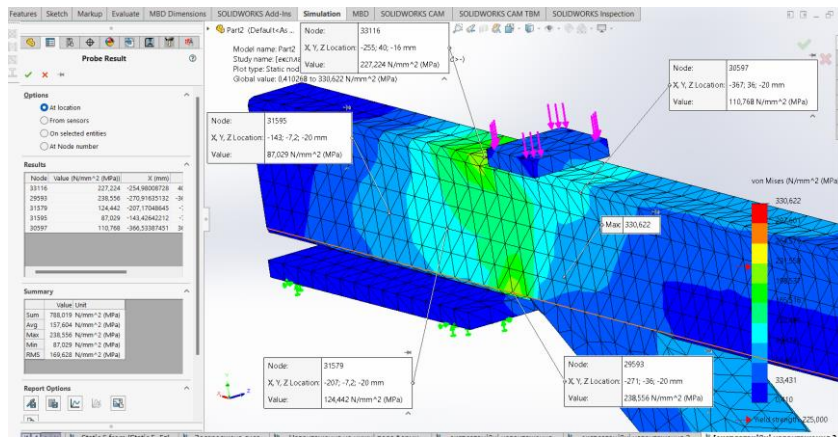


Рисунок 3.31 – Локалізація напружень в опорному вузлі при дії циклічного навантаження

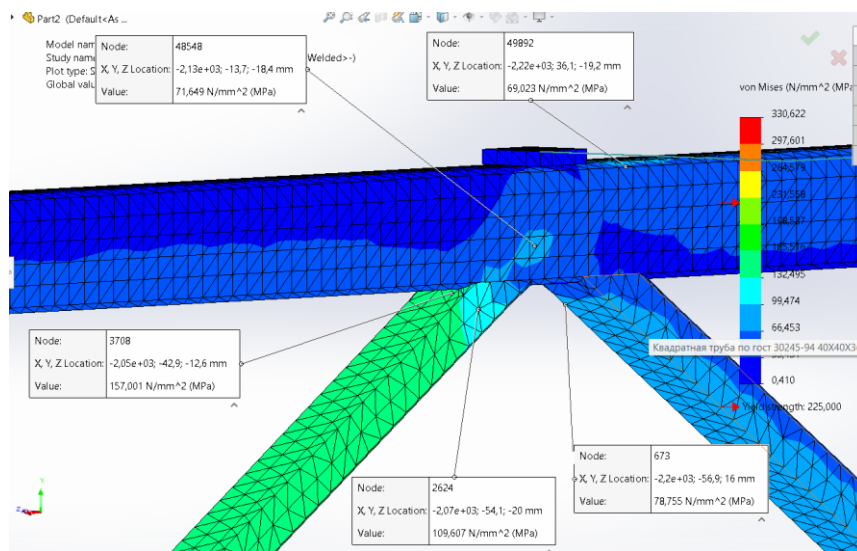


Рисунок 3.32 – Локалізація напружень в проміжному вузлі ферми при дії циклічного навантаження

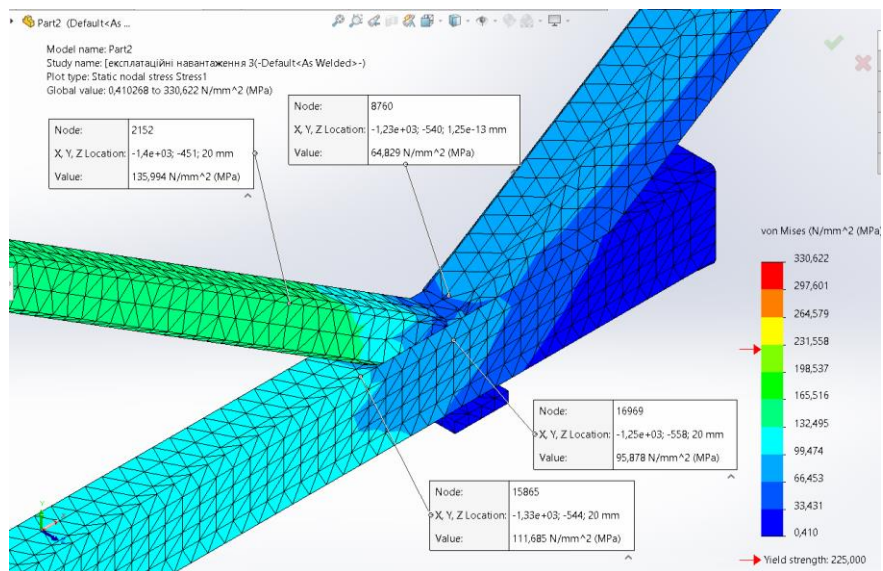


Рисунок 3.33 – Локалізація напружень в проміжному вузлі ферми при дії циклічного навантаження

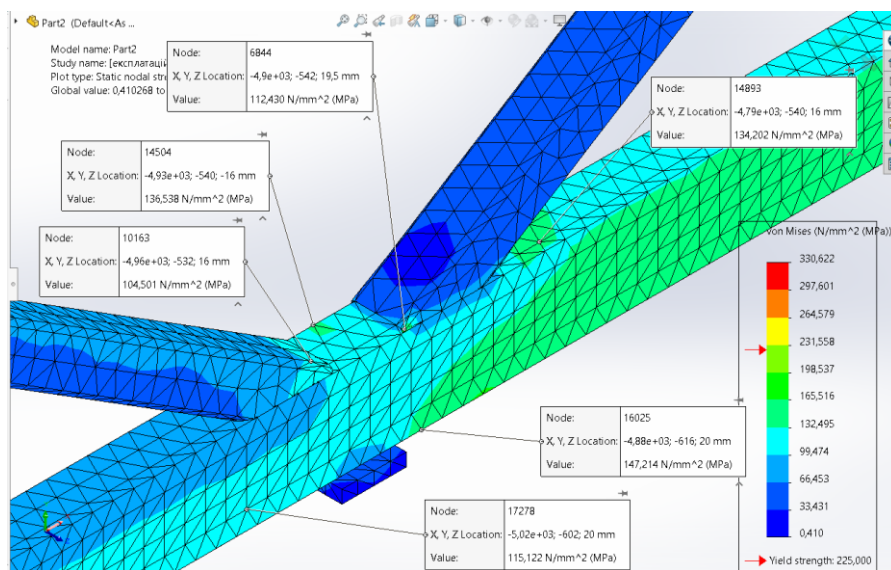
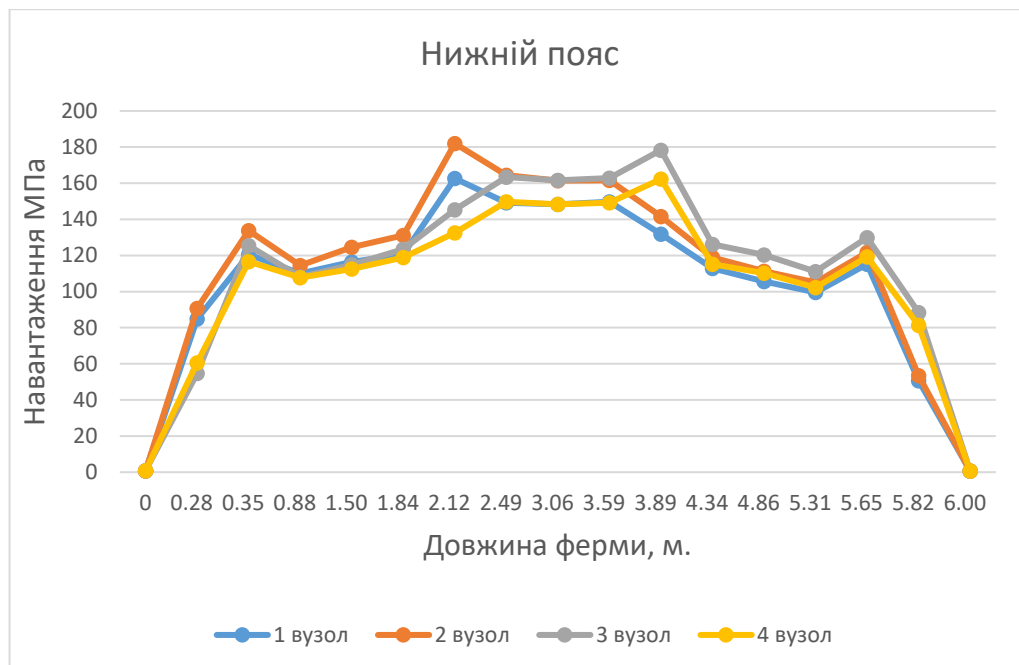


Рисунок 3.34 – Локалізація напружень в проміжному вузлі ферми при дії циклічного навантаження

Дослідивши циклічні навантаження в даній фермі, отримано локалізації максимальних напружень по точках вздовж верхнього і нижнього поясів ферми. На рис. 3.35 зображено графічне порівняння максимальних напружень в точках по нижньому поясі ферми при циклічному навантаженні.



1 вузол – вантаж перебуває в першому вузлі ферми

2 вузол - вантаж перебуває в другому вузлі ферми

3 вузол - вантаж перебуває в третьому вузлі ферми

4 вузол - вантаж перебуває в четвертому вузлі ферми

Рисунок 3.35 – Графічне порівняння локалізації максимальних напружень в точках по нижньому поясі ферми при циклічному навантаженні

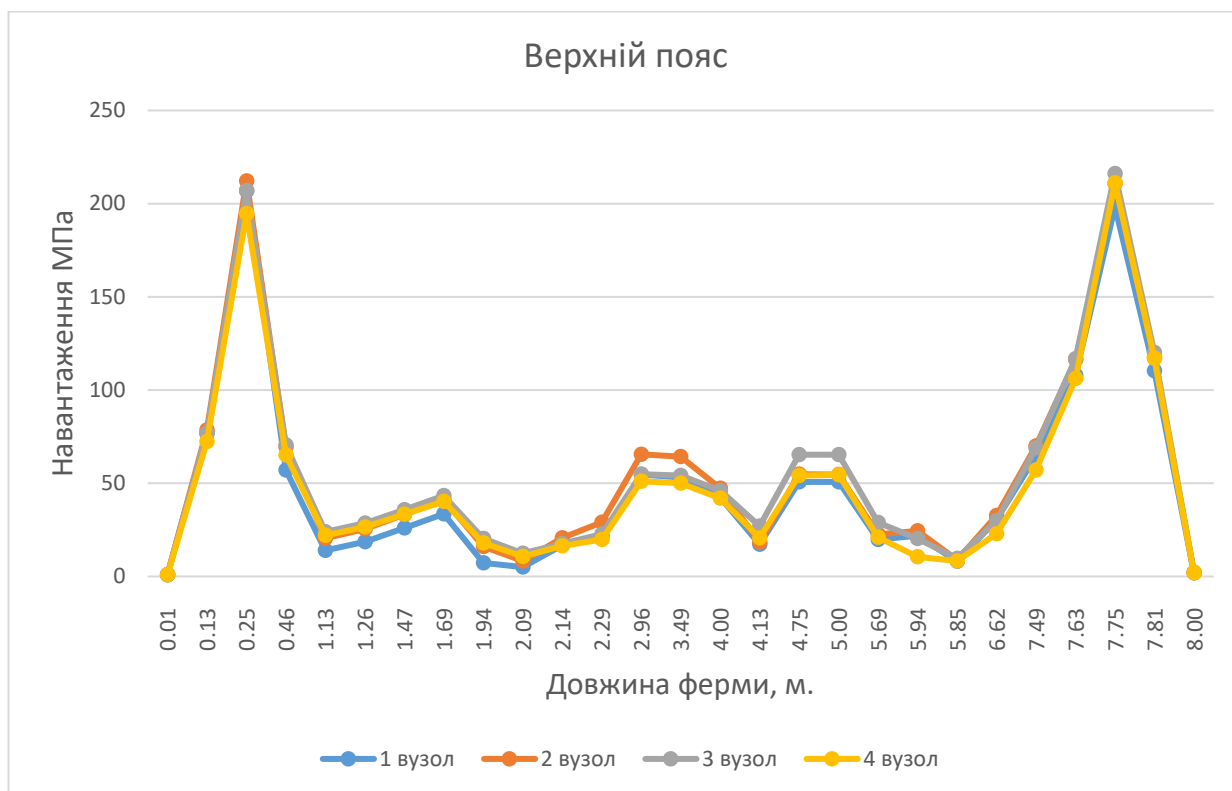
Дослідивши графічне порівняння локалізації максимальних напружень в точках по нижньому поясі ферми, при циклічному навантаженні, було визначено, що найбільші значення навантажень припали як на центральну частину, а саме в ділянці від 2,12м до 3,89м, так й на початок і кінець нижнього поясу. Максимальне напруження в ділянці від 2,12м до 3,89м дорівнює 182 МПа.

Значення максимальних напружень, при дії циклічного навантаження на вузли нижнього поясу в точках по нижньому поясу ферми, наведено в таблиці 3.12.

Таблиця 3.12 – Чисельні значення σ_{\max} вздовж верхнього поясу ферми

Довж, Ферми, м	Напруження, МПа,			
	1 вузол	2 вузол	3 вузол	4 вузол
0,01	0,892	0,918	0,898	0,8450
0,13	76,693	78,613	76,798	72,336
0,25	206,82	212,22	206,96	194,60
0,46	57,098	69,392	70,499	65,163
1,13	13,936	20,551	23,962	22,111
1,26	18,663	25,535	28,637	26,518
1,47	25,900	33,232	35,852	33,307
1,69	33,506	41,200	43,298	40,324
1,94	7,2450	16,069	20,318	17,938
2,09	5,0940	8,3070	12,503	10,622
2,14	16,794	20,634	17,533	16,425
2,29	21,012	29,053	22,664	19,867
2,96	54,734	65,565	54,879	51,015
3,49	53,150	64,258	54,226	50,019
4,00	42,376	47,358	46,128	41,943
4,13	17,232	18,255	27,080	20,626
4,75	50,769	54,835	65,232	54,197
5,00	50,791	54,662	65,304	54,477
5,69	19,773	22,499	28,846	21,040
5,94	21,866	24,493	20,247	10,491
5,85	8,1030	8,8380	9,6860	8,2820
6,62	30,384	32,737	29,911	22,813
7,49	64,676	69,950	68,915	57,045
7,63	107,98	116,30	116,87	106,16
7,75	198,34	210,74	216,15	211,07
7,81	110,36	117,27	120,09	117,04
8,00	1,9080	2,0290	2,0770	2,0210

Графічне порівняння значень максимальних напружень в точках по верхньому поясі ферми при циклічному навантаженні подано на рис 3.36.



- 1 вузол – вантаж перебуває в першому вузлі ферми
- 2 вузол - вантаж перебуває в другому вузлі ферми
- 3 вузол - вантаж перебуває в третьому вузлі ферми
- 4 вузол - вантаж перебуває в четвертому вузлі ферми

Рисунк 3.36 - Графічне порівняння значень максимальних напружень в точках по верхньому поясі ферми при циклічному навантаженні

За результатами графічного порівняння максимальних напружень в точках по верхньому поясі ферми, при циклічному навантаженні, було визначено, що найбільші значення напружень припали на початок (0,25м.) і кінець (7,75м.) верхнього поясу.

Максимальне значення напруження на початку (0,25м.) і кінці (7,75м.) верхнього поясу дорівнює 212 МПа.

Значення максимальних напружень при дії циклічного навантаження на вузли нижнього поясу в точках по нижньому поясу ферми наведено в таблиці 3.13

Таблиця 3.13 – Чисельні значення σ_{\max} вздовж верхнього поясу ферми

Довж, Ферми, м	Напруження, МПа,			
	1 вузол	2 вузол	3 вузол	4 вузол
0,00	0,8460	0,7480	0,7700	0,8890
0,28	84,877	90,630	54,813	60,627
0,35	120,47	133,75	125,46	116,66
0,88	109,96	114,37	108,08	107,79
1,50	116,38	124,47	114,87	112,57
1,84	120,68	131,04	123,47	118,82
2,12	162,62	182,00	145,21	132,53
2,49	149,26	164,38	163,43	149,71
3,06	148,38	161,48	161,67	148,38
3,59	149,72	161,62	162,84	149,26
3,89	131,77	141,55	178,34	162,30
4,34	112,91	118,80	126,09	115,10
4,86	105,55	111,23	120,23	110,15
5,31	99,611	105,12	111,11	102,27
5,65	115,17	121,80	129,96	119,28
5,82	50,601	53,417	88,317	81,364
6,00	0,7170	0,7550	0,7300	0,6760

Проаналізувавши дані дослідження, як в графічній так й в табличній формі, виявлено, що в залежності від розміщення вантажу вздовж кран-балки, локалізації максимальних напружень вздовж нижнього поясу ферми змінюються відповідно до розміщення вантажу. Вздовж верхнього поясу ферми локалізації максимальних напружень змінювались відносно розміщення вантажу, але через дію статичного навантаження на покрівлю визначено, що найбільші значення навантаження локалізувались саме в опорних вузлах ферми. Зроблено висновок, що дана ферма потребує зміцнення.

3.6 Висновок за розділом 3

1. Визначено максимальні напруження при дії різних статичних навантажень, та їх місце локалізації.

При дії рівномірно-розподіленого навантаження вздовж верхнього поясу ферми – це опорні вузли ферми.

При дії дії зосередженого навантаження на середину верхнього поясу – це як опорні вузли ферми, так і проміжні.

При дії зосередженого навантаження на вузли нижнього поясу – це опорні вузли ферми.

2. Проаналізовано графічне порівняння значень максимальних напружень в точках по верхньому й нижньому поясах ферми при дії різних навантажень.

3. Знайдено слабкі вузли при дії статичного та циклічного навантаження.

4. Досліджено необхідність зміцнення ферми перед початком її експлуатації задля покращення її тримких властивостей.

РОЗДІЛ 4

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗМІЦНЕНОЇ ФЕРМИ

4.1 Пропозиції щодо зміцнення ферми

Дослідивши слабкі елементи ферми, розглянуто варіант її зміцнення, з метою запобігання руйнування ферми при дії циклічних навантажень.

В роботі визначено, що навантаження найбільше локалізуються на верхньому поясі в опорних вузлах ферми та на нижньому поясі в проміжних вузлах ферми.

Запропонований варіант зміцнення – зварювання фасонки у вузлах ферми, що дозволить збільшити площу контакту розкосів з поясами ферми. Дана методика зміцнення ферми має призвести до змін максимальних напружень ферми завдяки розповсюдженню навантажень на більшу площу.

4.2 Дослідження зміцненої ферми під дією статичного й циклічного навантажень

В програмному комплексі SolidWorks було змодельовано фасонки у вузлах даної ферми. Фасонки виконано з сталі класу С255, її товщина – 6мм, її розміри – 200x150x6 мм. Приступимо до аналізу ферми за допомогою результатів комп'ютерно-моделюючого тесту.

Важливим є дослідження локалізації максимальних напружень в опорних і проміжних вузлах ферми. На рис. 4.1 зображено локалізації напружень в опорному та проміжних вузлах ферми після зміцнення (рис. 4.2, рис. 4.3, рис. 4.4).

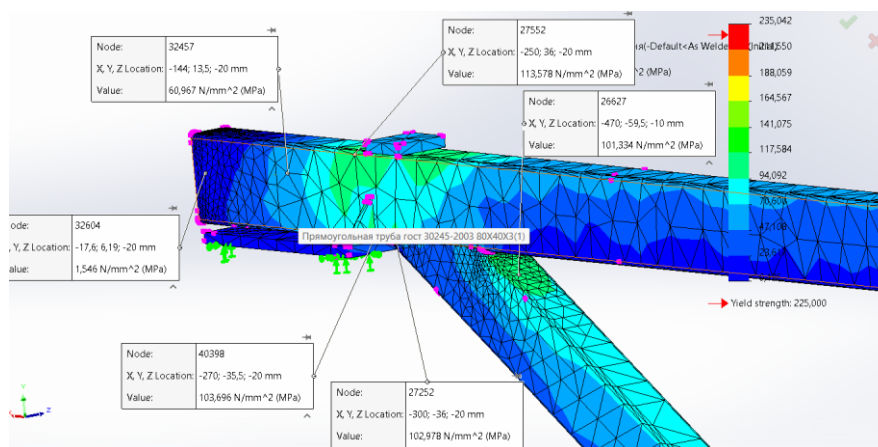


Рисунок 4.1 – Локалізація напружень в правому опорному вузлі при дії циклічного навантаження після зміцнення

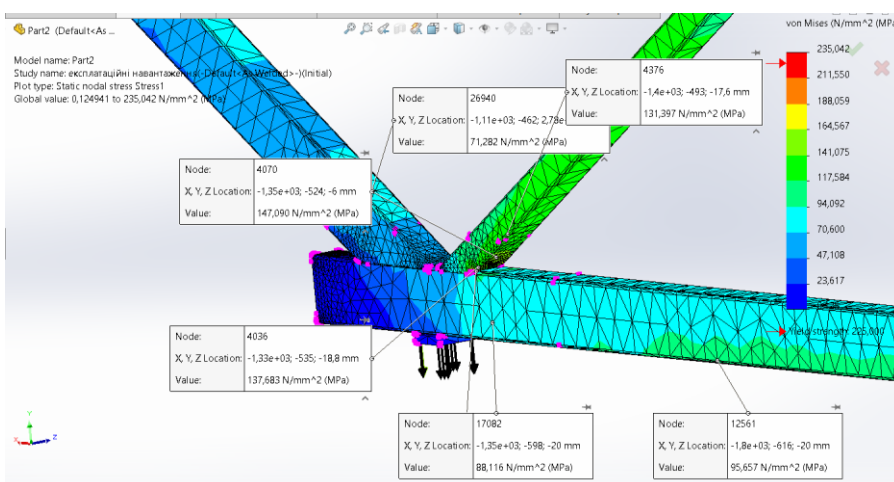


Рисунок 4.2 – Локалізація напружень в проміжному вузлі при дії циклічного навантаження після зміцнення

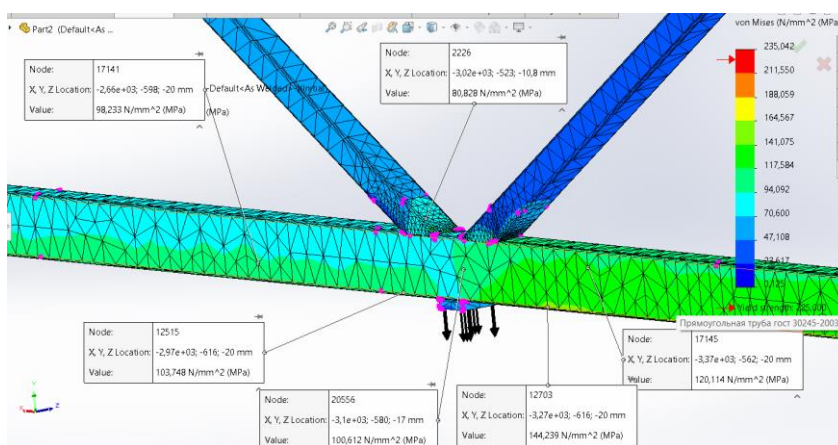


Рисунок 4.3 – Локалізація напружень в проміжному вузлі при дії циклічного навантаження після зміцнення

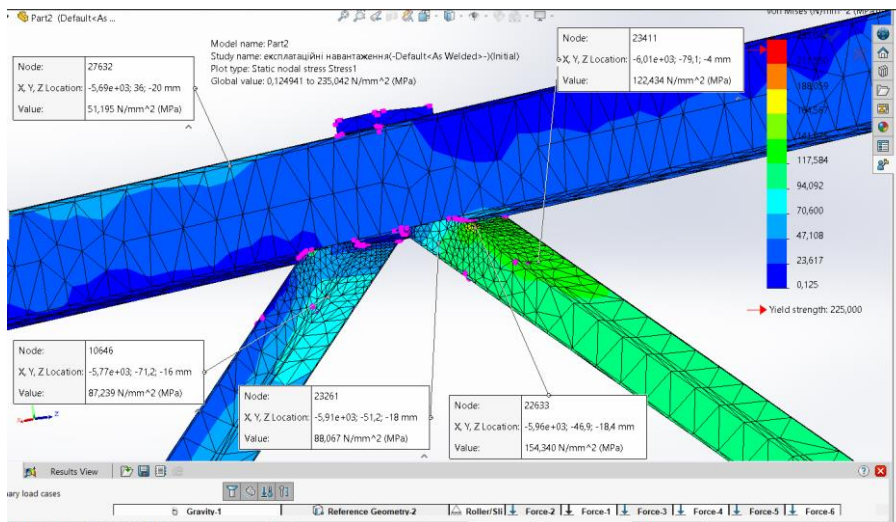
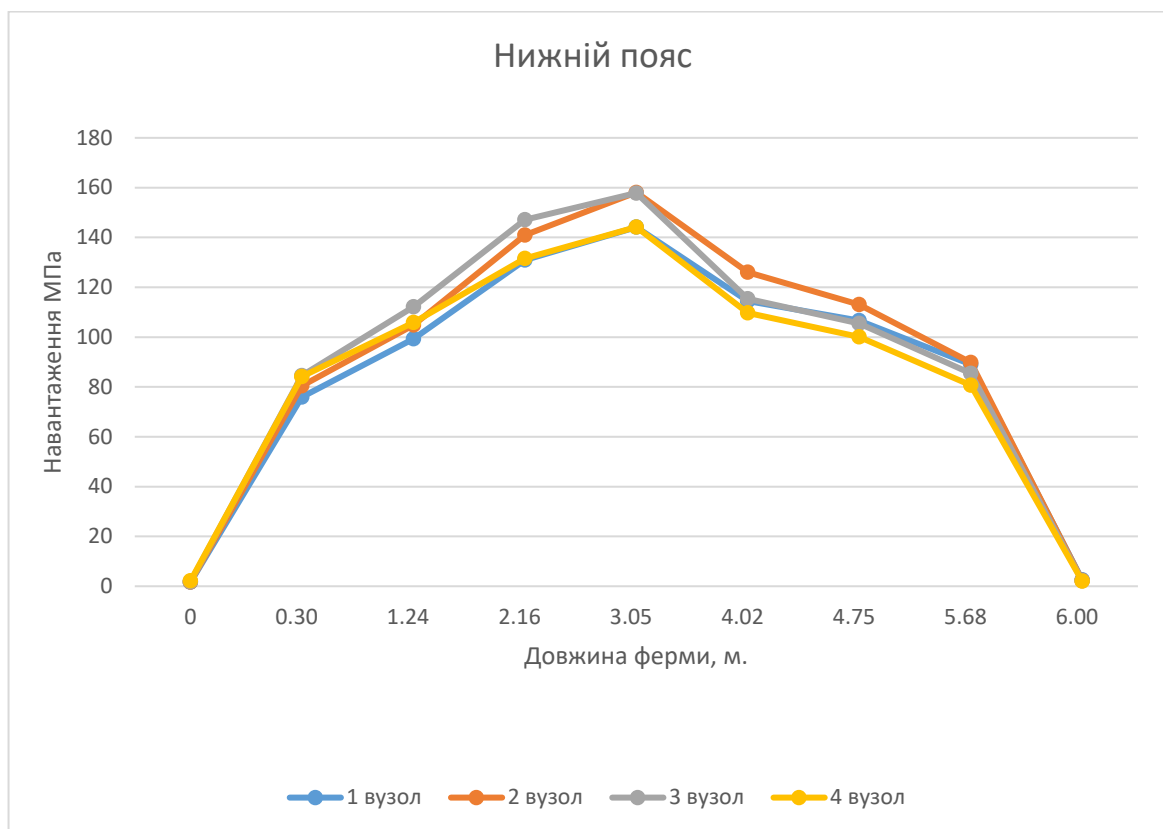


Рисунок 4.4 – Локалізація напружень в проміжному вузлі при дії циклічного навантаження після зміцнення

Дослідивши циклічні й статичні навантаження в зміцненій фермі отримано результати досліджень локалізації максимальних напружень по точках вздовж верхнього і нижнього поясів ферми.

На рис 4.5, зображено графічне порівняння локалізації максимальних напружень в точках по нижньому поясі ферми, при циклічному й статичному навантаженні, після зміцнення ферми фасонками.

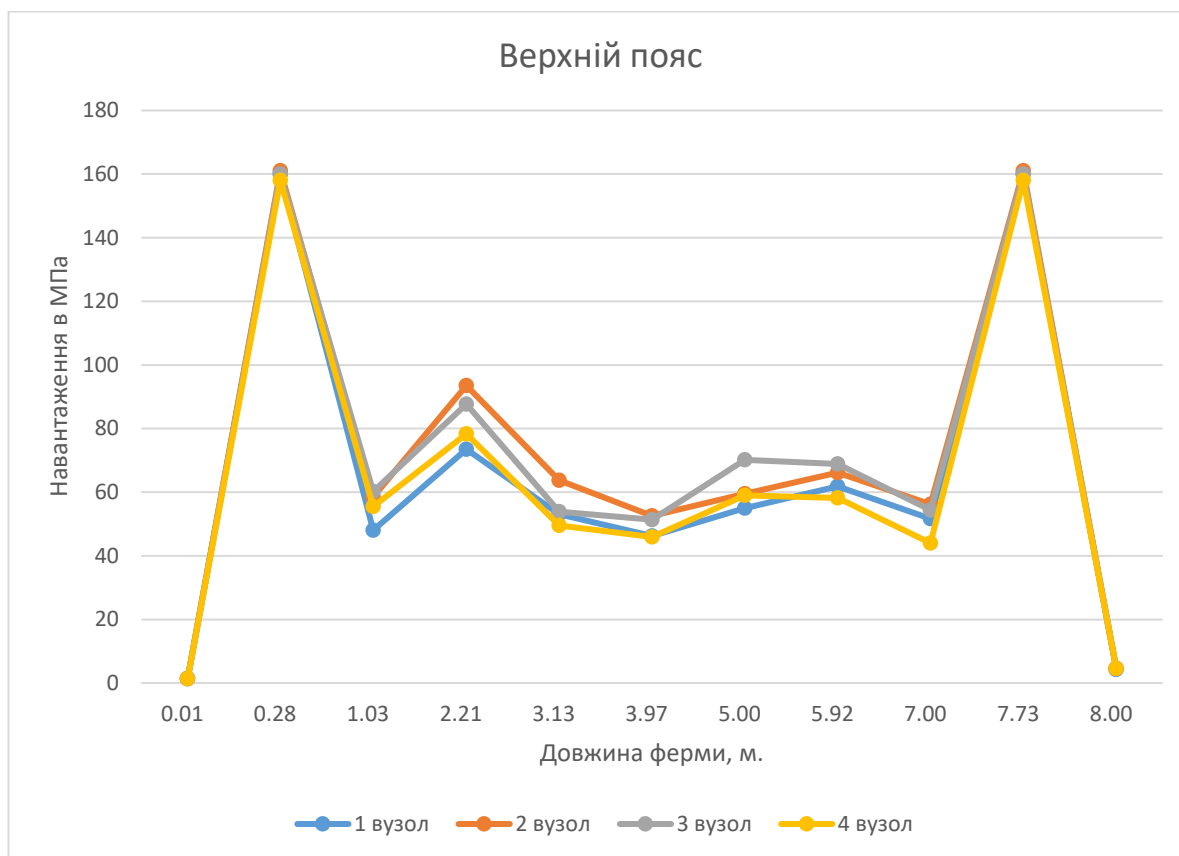
На рис 4.6, зображено графічне порівняння локалізації максимальних напружень в точках по верхньому поясі ферми, при циклічному й статичному навантаженні, після зміцнення ферми фасонками.



- 1 вузол – вантаж перебуває в першому вузлі ферми
- 2 вузол - вантаж перебуває в другому вузлі ферми
- 3 вузол - вантаж перебуває в третьому вузлі ферми
- 4 вузол - вантаж перебуває в четвертому вузлі ферми

Рисунок 4.5 – Графічне порівняння локалізації максимальних напружень в точках по нижньому поясі ферми, при циклічному навантаженні, після зміцнення

Дослідивши графічне порівняння локалізації максимальних напружень в точках по нижньому поясі ферми, при циклічному навантаженні, після зміцнення було визначено, що даний метод зміцнення зменшив вплив статичних та циклічних навантажень на елементи нижнього поясу ферми. Максимальне значення навантаження в елементах ферми нижнього поясу дорівнює 160 МПа.



1 вузол – вантаж перебуває в першому вузлі ферми

2 вузол - вантаж перебуває в другому вузлі ферми

3 вузол - вантаж перебуває в третьому вузлі ферми

4 вузол - вантаж перебуває в четвертому вузлі ферми

Рисунок 4.6 – Графічне порівняння локалізації максимальних напружень в точках по верхньому поясі ферми, при циклічному навантаженні, після зміцнення

Дослідивши графічне порівняння локалізації максимальних напружень в точках по верхньому поясі ферми, при циклічному навантаженні, після зміцнення було визначено, що даний метод зміцнення зменшив вплив статичних та циклічних навантажень на елементи верхнього поясу ферми. Максимальне значення навантаження в елементах ферми верхнього поясу дорівнює 156 МПа.

Локалізація максимальних напружень, при дії циклічного навантаження на вузли нижнього поясу, в точках по нижньому поясу ферми наведено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Чисельні значення σ_{\max} вздовж нижнього поясу ферми, після зміцнення

Довж, Ферми, м	Напруження, МПа,			
	1 вузол	2 вузол	3 вузол	4 вузол
0,00	1,602	1,6940	1,7610	2,1340
0,30	75,885	80,393	84,524	84,218
1,24	99,346	104,82	112,18	105,82
2,16	130,94	140,96	147,10	131,56
3,05	144,13	158,10	157,85	144,19
4,02	114,43	125,98	115,36	109,69
4,75	106,67	113,12	105,46	100,03
5,68	89,029	89,788	85,460	80,659
6,00	2,6110	2,2660	2,1660	2,0530

Локалізація максимальних напружень, при дії циклічного навантаження на вузли нижнього поясу, в точках по верхньому поясу ферми наведено в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Чисельні значення σ_{\max} вздовж верхнього поясу ферми, після зміцнення

Довж. Ферми, м	Напруження, МПа.			
	1 вузол	2 вузол	3 вузол	4 вузол
0.01	1.3550	1.418	1.3860	1.297
0.28	126.13	130.18	127.30	119.89
1.03	48.011	58.519	60.251	55.465
2.21	73.459	93.487	87.714	78.275
3.13	53.092	63.744	53.839	49.542
3.97	46.233	52.516	51.348	45.887
5.00	54.958	59.527	70.144	58.959
5.92	61.857	66.123	68.831	58.171
7.00	51.654	56.161	54.326	44.041
7.73	142.04	150.47	155.04	152.79
8.00	4.2750	4.5650	4.6830	4.5040

Проаналізувавши графічні й табличні дані комп'ютерно моделюючого експерименту дослідження ферми після зміцнення було досягнуто висновку, що дане зміцнення фасонками є доволі ефективним методом зміцнення даної зварної ферми.

4.3 Висновок за розділом 4

1. Розглянуто варіант зміцнення металевієї ферми за допомогою фасонки. Охарактеризовано переваги даного зміцнення й недоліки, доцільність застосування в даній фермі.

2. Виявлено, що зміцнення фасонками покращило тримкість ферми під дією статичних та циклічних навантажень. Зменшено локалізацію максимальних напружень у вузлах ферми.

3. Досліджено, що в порівнянні зміцненої ферми з даною фермою НДС у вузлах ферми, під дією статичного й циклічного навантаження, наглядно зменшилися, що призвело до загального покращення тримкості ферми.

РОЗДІЛ 5

ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

5.1 Охорона праці

Охорона праці - це система правових, соціально-економічних, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних і лікувально-профілактичних заходів та засобів, спрямованих на збереження життя, здоров'я і працездатності людини у процесі трудової діяльності.

Роботодавець - власник підприємства, установи, організації або уповноважений ним орган, незалежно від форм власності, виду діяльності, господарювання, і фізична особа, яка використовує найману працю.

Працівник - особа, яка працює на підприємстві, в організації, установі та виконує обов'язки або функції згідно з трудовим договором (контрактом).

Законі України «Про охорону праці», містить статті, які визначають його поняття.

В статті 18 «Навчання з питань охорони праці» вказується проведення навчання з охорони праці для працівників при прийнятті на роботу та в процесі праці, а також спеціального навчання для працівників, які займаються роботами з підвищеною небезпекою. Це навчання має проводитися роботодавцем за рахунок компанії та включати інструктаж, надання першої медичної допомоги та правила поведінки у випадку аварії. Крім того, центральним органом виконавчої влади затверджується перелік робіт з підвищеною небезпекою.

Згідно з статтею 22 «Розслідування та облік нещасних випадків, професійних захворювань і аварій» вказуються, що роботодавець зобов'язаний організувати розслідування та вести облік нещасних випадків, професійних захворювань і аварій у відповідності до встановлених правил. Результати розслідування фіксуються у спеціальному акті, який роботодавець повинен передати потерпілому або іншій заінтересованій особі протягом трьох днів. Якщо роботодавець відмовляється скласти такий акт або є незгода з його змістом, це питання вирішується посадовою

особою органу державного нагляду за охороною праці, рішення якої є обов'язковим. Рішення посадової особи може бути оскаржене у судовому порядку.

Стаття 23 «Інформація та звітність про стан охорони праці» вимагає, щоб роботодавець інформував працівників або їх уповноважених представників про стан охорони праці, аварії, нещасні випадки та заходи для їх усунення. Працівникам надається доступ до інформації про атестацію робочих місць, заплановані профілактичні заходи, результати розслідування нещасних випадків і професійних захворювань, а також до повідомлень органів державного нагляду за охороною праці.

5.2 Правила охорони праці при зварюванні елементів ферми

При ручному зварюванні, відповідно до закону України «Про охорону праці», є певні вимоги безпеки, які наведено нижче:

1. Зварювання повинно відбуватися на стаціонарних постах з місцевою витяжною вентиляцією.
2. У випадку неможливості зварювання на стаціонарних постах застосовуються місцеві відсмоктувачі.
3. Робочі місця на висоті понад 1,3 м повинні відповідати вимогам НПАОП 0.00-1.15-07.
4. Працювати на різних висотах дозволяється лише за наявності захисту від бризок металу та інших предметів.
5. Забороняється зварювати посудини і трубопроводи під тиском або з рідинами.
6. При виконанні зварювальних робіт усередині виробів потрібно забезпечити достатню швидкість руху повітря (0,7-2,0 м/с) та підтримувати температуру повітря не нижче 20 °С.
7. Витяжне повітря повинно відводитися з приміщення.

8. У разі неможливості улаштування витяжки необхідно подавати під маску зварника чисте повітря об'ємом 6-8 м³/год, підігріте до температури не нижче 18 °С.

5.3 Оцінка стійкості елементів ферми до впливу ударної хвилі ядерного вибуху і заходи щодо її підвищення

Надлишковий тиск (ΔP_{ϕ}) - основний фактор, що визначає руйнівну силу повітряної ударної хвилі.

Показником стійкості елементів ферми проти ударної хвилі є максимальне значення надмірного тиску, при якому елементи об'єкта не руйнуються або отримують лише помірні пошкодження. Значення надмірного тиску називають межею стійкості об'єкта до дії ударної хвилі ($\Delta P_{\phi \text{ lim}}$). Умовами стійкості є $\Delta P_{\phi \text{ lim}} \geq \Delta P_{\phi \text{ max}}$. [35].

Якщо елементи не стійкі - $\Delta P_{\phi \text{ lim}} < \Delta P_{\phi \text{ max}}$.

($\Delta P_{\phi \text{ max}}$ - максимальне значення надмірного тиску ударної хвилі, що очікується на об'єкті при вибуху) [35].

Методика оцінки стійкості об'єкта до дії ударної хвилі включає:

1. Визначення максимального значення надмірного тиску ($\Delta P_{\phi \text{ max}}$) ударної хвилі, що очікується у районі об'єкта під час вибуху.

При ядерному вибуху вихідними даними є:

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

На карті (плані місцевості) позначають імовірну точку прицілювання (нею може бути центр міста). З цієї точки (ТП) з радіусом $r_{\text{відх}}$ будується коло, в межах якого найбільш імовірно влучать боєприпаси. Чим ближча точка ЦВ (центр вибуху) до об'єкта, тим більше ушкоджень він отримає (рис. 5.1). Визначають мінімальне

можливе віддалення центру (епіцентру) вибуху від об'єкта і, в залежності від потужності ядерних боєприпасів та виду вибуху, у таблиці 5.1 знаходять максимальне значення надмірного тиску ударної хвилі, що очікується на об'єкті $\Delta P_{ф.мах}$

Таблиця 5.1 – Ступінь руйнування елементів ферми при надмірному тиску $\Delta P_{ф.мах}$, з можливим збитком, залежно від ступеня руйнування елемента [35]

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

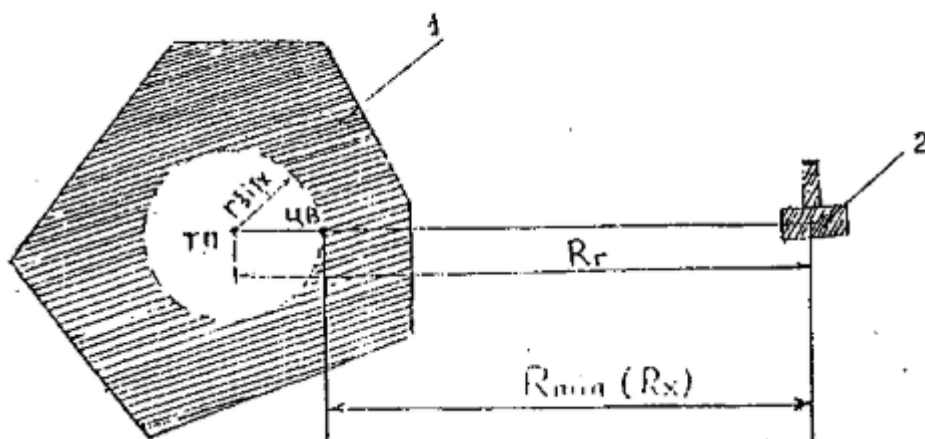


Рисунок 5.1 – Визначення мінімальної відстані до імовірного центру вибуху, 1-місто, 2-об'єкт [36]

Аналізують результати оцінки і роблять висновки, чи потребує об'єкт підвищення стійкості.

Доцільно підвищувати стійкість об'єкта до значення $\Delta P_{ф.мах}$, якщо це не потребує великих економічних витрат. У іншому випадку достатньо буде підвищити стійкість найбільш слабких елементів до рівня стійкості більшості елементів об'єкта.

На основі висновків пропонують заходи щодо підвищення стійкості роботи об'єкта, а також запобігання виникнення надзвичайних ситуацій.

Такими заходами можуть бути:

- укріплення несучих конструкцій та перекрить будівель установкою додаткових колон, ферм, контрфорсів або підкосів;
- розміщення обладнання на нижніх поверхах будівель або в підвалах, надійне закріплення на фундаменті, установка захисних кожухів або ковпаків;
- прокладка кабельних мереж та трубопроводів під землею;
- створення резервних запасів контрольно-вимірювальної апаратури [36].

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Для дослідження в кваліфікаційній роботі вибрано типову зварну ферму з паралельними поясами, довжиною 8000 мм та висотою 580 мм.

2. Вибрано програмний пакет SolidWorks для проведення комп'ютерно модулюючого експерименту. Визначено схеми базування і прикладання навантажень на ферму, їх величину і тип.

3. Досліджено параметри НДС в елементах ферми при різних типах навантажування, визначено, що найбільші напруження у нижньому та верхньому поясах ферми виникали в опорних та проміжних вузлах.

4. Проведено дослідження зварної ферми комп'ютерно--моделюючим експериментом за допомогою програмного пакету SolidWorks, під впливом статичних та циклічних навантажень.

5. За результатами комп'ютерно-моделюючого експерименту виявлено необхідність підсилення ферми. Запропоновано та досліджено варіант зміцнення ферми під дією статичних та циклічних навантажень. Визначено, що в порівнянні зміцненої ферми з початковою, НДС у вузлах ферми, під дією статичного й циклічного навантаження, наглядно зменшилися, що призвело до загального зменшення НДС в елементах ферми.

6. Проаналізовано оцінку прийнятих рішень з урахуванням результатів комп'ютерно-моделюючого експерименту.

7. Визначено, що проведення комп'ютерно-моделюючих експериментів, з метою отримання параметрів НДС в елементах ферми, при дії різних типів статичних та циклічних навантажень, є необхідним в галузі будівництва. За допомогою комп'ютерно-моделюючих експериментів виявляються фактичні НДС в елементах ферми, порівняно з класичними розрахунковими методиками, в яких всі вузли вважаються шарнірними а стержні такими, що працюють на розтяг і стиск.

БІБЛІОГРАФІЯ

1. Волянський В.А. Програмний розрахунок конструктивних елементів ферм і їх дослідження /В. Волянський// Матеріали: VII Міжнародної студентської науково - технічної конференції «Природничі та гуманітарні науки. Актуальні питання» /Тернопіль: Терн. нац. техніч. ун-т ім. І.Пулюя – м. Тернопіль, 25-26 квітня 2024 р.,– 15с

2. Ковальчук Я.О. Тримка здатність будівельної підкроквяної зварної ферми при дії статичних навантажень / Я.О.Ковальчук, Н.Я. Шингера // XVI наук. конф. Тернопільського нац. тех. ун-ту ім. І. Пулюя, 5–6 груд. 2012р. : тези доп. – Т. II, Тернопіль, 2012. – С. 87.

3. 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).

4. 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.

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. Ковальчук Я. О. Фізичне моделювання втомного пошкодження зварної ферми / Я. О. Ковальчук, Н. Я. Шингера // Матеріали XIX наукової конференції ТНТУ ім. Ів. Пулюя, 18-19 травня 2016 року – Т. : ТНТУ, 2016 – С. 143.

7. Шингера Н. Я. Моделювання пошкодження зварних будівельних ферм / Н. Я. Шингера, Я. О. Ковальчук, І. Б. Окіпний // Вісник Тернопільського нац. техн. ун-ту ім. І. Пулюя. – 2011. – Спецвип., част. 2 – С. 112–117.

8. 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.

9. Wang, X.L.; Chen, P.; Yang, W.W. Finite Element Analysis for Unstiffened Overlapped CHS KK-Joints Welded in Different Ways. *Adv. Mater. Res.* 2011, 446–449, 533–536.

10. Han, L.H.; Zheng, L.Q.; He, S.H.; Tao, Z. Tests on curved concrete filled steel tubular members subjected to axial compression. *J. Constr. Steel Res.* 2011, 67, 965–976.

11. 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).

12. 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.

13. 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: Каменяр, 2014. – Вип. 10. – С.461

14. Ковальчук Я.О. Конструювання вузлів зварних ферм з використанням ПК ANSYS / Я. О.Ковальчук, Н.Я. Шингера, М.А.Басара //Вісник ТНТУ ім. Івана Пулюя. – 2017. № 1(85) – С. 47 –52.

15. Ковальчук Я.О Моделювання втомної пошкоджуваності вузлів підкрюквяних 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.

16. 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.

17. Ковальчук Я.О. Втомна пошкоджуваність вузлів зварних фермових 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.

18. Ковальчук Я.О. Особливості втомного пошкодження вузлів зварної ферми / Я.О. Ковальчук, Н.Я. Шингера, О.І. Качка // Міжнародна науково-технічна конференція «Інноваційні технології в будівництві» – ВНТУ, 18-20 листоп. 2014 р.: тези доп. – , Вінниця, 2014, с. 37

19. Ковальчук Я.О. Вплив конструктивних та технологічних особливостей вузлів на тримкість зварної ферми / Я.О. Ковальчук, Н.Я. Шингера, О.І.Качка // Міжнар. наук.-техн. конф. «Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій», ТНТУ, 19–20 трав. 2015 р.: тези доп. – Тернопіль, 2015. – С. 48 — (Нові матеріали, міцність і довговічність елементів конструкцій).

20. 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: Каменяр, 2014. – Вип. 10. – С. 461 – 471.

21. 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).

22. 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).

23. 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).

24. 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.

25. 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.

26. 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

27. Kovalchuk Y. O. Computer modeling of the stresses in welded truss / Yaroslav Kovalchuk, Natalya Shynhera // *Вісник ТНТУ*, – Т. : ТНТУ, 2016 – Том 82. – № 2. – С. 44-48. – (Механіка та матеріалознавство).

28. ДБН В.1.2-6:2021 Основні вимоги до будівель і споруд. Механічний опір та стійкість: -К., Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій, – 2021, 28 с.

29. ДБН В.2.6-198:2014 Сталеві конструкції. Норми проектування. Зі зміною №1, : К., Мінрегіон України, – 2014, 128 с с.

30. Khademi, F. *Load Rating of Railway Bridges by Analysis and Testing; Dissertations & Theses—Gradworks; Illinois Institute of Technology: Chicago, IL, USA, 2015.*

31. Khdeir A. A. Thermal effects on the response of crossply laminated shallow shells. *Int. J. Solids and Struct.* –1992. – 29, No5. – P. 653-667.

32. Chen L.-W. ,Chen L.-Y. .Thermal deformation and stress analysis of composite laminated plates by finite element method. *.Comput. and Struct.* – 1990. – 35, No 1. – p.41.

33. 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.

34. 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..

35. 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. Отримано з <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/39196>.

36. Навчальний посібник «ТЕХНОЕКОЛОГІЯ ТА ЦИВІЛЬНА БЕЗПЕКА. ЧАСТИНА «ЦИВІЛЬНА БЕЗПЕКА»» / автор-укладач В.С. Стручок– Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., – 156 с. Отримано з <http://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/39424>.