

Міністерство освіти і науки України
Центральноукраїнський національний технічний університет
Факультет будівництва, транспорту та енергетики
Кафедра будівельних, дорожніх машин і будівництва

Допустити до захисту
зав. кафедрою БДМБ
канд. техн. наук, професор
Настоящий В.А.
"___" "_____" 2024р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

на тему: «Дослідження впливу викривлення елементів на несучу здатність
ферми типу «Молодечно»»

ДКД 19238 А
Альбом документів

Виконав здобувач освіти гр. БІ-23М-2

спеціальності 192 «Будівництво та
цивільна інженерія»
Торжинський А. М.
"___" "_____" 2024 р.

Керівник магістерської роботи
канд. техн. наук, доцент
Портнов Г.Д.
"___" "_____" 2024 р.

Центральноукраїнський національний технічний університет

(повне найменування вищого навчального закладу)

Інститут, факультет, відділення **БТ**

Кафедра, циклова комісія **будівельні, дорожні машини і будівництво**

Освітньо-кваліфікаційний рівень **магістр**

Спеціальність **192 «Будівництво та цивільна інженерія»**

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

**Завідувач кафедри БДМБ
к.т.н. проф. Настоящий В.А.**

“___” _____ 2024 року

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну магістерську роботу

Торжинський Андрій Миколайович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) **«Дослідження впливу викривлення елементів на несучу здатність ферми типу «Молодечно»**

керівник проекту (роботи) *канд. техн. наук, доцент Портнов Г.Д.*,

затверджені наказом вищого навчального закладу від “___” ___ 2024 року №

2. Строк подання студентом проекту (роботи) *10.11.2024*

3. Вихідні дані до проекту (роботи): : *ДСТУ Б В.2.6-74:2008. Ферми сталеві кроквяні з гнutoзварних профілів прямокутного перерізу. Технічні умови*

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) *1. Науково-дослідний розділ. 2. Охорона праці.*

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

Плакати мультимедійної презентації (Не менше 10 плакатів, які ілюструють методику та результати досліджень)

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Науково-дослідний розділ	доцент Портнов Г.Д.		
Охорона праці	доцент Дарієнко В.В.		

7. Дата видачі завдання 10.09.2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Виконання науково-дослідного розділу	10.09 - 10.11.24	
2	Розробка заходів з охорони праці	10.09-05.11.24	
3	Оформлення альбому документів	01.11 - 10.11.24	

Здобувач

(підпис)

Горжинський А.М.

(прізвище та ініціали)

Керівник проекту (роботи)

(підпис)

Портнов Г.Д.

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Однією зі значних переваг конструкцій ферм є робота більшості її елементів на повздовжні зусилля без виникнення згинаючих моментів, що дозволяє зробити конструкцію оптимальною за масою.

Недоліком фермених конструкцій є нерівномірність розподілу напружень, яка пов'язана з місцевим вигином стрижнів, що виникає як в результаті наявності ексцентриситету їх з'єднання, так і з непрямолінійності стрижнів.

Аналітичні методи розрахунку місцевих згинальних напружень у непрямолінійних стрижнях ферм відсутні, оскільки математична модель ферми з жорсткими вузлами повинна описувати багаторазово статично невизначену систему.

Основним сучасним методом дослідження ферм є метод скінчених елементів (МСЕ), який дозволяє визначати НДС елементів за будь-яких умов їх з'єднання у вузлу.

В даній роботі представлені дослідження впливу викривлення елементів ферми типу «Молодечно», які виникають в процесі виготовлення, монтажу і експлуатації на її несну здатність з розробкою методики оцінки напружено – деформованого стану конструкції, на підставі яких можна робити узагальнені висновки та рекомендації для врахування даного фактору в інженерних розрахунках.

Ключові слова: Ферма типу «Молодечно», відхили від прямолінійності; метод скінчених елементів, напружено – деформований стан.

ABSTRACT

One of the significant advantages of truss structures is the operation of most of its elements on longitudinal forces without the occurrence of bending moments, which allows to make the structure optimal in terms of mass.

The disadvantage of truss structures is the uneven distribution of stresses, which is associated with the local bending of the rods, which occurs both as a result of the eccentricity of their connection, and from the non-linearity of the rods.

There are no analytical methods for calculating local bending stresses in non-linear truss rods, since the mathematical model of a truss with rigid nodes must describe a repeatedly statically indeterminate system.

The main modern method of truss research is the finite element method (FEM), which allows you to determine the VAT of elements under any conditions of their connection at the node.

This paper presents a study of the impact of distortion of the elements of the "Molodechno" type truss, which occur in the process of manufacture, installation and operation, on its bearing capacity with the development of a methodology for assessing the stressed - deformed state of the structure, on the basis of which it is possible to draw generalized conclusions and recommendations for taking this factor into account in engineering calculations.

Key words: Molodechno-type farm, deviations from straightness; finite element method, stressed – deformed state.

З М І С Т

ВСТУП	4
Розділ 1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ	5
1.1. Загальна характеристика фермових конструкцій	6
1.2. Методи розрахунку ферм	9
1.3. Вплив ексцентриситету у вузлах на місцевий вигин елементів ферм із трикутними ґратами	11
1.4. Дослідження місцевого вигину стрижнів ферм, що виникає внаслідок їх викривлення	16
1.5. Загальна характеристика ферм типу «Молодечно»	19
<u>Розділ 2 МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ</u>	<u>24</u>
2.1. Побудова 3D моделі ферми типу «Молодечно»	24
2.2. Дослідження впливу вигину елементів ферми на НДС елементів.....	24
<u>Розділ 3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ</u>	
<u>3.1 Побудова моделі ферми «Молодечно» серії 1.460.3-14 ...</u>	<u>26</u>
3.2 Параметри статичного дослідження моделі	28
3.3 Результати дослідження ферми з викривленням панелі верхнього поясу	34
3.4 Результати дослідження ферми з викривленням опорного розкосу	35
3.5 Результати дослідження ферми з викривленням розкосу решітки	36
3.6 Дослідження впливу викривлення елементів ферми на жорсткість	36
3.3 Аналіз даних дослідження	40

ВИСНОВКИ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ДОСЛІДЖЕНЬ 43

CONCLUSIONS RESULTS OF RESEARCH 44

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 45

ДОДАТОК 1 50

ДОДАТОК 2 ОХОРОНА ПРАЦІ56

ВСТУП

Актуальність теми. Однією зі значних переваг конструкцій ферм є робота більшості її елементів на повздовжні зусилля без виникнення згинаючих моментів, що дозволяє зробити конструкцію оптимальною за масою.

Недоліком фермених конструкцій є нерівномірність розподілу напружень, яка пов'язана з місцевим вигином стрижнів, що виникає як в результаті наявності ексцентриситету їх з'єднання, так і з непрямолінійності стрижнів.

Аналітичні методи розрахунку місцевих згинальних напружень у непрямолінійних стрижнях ферм відсутні, оскільки математична модель ферми з жорсткими вузлами повинна описувати багаторазово статично невизначену систему.

Основним сучасним методом дослідження ферм є метод скінчених елементів (МСЕ), який дозволяє отримувати визначати НДС елементів за будь-яких умов їх з'єднання у вузлу.

В даній роботі представлені дослідження впливу викривлення елементів ферми типу «Молодечно», які виникають в процесі виготовлення, монтажу і експлуатації на її несну здатність з розробкою методики оцінки напружено – деформованого стану конструкції, на підставі яких можна робити узагальнені висновки та рекомендації для врахування даного фактору в інженерних розрахунках.

Зміст роботи: інженерно-технічна розробка з елементами наукових досліджень, зорієнтованими на розв'язання конкретної прикладної науково-технічної задачі в галузі будівництва.

Мета роботи: Розробка методики розрахунку НДС ферм на типу «Молодечно» з урахуванням недосконалості форми елементів.

Задачі дослідження:

1. Визначення розповсюдженості викривлення стрижнів фермених конструкцій як типового виду ушкодження.

2. Визначення обмежень можливого викривлення осі стрижня ферменої конструкції за діючими нормами.

3. Вивчення сучасного стану аналітичних моделей впливу викривлення стрижнів ферм на їх напружено – деформований стан.

4. Розробка методики дослідження впливу викривлення стрижнів на несну здатність елементів ферми типу «Молодечно» з застосуванням ПК SolidWorks.

5. Дослідження впливу викривлення стрижнів на несну здатність елементів ферми типу «Молодечно» в середовищі ПК SolidWorks.

Предмет дослідження: Моделі ферми типу «Молодечно» з дефектними елементами, створені в середовищі ПК SolidWorks.

Метод дослідження: метод скінчених елементів.

Наукова та технічна новизна одержаних результатів:

Проведений аналіз впливу викривлення елементів ферми типу «Молодечно» на їх несну здатність з застосуванням ПК SolidWorks.

Практичне значення одержаних результатів:

Розроблена методика дослідження впливу викривлення стрижнів на несну здатність елементів ферми типу «Молодечно». Очікувані результати науково-дослідної роботи: обґрунтування вимог при оцінці придатності ферм типу «Молодечно» з викривленими елементами до експлуатації.

Структура роботи. Робота містить анотації українською та англійською мовами, пояснювальну записку на 71 сторінці, у тому числі

18 таблиць, 42 рисунків, список з 23 використаних джерел, а також мультимедійну презентацію з 18 слайдів. Текст роботи містить зміст, вступ, 3 розділи, висновки і рекомендації за результатами досліджень (українською та англійською мовами).

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Перевагою фермених конструкцій по відношенню до балочних цільностінчастих є низька металомісткість мало навантажених велико пролітних конструкцій.

До недоліків фермених конструкцій відносяться висока трудомісткість виготовлення та чутливість до факторів втомного та крихкого пошкоджень.

Ферми не рекомендується застосовувати при інтенсивних циклічних навантаженнях і в умовах низьких температур через нерівномірність розподілу напружень у вузлах, пов'язаних з концентрацією напружень і залишковими напруженнями в зоні приєднання стрижня до вузла.

Крім того, нерівномірність розподілу напружень пов'язана з місцевим вигином стрижнів, що виникає як в результаті наявності ексцентриситету їх з'єднання, так і з непрямолінійності стрижнів.

Результатом дії цих факторів є виникнення згинальних напружень, які в певних ситуаціях можуть перевищувати поздовжні напруження в стрижні.

Місцевий вигин стрижнів не впливає на їхню несучу здатність, якщо вона визначається міцністю за умовою в'язкої руйнації (тобто для розтягнутих тонкостінних стрижнів при в'язкому стані матеріалу). Однак у тих випадках, коли процес пошкодження не супроводжується втомою або хрупким руйнуванням, місцевий вигин може істотно впливати на несучу здатність і ресурс елемента конструкції. Крім того, місцевий вигин може призводити до зниження стійкості стиснутих стрижнів.

Ухвалені в нормативних документах методики розрахунків ферм зазначені фактори не враховують.

1.1 Загальна характеристика фермових конструкцій

У конструкціях ферм найчастіше зустрічаються стрижні з кутового та трубчастого профілів.

Кутовий профіль більш технологічний для формування вузлів на косинках (рис. 1.1 а).

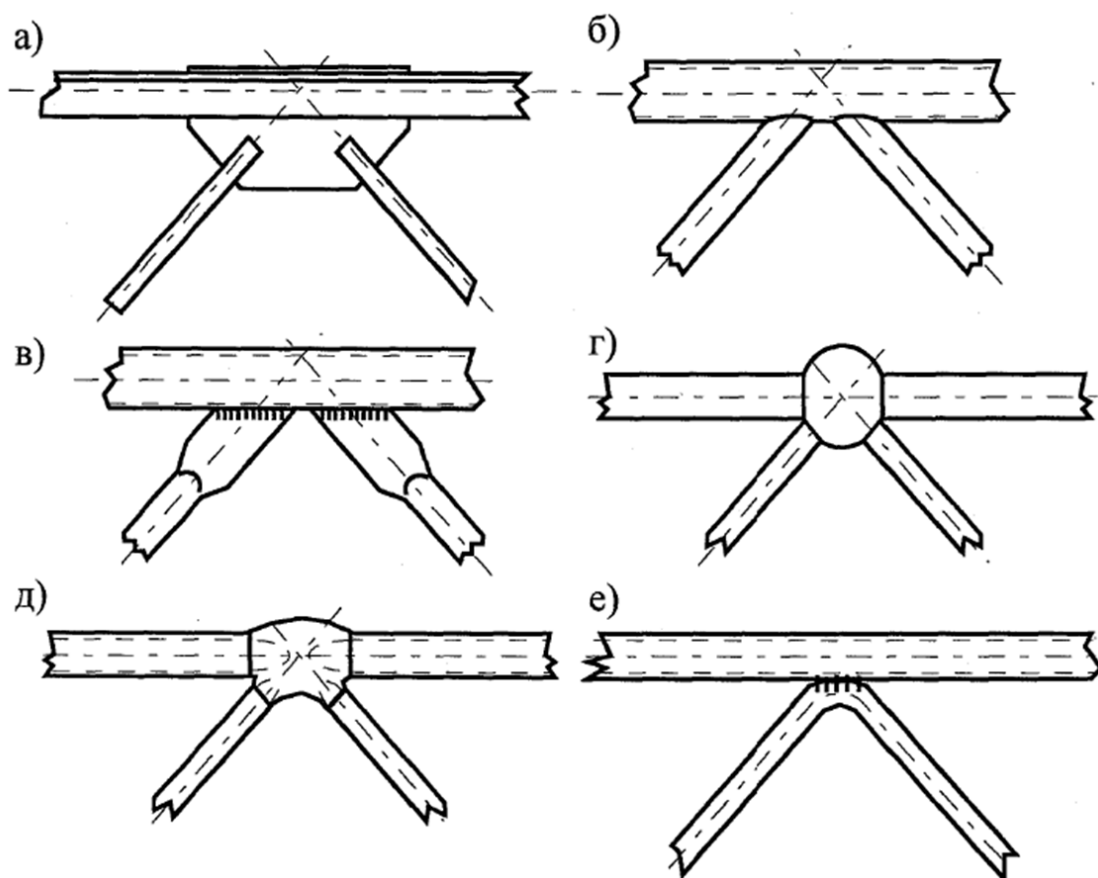


Рис. 1.1 Конструкції вузлів ферм

У сучасних фермових конструкціях найчастіше використовуються трубчасті профілі. Їх з'єднання здійснюється за допомогою косинки (рис. 1,1 б) або приварювання розплющеної або обрізаної частини стрижня до поясу (рис. 1,1 в).

Застосування трубчастих профілів забезпечує кращу стійкість стрижнів при стисканні, менше вітрове навантаження та більшу корозійну стійкість.

При виготовленні ферми прагнуть забезпечити перетин осей стрижнів в одній точці.

Найбільш точне центрування стрижнів у вузлу забезпечує з'єднання стрижнів через спеціальний елемент (рис. 1,1 г, д).

У легких конструкціях без інтенсивних циклічних навантажень розкоси утворюються вигнутою трубою (рис.1,1 е). При значному децентруванні вузла і додаткового вигину стрижня така конструкція може бути технологічно привабливою.

Істотним недоліком фермених конструкцій є концентрація напруження у вузлах, пов'язана як зі способом з'єднання стрижнів, так і з їх місцевим вигином.

Зниження впливу цих факторів можна забезпечити конструктивними засобами (рис. 1,1 г, д)

Місцевий вигин виникає у будь-якій зварній фермі. Вигин стрижнів зростає (рис. 1, е), коли їх осі не перетинаються в одній точці (похибки виготовлення, проектне рішення).

В результаті місцевого вигину стійкість стиснутих стрижнів знижується. Місцевий вигин призводить до зниження довговічності при циклічних навантаженнях та виникнення крихкого руйнування.

Відповідно до [6] вплив місцевого вигину в трубчастих фермах можна не враховувати в розрахунку, якщо ексцентриситет e_r знаходиться в межах

$$-0,55 D_c \leq e_r \leq 0,25 D_c ,$$

де D_c - діаметр поясної труби (рис. 1.2).

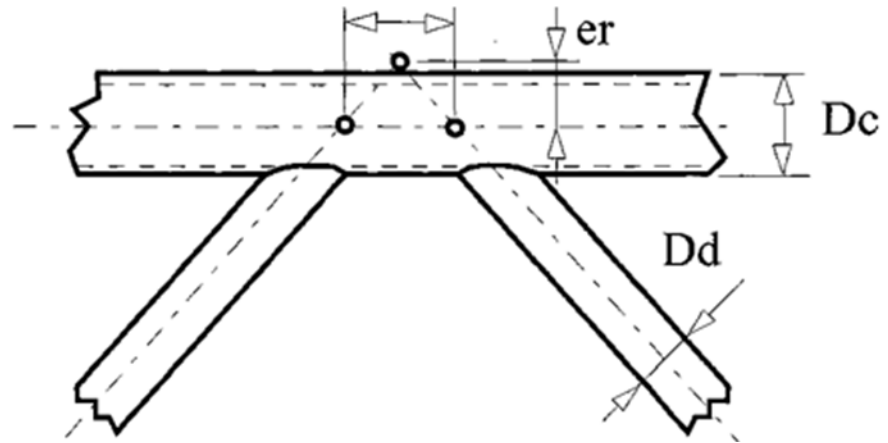


Рис. 1.2 Екцентриситет з'єднання стрижнів

При діаметрах $D_c = 100..200$ мм, екцентриситет може досягати значень $200..100$ мм.

Зазначається необхідність розрахунку елементів ферм з урахуванням відповідних згинальних моментів за наявності екцентриситетів у вузлах. Методика такого розрахунку не наводиться.

Характерним видом ушкодження фермених конструкцій є викривлення стрижнів (рис. 1.3).

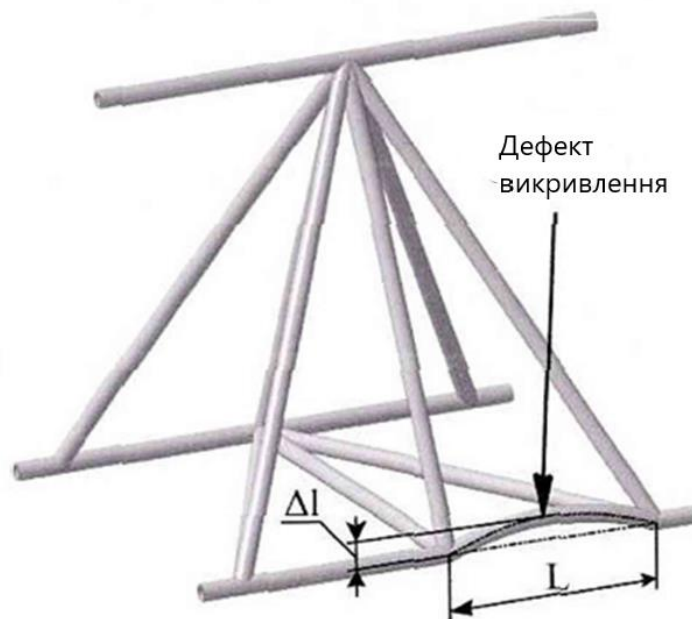


Рис. 1.3 Дефект викривлення стрижня

Викривлення стрижня є причиною виникнення згинальних моментів, що підвищують напруження та знижують стійкість стрижня.

У нормативно-технічній літературі є вимоги, що обмежують можливе викривлення осі стрижня. Так для фермових конструкцій стрілових самохідних кранів вважається гранично допустимим викривлення поясу зі стрілою прогину f не більше $0,0015L$ і розкосу f не більше $0,004$.

Для кранів мостового типу для стрижнів всіх типів на рівні встановлюється обмеження f не більше $0,004$ для розтягнутих і f не більше $0,002$ для стиснутих.

За даними обстежень будівельних конструкцій найбільш типовим видом ушкодження є викривлення стрижнів. Стріла прогину викривлень $f \geq 1/600L$. У стислих розкосах викривлення трапляються частіше.

Необхідність нормування викривлень у стрижнях конкретних ферм є актуальною як при проектуванні, так і при оцінці можливості експлуатації.

1.2 Методи розрахунку ферм

В даний час використовується метод розрахунку ферм за шарнірною розрахунковою схемою, що не враховує можливість вигину стрижнів.

Вигин елементів ферми виникає в результаті ексцентриситетів з'єднання стрижнів та їх непрямолинійності. При цьому місцевий вигин, що виникає, має максимум у вузлах ферм і зонах викривлення стрижнів.

Розрахунок ферми складається з:

- визначення експлуатаційних навантажень;
- розрахунку зусиль та напружень в елементах;
- перевірка умови працездатності.

Методики виконання першого та третього етапів розрахунку є загальними для всіх видів конструкцій.

Розрахунок зусиль та напружень, є специфічним для кожного виду конструкцій.

В даний час в інженерній практиці прийнято чисельні методи розрахунку ферм.

Існують вказівки з розрахунку будівельних ферм з певними типами перерізів стрижнів, що допускають певний ексцентриситет з'єднання стрижнів у вузлу та враховують місцеві згинальні напруження за умови міцності []. Згинальні моменти знаходяться шляхом розподілу моменту M_0 , прикладеного між стрижнями пропорційно до їх погонних жорсткостей:

$$M_0 = \sum_i M_i, \quad \frac{M_i}{M_1} = \frac{J_i/l_i}{J_1/l_1}. \quad (1.1)$$

Аналітичні методики розрахунку місцевих згинальних напружень у непрямолінійних стрижнях ферм відсутні, оскільки математична модель ферми з жорсткими вузлами є багаторазово статично невизначеною системою.

Експериментальне дослідження НДС елементів конструкцій не може широко використовуватися в інженерній практиці через високу трудомісткість.

Основним сучасним методом дослідження ферм є метод скінчених елементів (МСЕ), який дозволяє отримувати визначати НДС стрижнів будь-якої форми за будь-яких умов їх з'єднання у вузлу.

Цей метод дозволяє отримувати чисельні результати для конкретних конструкцій. При цьому для кожного завдання потрібна створення нової моделі.

МСЕ використано для перевірки аналітичних методик, а також отримання масивів даних, на підставі яких можна робити узагальнені висновки та рекомендації для врахування даного фактору в інженерних розрахунках.

1.3 Вплив ексцентриситету у вузлах на місцевий вигин елементів ферм із трикутними ґратами

Трикутні ферми мають найбільше поширення у будівельних конструкціях. У таких фермах, наприклад, фермі типу «Молодечно» використовуються стрижні трубчастого перерізу, що забезпечує найкращу стійкість стиснутих стрижнів та мінімальний вітровий опір. Для цих ферм розроблено методику обчислення коефіцієнта місцевого вигину.

Для оцінки результатів чисельного розрахунку необхідно мати аналітичну методику визначення місцевих згинальних напружень у районі вузлів ферм. Зазвичай використовується безрозмірний коефіцієнт місцевого вигину, що характеризує відношення напружень, створюваних місцевим вигином у стрижні, по відношенню до напружень від поздовжнього зусилля, визначеного за шарнірними схемами.

Коефіцієнт місцевого вигину дорівнює відношенню місцевих розтягуючих згинальних напружень σ_M в стрижні до напружень розтягування-стиснення σ_S , що виникає від поздовжнього зусилля (S):

$$C_f = \frac{\sigma_M}{\sigma_S} = \frac{M A}{S W} \quad (1.2)$$

де M - місцевий згинальний момент у розрахунковому перерізі;

A – площа перерізу стрижня;

W – момент опору перерізу стрижня.

Схема ферми представлена на рис.1.4.

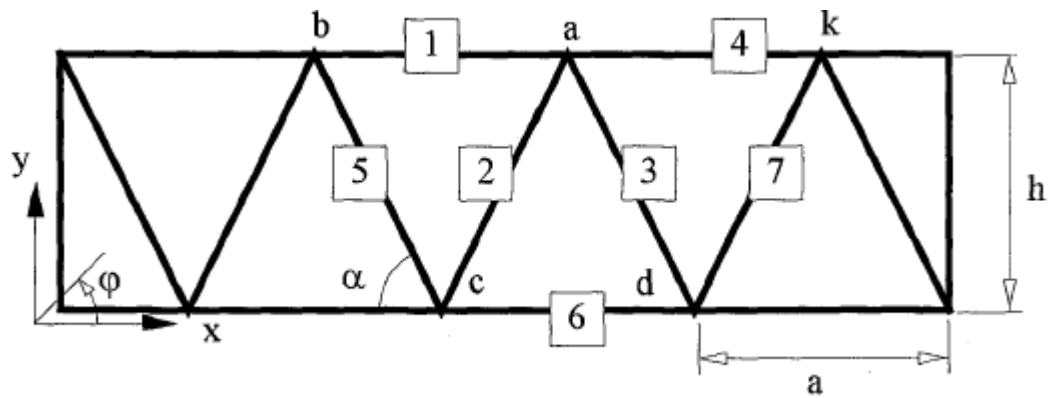


Рис. 1.4 Схема ферми

При розтягуванні (рис. 1.5) стрижні 1, 4 та 6 подовжуються, а розкоси залишаються нульовими. Пояси не повертаються, а кути повороту розкосів 2 та 3 рівні.

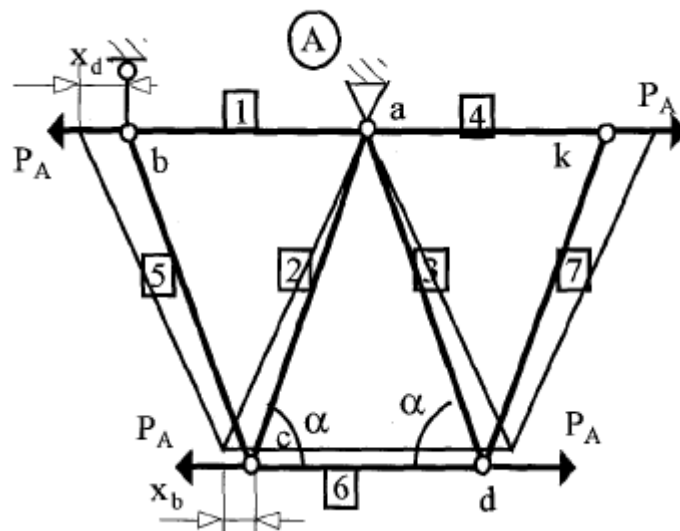


Рис. 1.5 Схема деформації панелі ферми при розтягуванні

При згинанні стрижні (рис. 1.6) 1 і 4 подовжуються, стрижень 6 коротшає. При цьому пояс 6 не повертається через симетрію, розкоси залишаються нульовими і повертаються в різні боки.

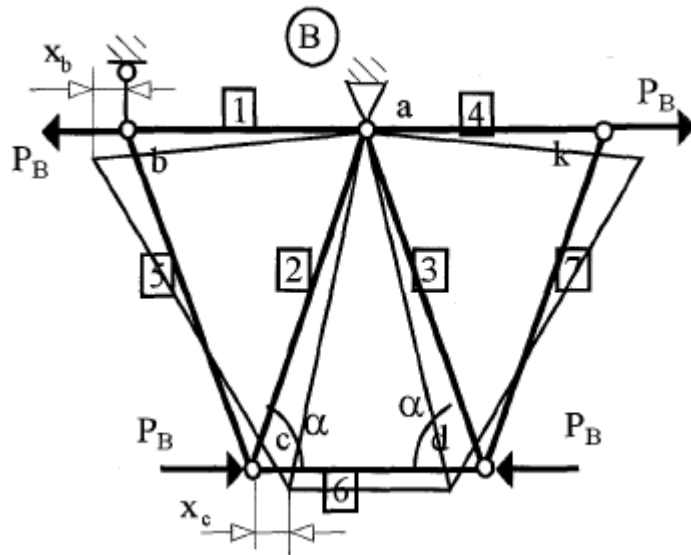


Рис. 1.6 Схема деформації панелі ферми при вигині

При моделюванні зсуву ферми (рис.1.7) завантажуються лише розкоси, а пояси залишаються нульовими.

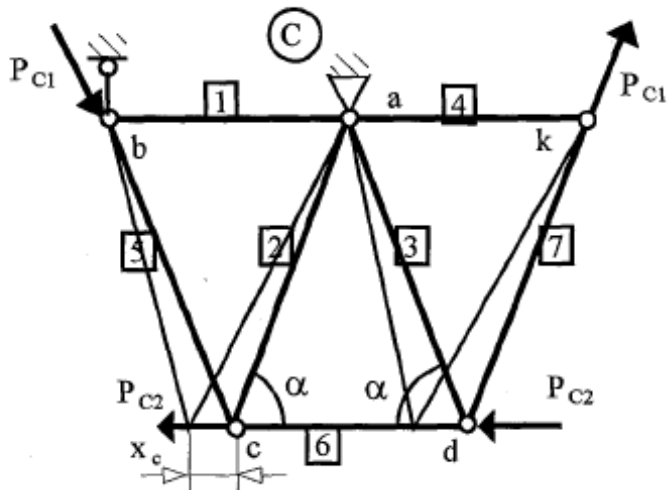


Рис. 1.7 Схема деформації панелі ферми при зсуві

Форми вигину стрижнів при окремих випадках навантаження представлені на рис. 1.8

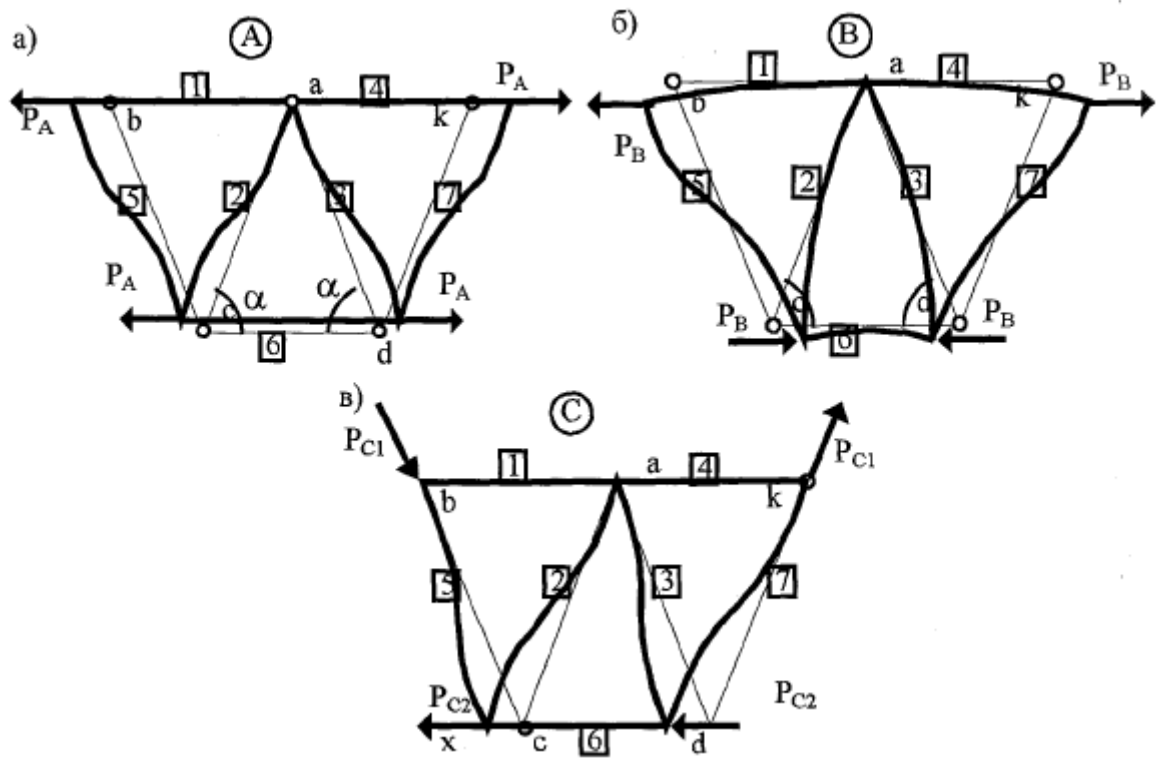


Рис. 1.8 Схеми форм вигину стрижнів

Значення коефіцієнтів форми вигину стрижнів аналізованої ферми при окремих випадках навантаження наведені в табл.1.1.

Табл. 1.1

Випадок навантаження	Коефіцієнт форми вигину			
	1	2	3	4
А	-	2	2	-
В	1	1	1	1
С	-	2	2	-

Для позначень, поданих на рис. 1.10 формули для виявлення коефіцієнтів місцевого вигину

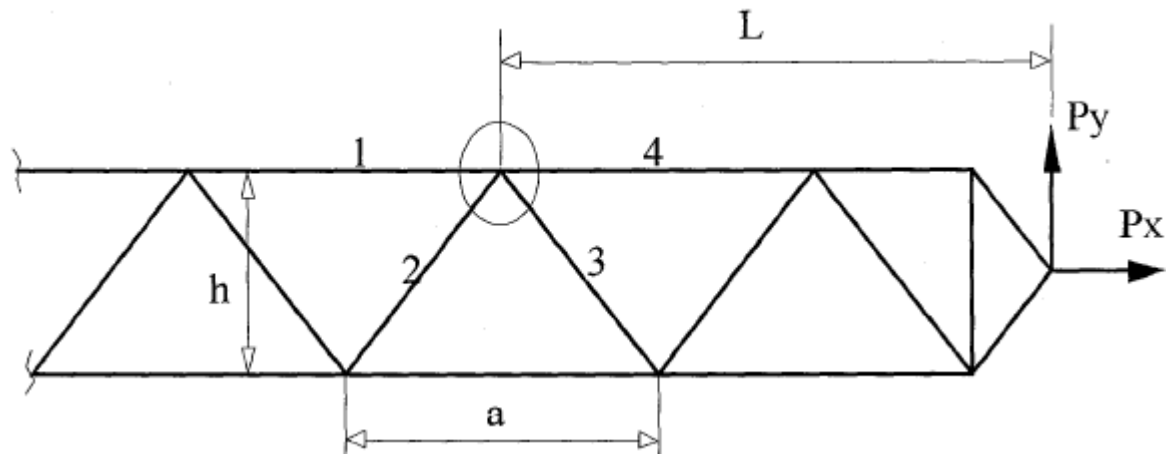


Рис. 1.10 Позначення на схемі ферми

Для поясу

$$C_{fca} \cong \frac{3D_c}{2(L+h)} \left\{ \frac{L+h}{h} + \frac{0,8he}{D_d D_c} \right\} = \frac{3D_c}{2h} \left\{ 1 - \frac{0,8he}{D_d D_c (L/h+1)} \right\}$$

(1.3)

Для розкоса

$$C_{fda} \cong \frac{3D_d^2 t_d}{4D_c h t_c} \left\{ \frac{P_x}{P_y} + \frac{2L+h}{2h} + \left(\frac{D_c t_c}{D_d t_d} \right)^2 + \frac{4he}{3D_d D_c} \right\} \quad (1.4)$$

При однакових умовах навантаження коефіцієнти місцевого вигину в розкосах можуть досягати більших значень, ніж у поясах. Так при прийнятих діапазонах значень аргументів значення коефіцієнта місцевого вигину для поясу лежать в інтервалі -0,8. 1,5 до +2,5.

б) Коефіцієнт місцевого вигину для поясу залежить від поздовжнього навантаження ферми (зусилля P_x , рис.1.9), а розкосу залежить від співвідношення P_x / P_y .

в) При точному центруванні стрижнів у вузлу, тобто. при $e = 0$, коефіцієнт місцевого вигину для поясу приблизно дорівнює

$$C_{fca} \cong 1,5 \frac{D_c}{h} \quad (1.5)$$

За тієї ж умови коефіцієнт місцевого вигину для розкосу дорівнює

$$C_{fda} \equiv \frac{3D_d^2 t_d}{4 D_c h t_c} \left\{ \frac{P_x}{P_y} + \frac{2L+h}{2h} + \left(\frac{D_c t_c}{D_d t_d} \right)^2 \right\} \quad (1.6)$$

Для крайніх розкосів опорних ферм

$$C_{fda} \equiv (2..2,8) \frac{D_d}{h} \quad (1.7)$$

Таким чином, коефіцієнт місцевого вигину тим менший, чим більша довжина стрижнів, і чим менше їх діаметр труб.

Зі збільшенням поздовжнього навантаження (P_x) та відстані до опертого кінця ферми коефіцієнт місцевого вигину в розкосі зростає.

г) Вплив ексцентриситету на коефіцієнт місцевого вигину тим більший, чим більший діаметр стрижнів і чим менші поперечні розміри ферми. Що ближче пояс до навантаженого кінця ферми, то більший вплив ексцентриситету на значення коефіцієнта місцевого вигину.

д) Коефіцієнт місцевого вигину для поясу досягає мінімуму при позитивних значеннях ексцентриситету.

Мінімальний рівень місцевого вигину в розкосах виходить при негативному ексцентриситеті.

1.4 Дослідження місцевого вигину стрижнів ферм, що виникає внаслідок їх викривлення

Дослідження проводилися на моделях ферм із трикутними ґратами без стоек. Ферма мала параметри $L_n = 2000$ мм та $h = 1000$ мм (рис.1.10.1.11). Розглядалися випадки викривлення поясу або розкосу, при цьому викривлення стрижнів розташовувалося в площині XZ ферми або в перпендикулярній їй площині. Ферма завантажувалася вертикальним навантаженням $P = 50$ кН, яка прикладалася у вузлу 9. При розрахунках варіювалися стріла викривлення стрижня d_i , яка змінювалася в інтервалі від 50 мм, а також положення і довжина викривлення.

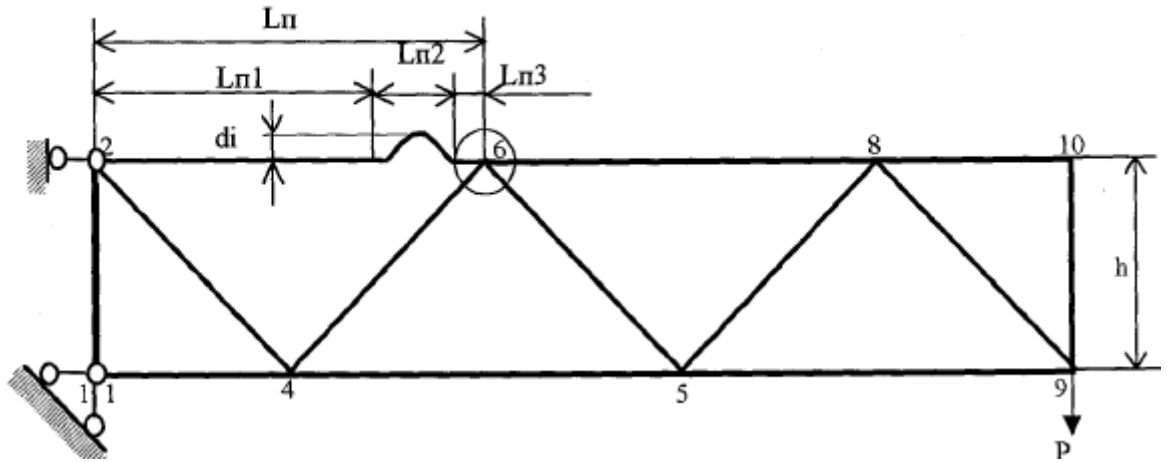


Рис. 1.11 Схема ферми з викривленим поясом

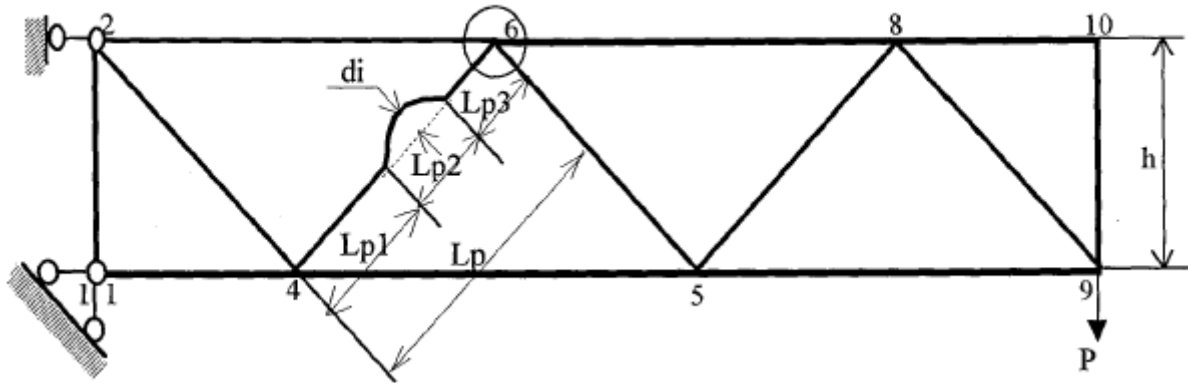


Рис. 1.12 Схема ферми з викривленим розкосом

Коефіцієнти місцевого вигину обчислювалися по всім вузлам скінченноелементної моделі, розташованих на викривленому стрижні, при кожному значенні стріли викривлення d_i .

Для схеми представленої на рис. 1.13

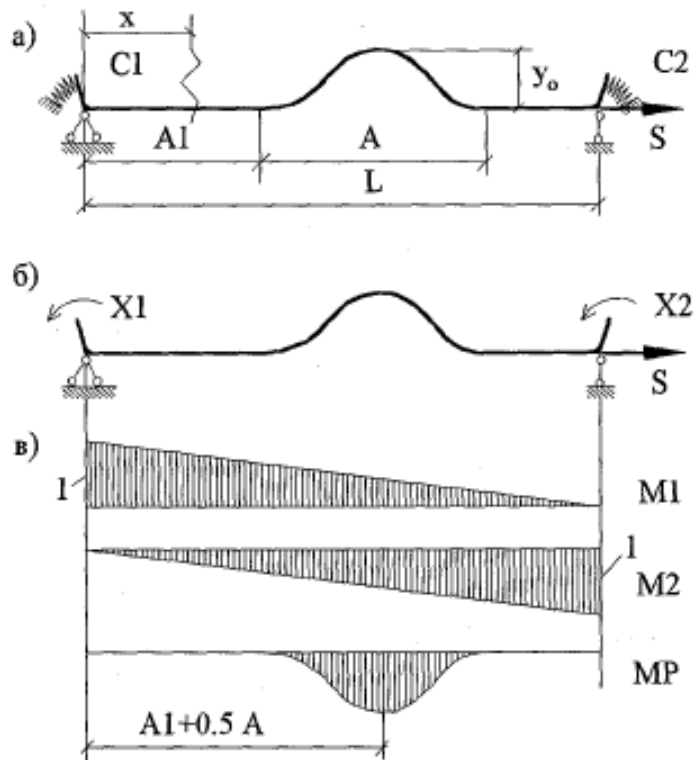


Рис. 1.13 Схема до розрахунку вигинаючих моментів

$$M(x) = S y(x) + \frac{3S y_0 \alpha}{1 - 4(1 + 3U_1)(1 + 3U_2)} R(x)$$

$$R(x) = -0,5\alpha - \beta + 2(1 - 0,5\alpha - \beta)(1 + 3U_2) + \frac{x}{L} R_1;$$

$$R_1 = [-1 + \alpha + 2\beta + 2(0,5\alpha + \beta)(1 + 3U_1) - 2(1 - 0,5\alpha - \beta)(1 + 3U_2)]$$

(1.8)

Де величини \$U\$ в (3.1.5), (3.1.6) та (3.1.8) обчислюються за формулою

$$U = \frac{J}{\gamma L \sum_i \frac{J_i}{L_i}},$$

(1.9)

моменти в пружних закладеннях

$$X_1 = 3S y_o \alpha \frac{0,5\alpha + \beta - (1 - 0,5\alpha - \beta)(2 + 6U_2)}{1 - (2 + 6U_1)(2 + 6U_2)}$$

$$X_2 = 3S y_o \alpha \frac{-1 + 0,5\alpha + \beta + (0,5\alpha + \beta)(2 + 6U_1)}{1 - (2 + 6U_1)(2 + 6U_2)}$$

$$\alpha = \frac{A}{L}, \quad \beta = \frac{A_1}{L}, \quad U_1 = \frac{C_1 E J}{L}, \quad U_2 = \frac{C_2 E J}{L}$$

(1.10)

1.5. Загальна характеристика ферм типу «Молодечно»

В Україні виготовлення ферм виконується за вимогами ДСТУ Б В.2.6-74:2008 [6] (рис. 1.14).

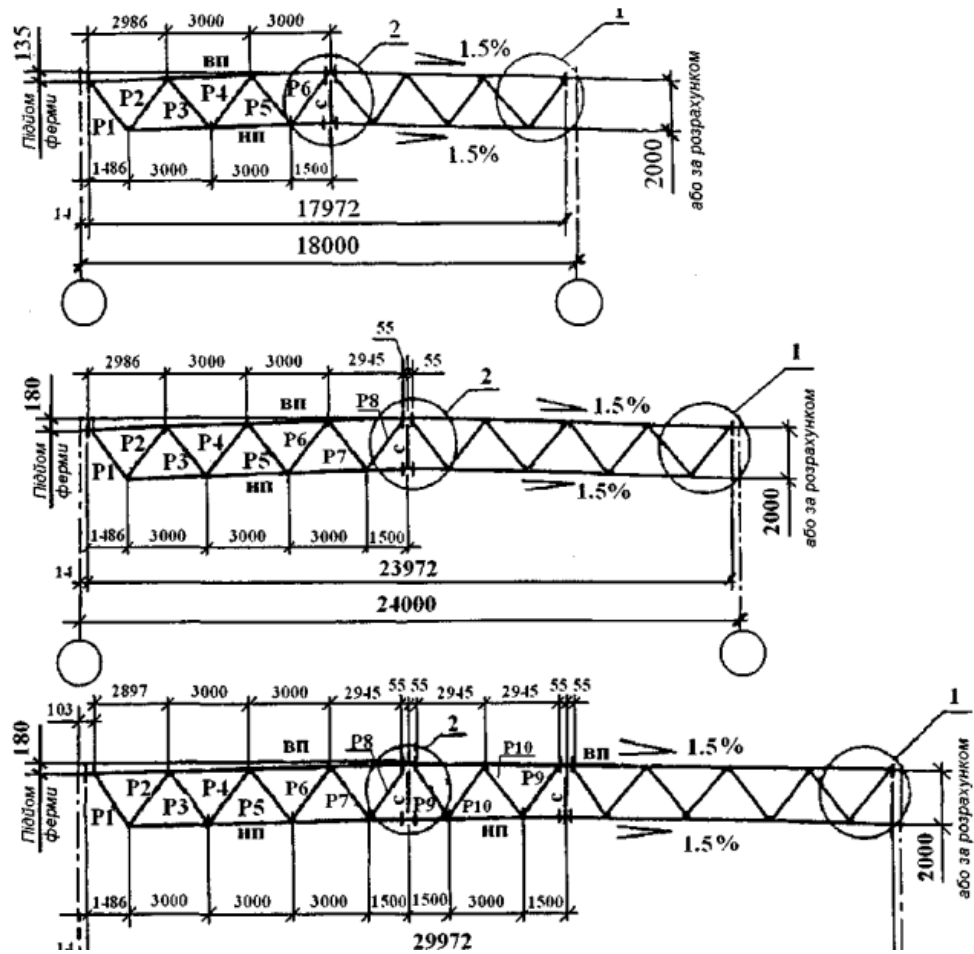


Рис. 1.14 Схеми та основні розміри ферм за ДСТУ Б В.2.6-74:2008

. В даний час широке розповсюдження отримали ферми типу «Молодечно» з трикутною решіткою.

Ферми проектується із замкнутих гнutoзварних профілів з вузлами без фасонки. Покриття спирається безпосередньо на верхній пояс (прогони). Решітка трикутна.

Матеріал конструкцій - сталь С245, С355 ДСТУ 8539:2015.

Елементи поясів і решітки виготовляються з квадратних і прямокутних труб за ДСТУ 8940:2019, або ДСТУ ЕМ 10219-2:2019.

Фасонки, планки, ребра, кріплення прогонів виготовляються із листа за ДСТУ 8540:2015.

З'єднання розкосів із поясами безпосереднє, допускається розцентрування у вузлах до 0,25 висоти поясу.

За обрисом кроквяні ферми двосхилі з паралельними поясами з ухилом 0,015. Опорні розкоси - низхідні .

Висота ферм по зовнішніх гранях - 2000 мм. Ферми прольотом 18 і 24 м мають дві відправні марки, ферми прольотом 30 м виконуються із трьох відправних марок.

Підкроквяні ферми прольотом 12м за конструкцією аналогічні крокв'яним фермам.

Нижні пояси кроквяних ферм розкріплюються вертикальними в'язями і розпірками.

Спирання кроквяних ферм– шарнірне.

Ферми розраховуються як розрізні конструкції. Жорсткість вузлів враховується. Кроквяні ферми розраховуються на рівномірно розподілене навантаження від маси покриття, від сніжного навантаження, на технологічне і кранове навантаження.

Згідно з типовою документацією «Серія 1460.3-14. Сталеві конструкції покриттів типу «Молодечно» [7] навантаження враховується у вигляді еквівалентних рівномірно-розподілених навантажень.

Вузли ферм виконуються зварними (рис. 1.15). Технологічні умови виготовлення ферм виключають можливість зведення геометричних осей стрижнів в одну точку. Елементи слід розраховувати як стисло – вигнуті.

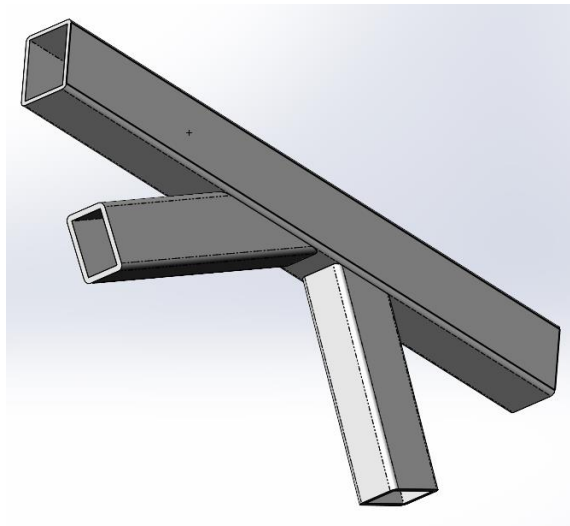


Рис.1.15 Загальний вигляд проміжного вузла ферми

Типові вузли ферми типу «Молодечно» представлені на рис. 1.16.

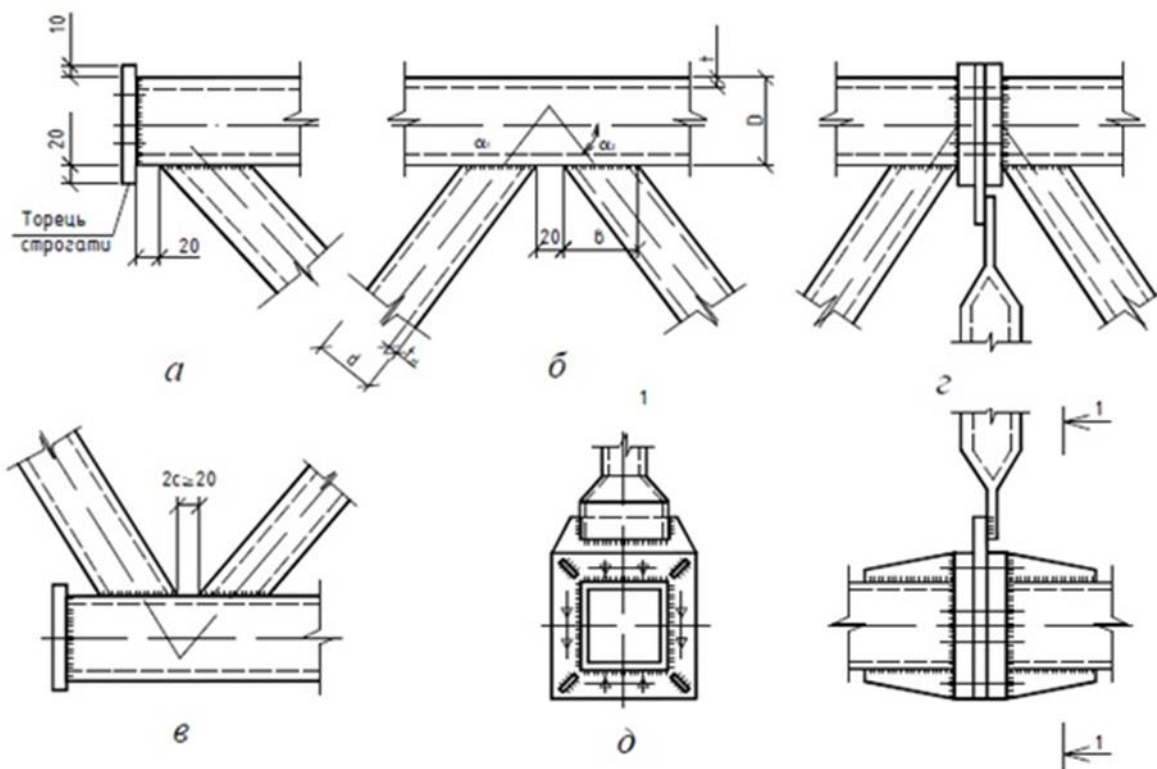


Рис. 1.16. Вузли типової ферми із замкнутих гнутих профілів: а - опорний; б - верхнього поясу; в - нижнього поясу; г, д – монтажні

При обмеженні розцентрування $e \leq 0,25h$ (рис. 1.17) у розрахунковій схемі вузли ферм приймаються шарнірними.

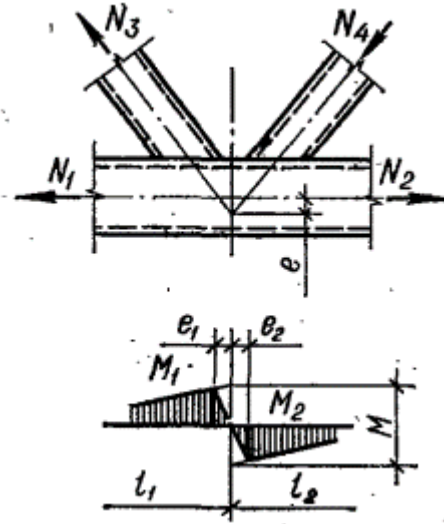


Рис. 1.17 Розподілення моментів у вузлу з розцентровкою осей

Згинаючий момент в i -му стержні вузла при наявності ексцентриситету

$$M_i = \frac{M \cdot n_i}{\sum n_i}, \quad (1.11)$$

де $M_i = \Delta N \cdot e$ - вузловий згинаючий момент;

$$\Delta N = N_1 - N_2;$$

$n_i = \frac{EI_i}{l_i}$ - приведений момент інерції i -го стержня;

$\sum n_i$ - сума погонних жорсткостей усіх стержнів вузла;

Згинаючі моменти від розподіленого навантаження поясу q :

Прольотний момент в крайній панелі

$$M_{кр} = \frac{q \cdot l^2}{10} \quad (1.12)$$

Прольотний момент в проміжних панелях

$$M_{np} = \frac{q \cdot l^2}{12} \quad (1.13)$$

Вузловий згинаючий момент

$$M_{кр} = \frac{q \cdot l^2}{18} \quad (1.14)$$

При панелях різної довжини вузловий момент приймають як середнє значення вузлових моментів.

Існують обмеження співвідношень розмірів контактуючих поверхонь з міркувань збереження місцевої стійкості елементів.

Співвідношення розмірів перерізів елементів поясу і решітки, кути між осями, мінімальна дистанція між сусідніми зварними швами є технологічними обмеженнями.

Згідно з ДБН В.2.6-198.2014 при розрахунку вузлів ферм перевіряють несучу здатність:

- стінки поясу місцях примикання елементів решітки;
- елементів решітки в перерізі примикання до поясу;
- зварних швів..

Товщину стінок стрижнів ферм не менше 3 мм. В одній фермі профілі однакових розмірів перерізу не мають відрізнятися товщиною стінок менш ніж 2 мм.

МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

Дослідження моделі виконувалося в середовищі ПК «SolidWorks» з застосуванням додатку «SolidWorks Simulation».

2.1 Побудова 3D моделі ферми типу «Молодечно»

За основу моделі прийняті креслення ферми серії 1.460.3-14 прольотом 18м [].

Викривленні елементи панелі поясу, опорного розкосу і розкосу решітки будувалися згідно з ескізом табл.2.1 (Витяг з табл. Д1 «Граничні відхили за розмірами ферм та деталей (мм)» ДСТУ Б В.2.6-74:2008 [6]).

Табл. 2.1

Геометричні розміри, вид відхилу	Граничний відхил δ , мм	Ескіз
Відхили від прямолінійності та площинності елементів ферми при їх довжині l :		
до 1000 включно	1,0	
понад 1000 до 1600 включно	1,5	
» 1600 » 2500 »	2,0	
» 2500 » 4000 »	3,0	
» 4000 » 8000 »	5,0	
» 8000 » 12000 »	8,0	

2.2 Дослідження впливу вигину елементів ферми на НДС елементів

1. Визначалися найбільш напружена по осі стиснута панель верхнього поясу, найбільш напружений стиснутий опорний розкос, а також найбільш напружений стиснутий розкос решітки в 3D моделі ферми, побудованою за п. 2.1.
2. В 3D моделі ферми, побудованою за п. 2.1 найбільш напружений стиснутий елемент верхнього поясу замінювався викривленим.

3. Після виконання статистичного дослідження розраховувався запас міцності елемента з використанням параметру «Авто». «Коефіцієнт запасу міцності (FOS) для балок» K обчислюється на основі таких елементів.
4. В 3D моделі ферми, побудованою за п. 2.1 найбільш напружений стиснутий елемент опорного розкосу замінювався викривленим.
5. Виконувався п. 3.
6. В 3D моделі ферми, побудованою за п. 2.1 найбільш напружений стиснутий елемент розкосу решітки замінювався викривленим.
7. Виконувався п. 3.
8. Проводився аналіз даних залежності мінімального коефіцієнта запасу міцності K від значення стріли прогину елемента. Використовувався показник f/L (рис.2.1).

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

3.1 Побудова моделі ферми «Молодечно» серії 1.460.3-14

3.1.1 Схема та основні розміри ферми представлені на рис. 3.1

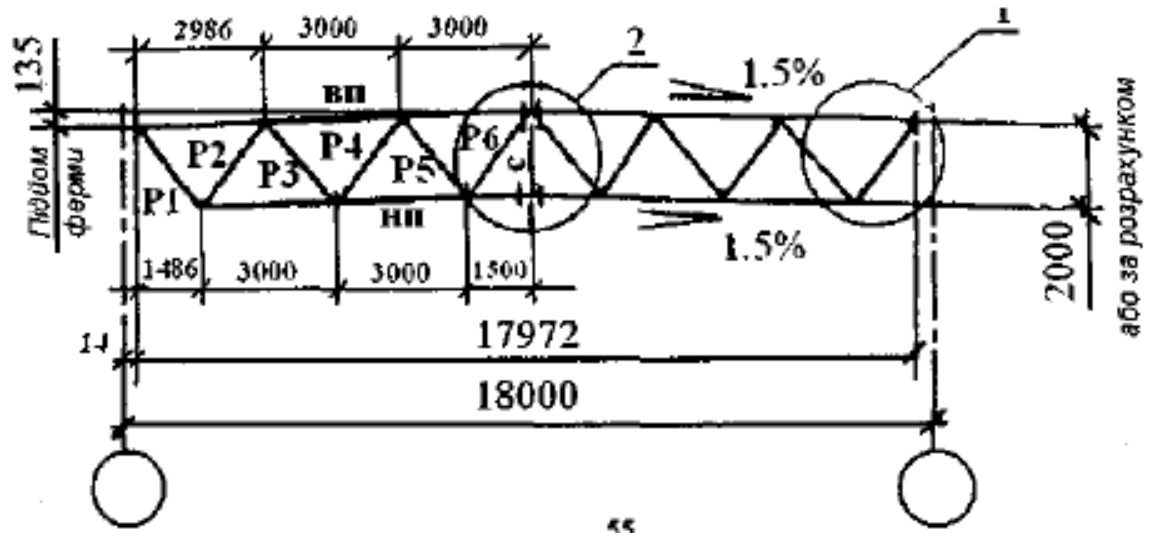


Рис. 3.1

Профілі елементів ферми представлені в табл. 3.1

Табл. 3.1

Марки ферм	Товщина стінок гнutoзварних профілів при розмірах перерізу, мм						Маса ферм, кг, не більше
	ВП	НП	P1; P2	P3-P8	P9; P10	С	
	180×140	140×140	120×120	100×100	100×100	80×80	
ФК-18-2,4	4	4	4	3	—	3	1035

3.1.2 Матеріал елементів ферми прийнято за табл. 3.2

Табл. 3.2

Найменування елементів ферм	Стандарти на прокат	Позначення сталі згідно з ГОСТ 27772	Відповідні позначення	
			Марка сталі	Стандарт
Пояси (ВП, НП) і опорні розкоси (P1, P2) при $t = 4$ мм	Профілі сталеві гнуті замкнуті зварні квадратні і прямокутні ДСТУ Б В.2.6-8 (ГОСТ 30245)	C345	09Г2С-12	ГОСТ 19281 ТУ 14-105-509
Пояси (ВП, НП) і опорні розкоси (P1, P2) при $t > 4$ мм		C345	09Г2С-12	ГОСТ 19281 ТУ 14-105-509
Середні розкоси P3 - P8 при $t > 4$ мм		C255	ВСт3сп5	ДСТУ 2651 (ГОСТ 380) ТУ 14-105-509
Середні розкоси P3 - P8 при $t = 4$ мм		C255	ВСт3сп2	ДСТУ 2651 (ГОСТ 380) ТУ 14-105-509
Середні розкоси P3 - P10 при $t = 3$ мм і стояки С		C255	ВСт3сп	ДСТУ 2651 (ГОСТ 380) ТУ 14-105-509
Фланці нижнього поясу	ГОСТ 19903	C390	14Г2АФ-15	ГОСТ 19281
Опорні ребра і фланці верхнього поясу	ГОСТ 19903	C345	09Г2С-12	ГОСТ 19281
Ребра фланців нижнього поясу	ГОСТ 19903	C345	09Г2С-6	ГОСТ 19281
Заглушки нижнього поясу, фасонки стояків	ГОСТ 19903	C245	ВСт3пс6-1	ДСТУ 2651 (ГОСТ 380)
Елементи кріплення в'язей	ДСТУ 2251 (ГОСТ 8509) ГОСТ 8510	C245	ВСт3пс6	ДСТУ 2651 (ГОСТ 380)

Проміжний вузол ферми має ексцентриситет (рис. 3.2)

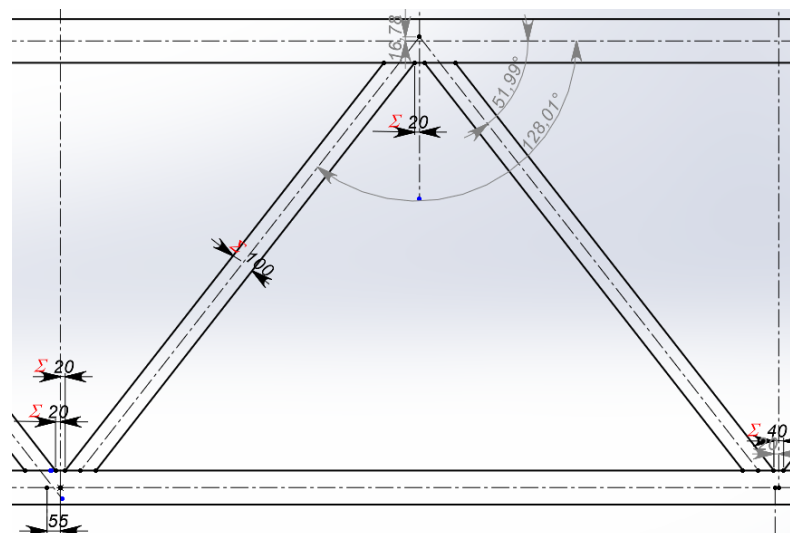


Рис. 3.2

Загальний вид ферми представлено на рис. 3.3

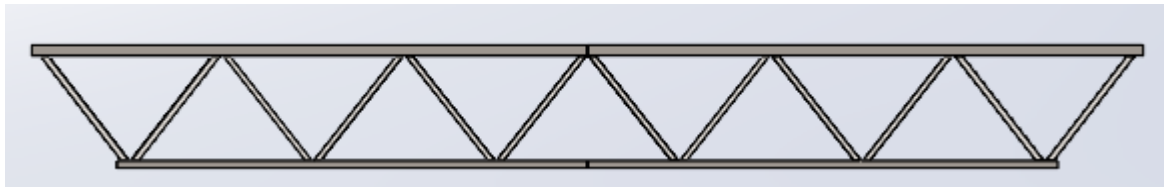


Рис. 3.3

3.2 Параметри статичного дослідження моделі без дефектів елементів

3.2.1 Властивості дослідження (рис. 3.4)

Имя исследования	Статический 1
Тип анализа	Статический
Тип сетки	Структура балок
Тип решающей программы	Авто
Влияние нагрузок на собственные частоты:	Выкл
Мягкая пружина:	Выкл
Инерционная разгрузка:	Выкл
Несовместимые параметры связи	Авто
Большие перемещения	Вкл
Вычислить силы свободных тел	Выкл

Рис. 3.4

3.2.2 Тип моделі матеріалу: пружний, лінійний, ізотропний

3.2.3 Закріплення (рис. 3.5):



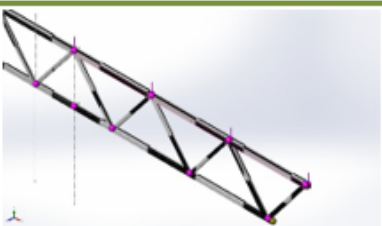
Имя крепления	Изображение крепления	Данные крепления
Справочная геометрия-2		<p>Объекты: 4 Шарнир(ы)</p> <p>Справочный: Спереди</p> <p>Тип: Использовать справочную геометрию</p> <p>Смещение: ---; ---; 0</p> <p>Вращение: ---; ---; ---</p> <p>Единицы измерения: mm; rad</p>
Неподвижный-1		<p>Объекты: 1 Шарнир(ы)</p> <p>Тип: Неподвижная (нет перемещений)</p>
Справочная геометрия-3		<p>Объекты: 1 Шарнир(ы)</p> <p>Справочный: Грань < 1 ></p> <p>Тип: Использовать справочную геометрию</p> <p>Смещение: ---; ---; 0</p> <p>Вращение: ---; ---; ---</p> <p>Единицы измерения: mm; rad</p>

Рис. 3.5

3.2.4 Навантаження:

1- власна вага, постійне;

2- корисне, 2.4тс/м, постійне (рис. 3.6).

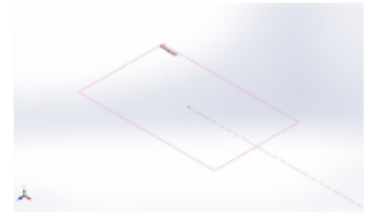
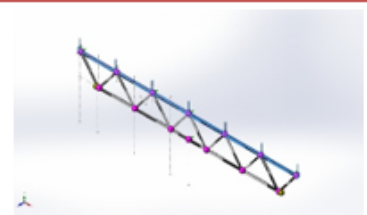
Сила тяжести-1		<p>Справочный: Сверху</p> <p>Значения: 0 0 -9,81</p> <p>Единицы измерения: m/s^2</p>
Сила-2		<p>Объекты: 2 Балка (s)</p> <p>Справочный: Грань < 1 ></p> <p>Тип: Приложить силу</p> <p>Значения: ---; ---; 24 kgf/cm</p> <p>Моменты: ---; ---; --- kgf-cm/cm</p>

Рис. 3.6

3.2.5 Інформація о сітці (рис. 3.7).

Информация о сетке

Тип сетки	Структура балок
-----------	-----------------

Информация о сетке - Детализация

Всего узлов	438
Всего элементов	402
Время для завершения сетки (hh:mm:ss):	00:00:01

Рис. 3.7

3.2.6 Результиручі сили (рис.3.8)

Силы реакции

Выбранный набор	Единицы	Сумма X	Сумма Y	Сумма Z	Результирующая
всей модели	N	0	426 564	-5,50222e-10	426 564

Моменты реакции

Выбранный набор	Единицы	Сумма X	Сумма Y	Сумма Z	Результирующая
всей модели	N.m	0	0	0	1e-33

Силы свободных тел

Выбранный набор	Единицы	Сумма X	Сумма Y	Сумма Z	Результирующая
всей модели	N	0	0	0	0

Моменты свободных тел

Выбранный набор	Единицы	Сумма X	Сумма Y	Сумма Z	Результирующая
всей модели	N.m	0	0	0	0

рис. 3.8

3.2.7 Силы балок (рис. 3.9)

Имя балки	Соединения	По оси(N)	Сдвиг1 (N)	Сдвиг2 (N)	Момент1(N.м)	Момент2(N.м)	Вращающий момент(N.м)	
Балка-70(Квадратная труба по гост 30245-94 120X120X4(1)[1])	1	- 235 03 5	- 0,072228 2	6 217,02	-5 753,84	-0,066847	-8,61555e-10	
	2	235 34 2	0,040819 8	- 5 977,99	-7 923,74	-0,0541061	8,61554e-10	
Балка-81(Квадратная труба по гост 30245-94 140X140X4(1))	1	- 6,7965 9e-10	1,58653e -07	9,07709 e-22	6,10749e-23	-2,305e-09	8,01567e-23	
	2	294 00 6	-630,596	4,41617 e-09	6,1038e-09	2 235,67	4,92214e-09	
	3	520 10 4	246,041	-	1,44957 e-08	-2,9503e-09	1 944,3	3,9972e-09
	4	462 41 1	-49,0858	-	1,48685 e-10	-1,84241e-09	2 148,67	-3,37397e-09
	5	- 520 10 4	-3,36472	1,44957 e-08	-1,83122e-08	-2 127,21	-3,9972e-09	
Балка-109(Квадратная труба по гост 30245-94 120X120X4(1)[2])	1	232 69 6	0,013129 8	- 1 701,93	2 890,19	-0,0222969	-5,93832e-10	
	2	- 232 39 3	- 0,008666 79	1 939,15	1 155	0,00516212	5,93836e-10	
Балка-115(Отсесть/Удлинить2[4])	1	- 46 703, 6	0,022510 3	543,323	-246,008	-0,0101923	-1,40936e-09	
	2	46 860, 1	0,019607	-418,513	-841,965	-0,0394453	1,40937e-09	
Балка-118(Отсесть/Удлинить3[2])	1	- 135 69 7	0,018819 1	600,014	-578,419	-0,0181417	-1,44053e-09	
	2	135 85 3	0,005320 53	-476,106	-634,66	-0,00709238	1,44052e-09	
Балка-120(Отсесть/Удлинить2[5])	1	45 262, 6	0,003018 87	41,0165	353,349	-0,0260069	1,29074e-09	
	2	- 45 099, 9	0,003669 21	88,9771	-296,813	0,0122399	-1,29072e-09	
Балка-131(Квадратная труба по гост 30245-94 100X100X3(1)[4])	1	134 43 8	-213,854	1,06124 e-08	2,46657e-09	-760,712	2,03095e-09	
	2	- 134 27 4	745,474	- 1,54874 e-08	-1,48596e-08	-370,962	-2,13135e-09	

Балка-139(Прямоугольная труба гост 30245-2003 180X140X4(1))	1	- 149 28 9	27 562,8	2,15329 e-10	-7,56e-10	3 352,86	-3,53275e- 10
	2	- 149 28 9	- 38 819,5	2,15424 e-10	-1,53409e- 10	19 100,2	-3,53275e- 10
	3	491 92 1	- 35 199,3	3,92046 e-09	-4,14661e- 09	-13 935,9	-7,16623e- 10
	4	- 491 92 1	- 35 212,1	- 2,02274 e-09	-6,83813e- 09	13 954,9	7,24198e- 10

Рис. 3.9

3.2.8 Розподілення осевих напружень в фермі (рис. 3.10)

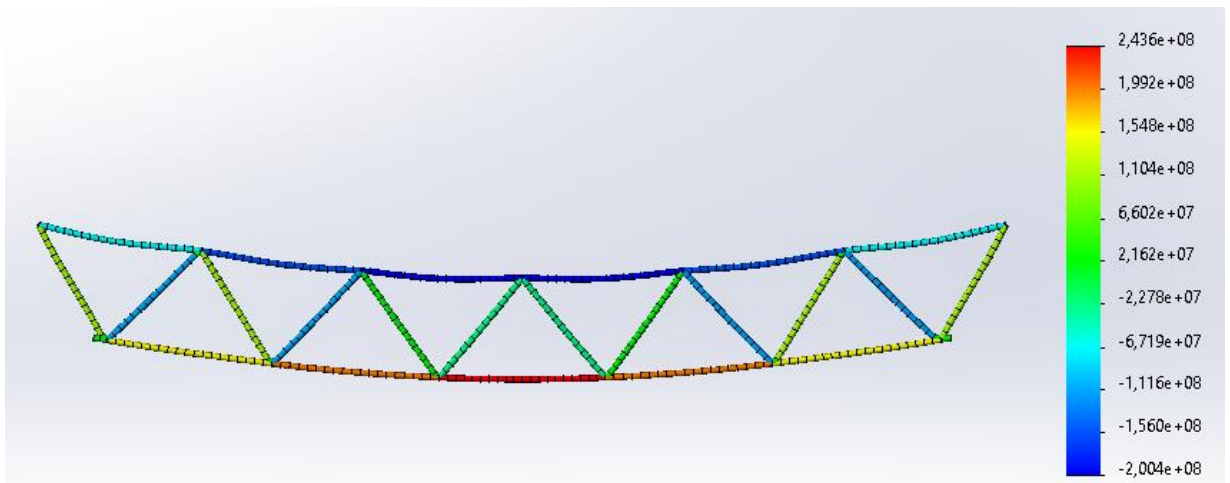


Рис. 3.10

3.2.9 Розподілення напружень за верхньою границею осевого напруження і напруження вигину в фермі (рис. 3.11)

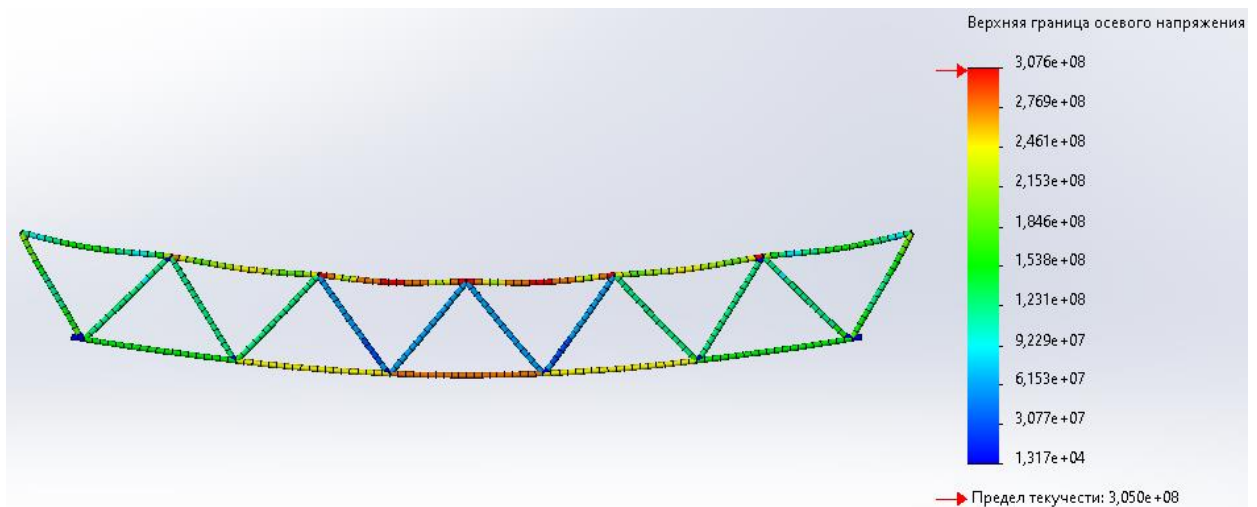


Рис. 3.11

3.2.10 Розподілення коефіцієнту запасу міцності за FOS в верхньому поясі (рис. 3.12):

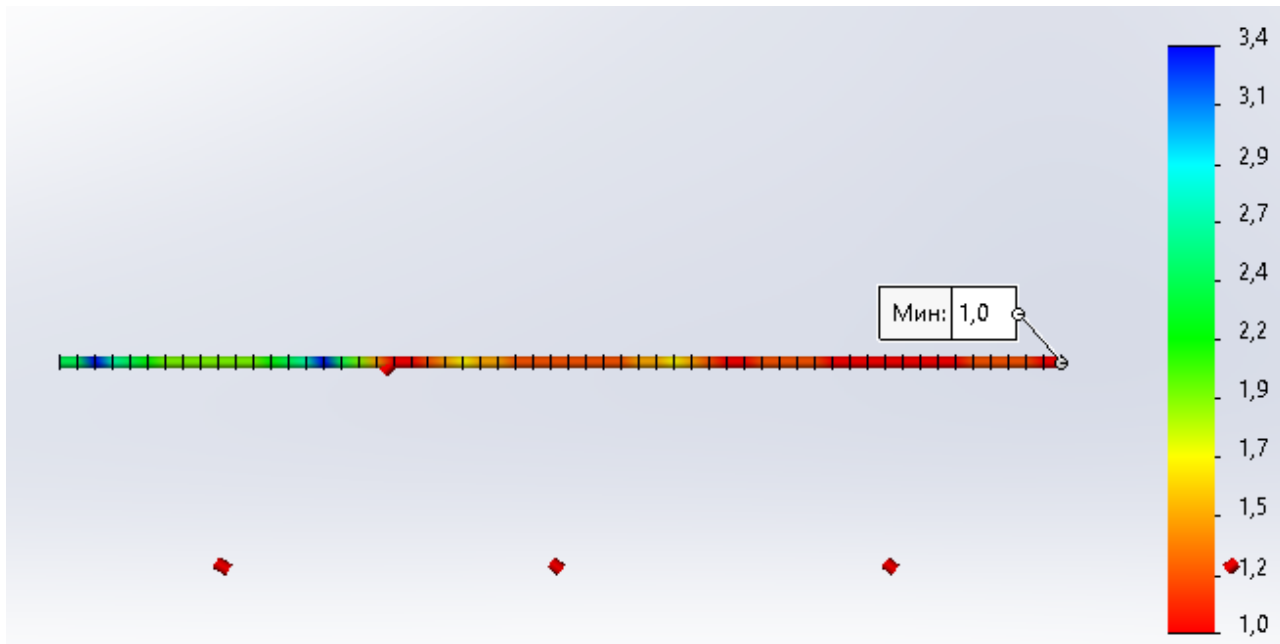


Рис. 3.12

3.2.11 Розподілення коефіцієнту запасу міцності за FOS в опорному розкосі (рис. 3.13):

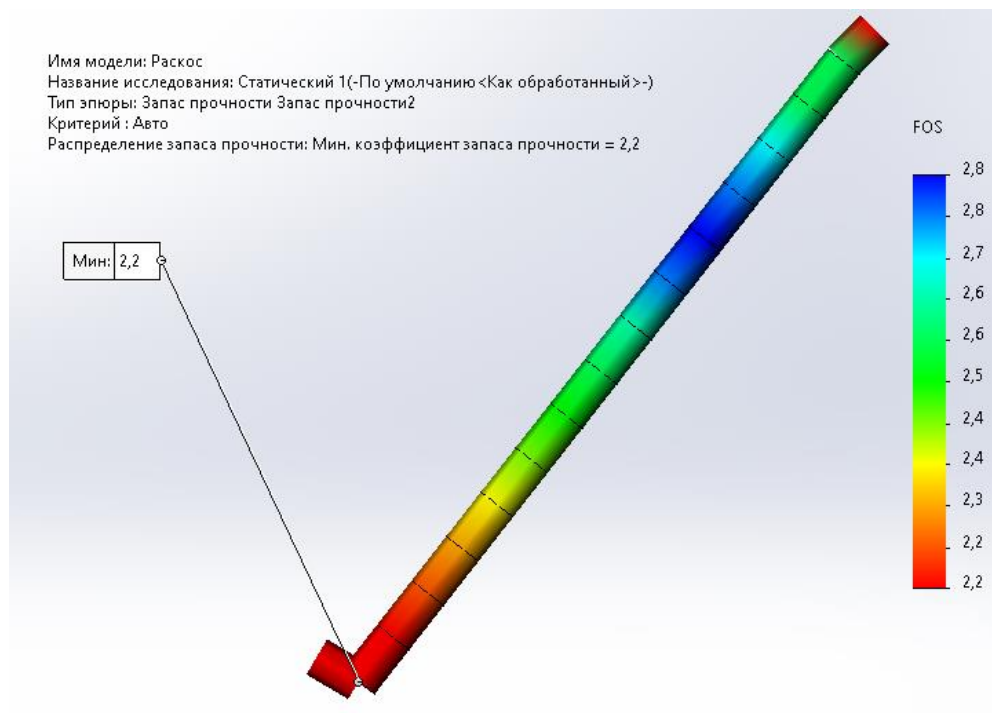


Рис. 3.13

3.2.12 Розподілення коефіцієнту запасу міцності за FOS в розкосі решітки (рис. 3.14):

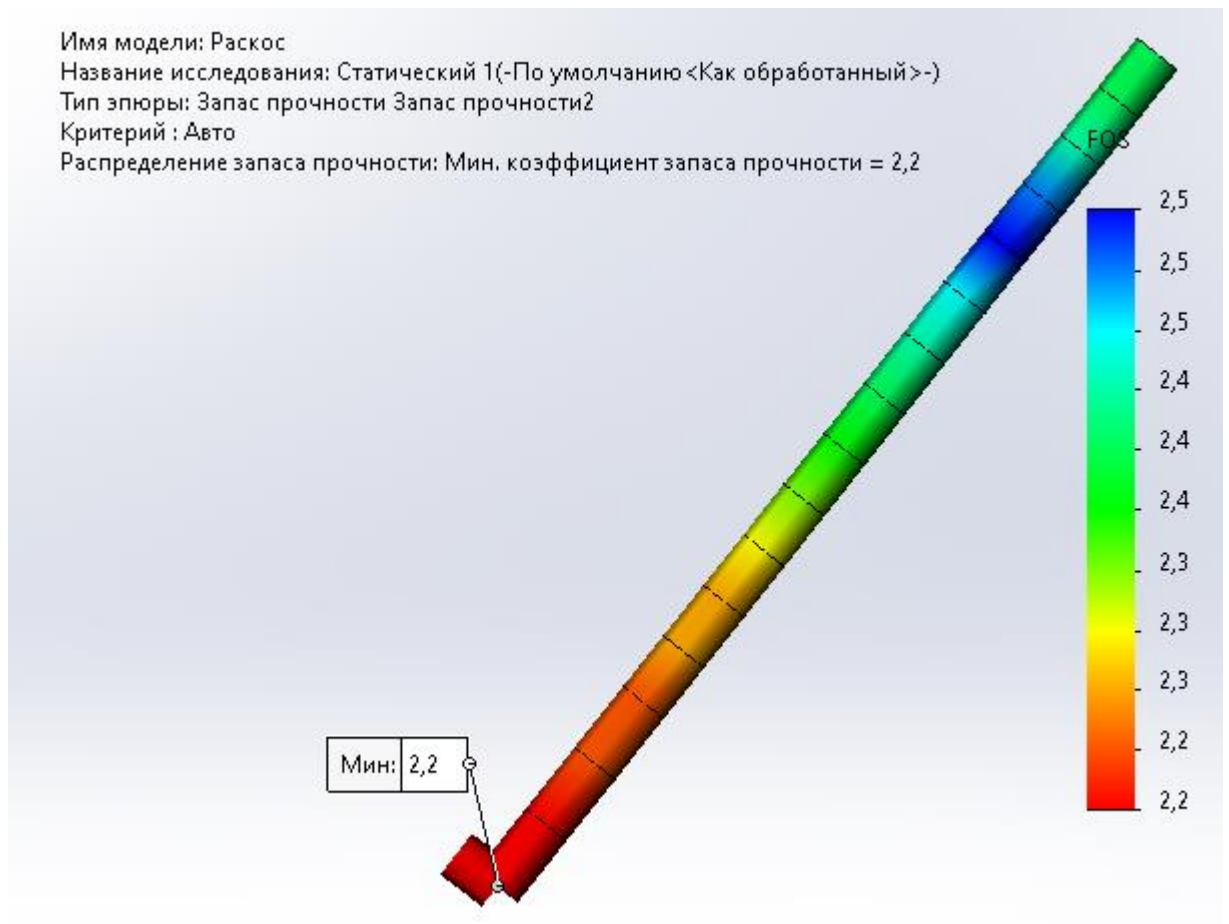


Рис. 3.14

3.3 Результаты дослідження ферми з викривленням панелі верхнього поясу

Дані дослідження представлені на графіку рис. 3.15

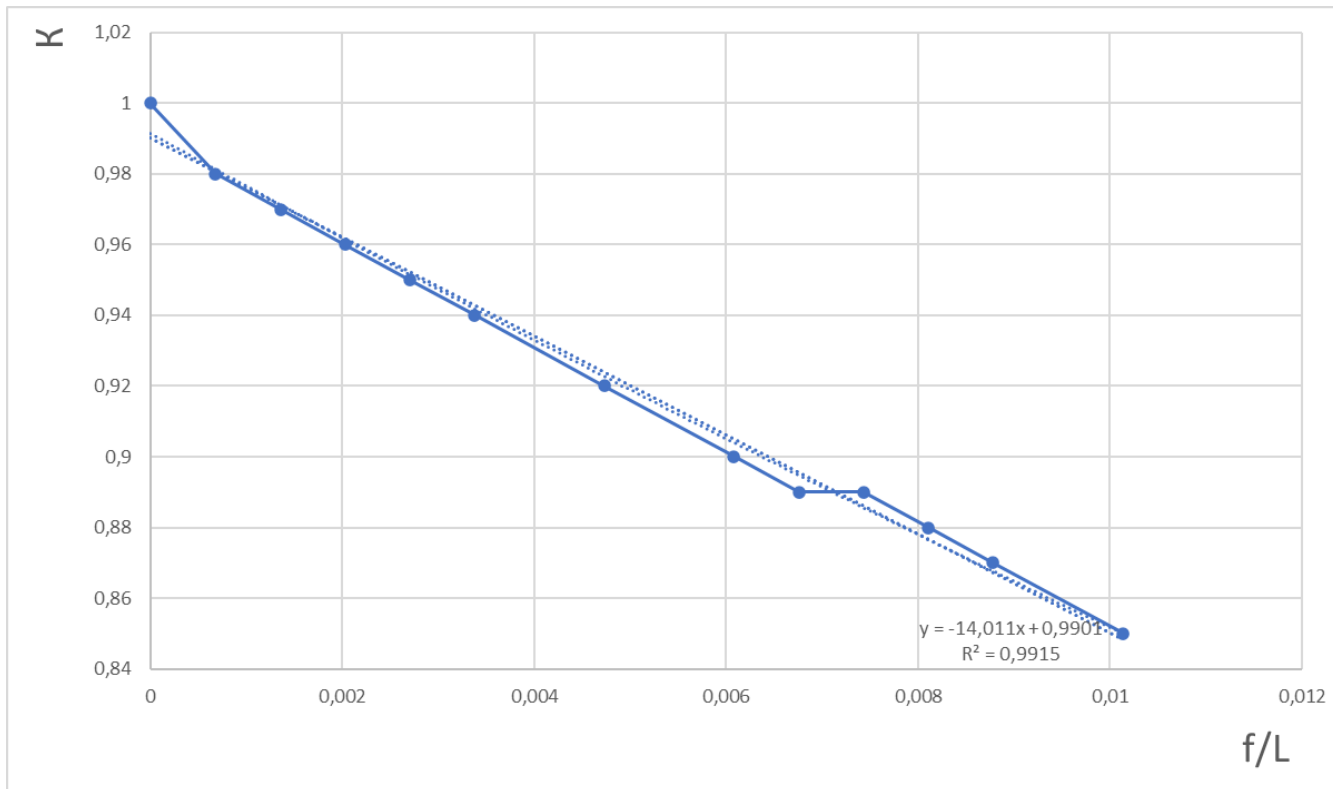


Рис. 3.15

3.4 Результати дослідження ферми з викривленням опорного розкосу
Дані дослідження представлені на графіку рис. 3.16

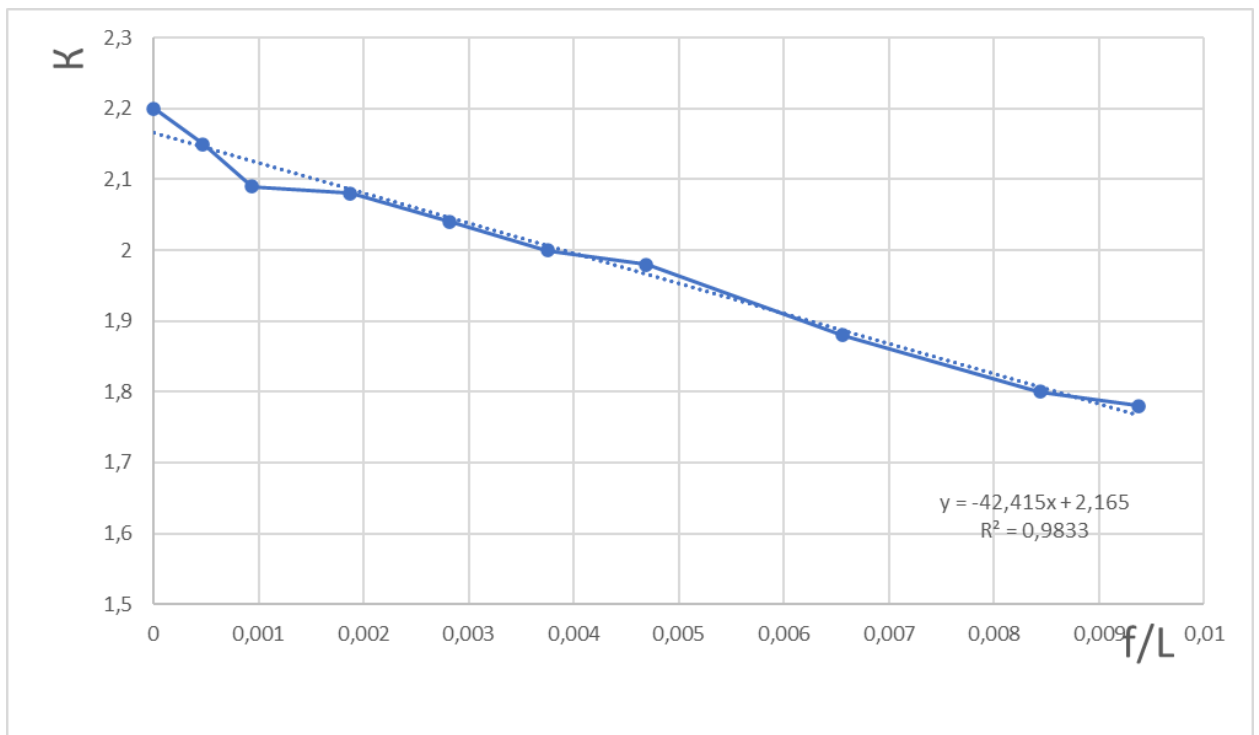


Рис. 3.16

3.5 Результати дослідження ферми з викривленням розкосу решітки

Дані дослідження представлені на графіку рис. 3.17

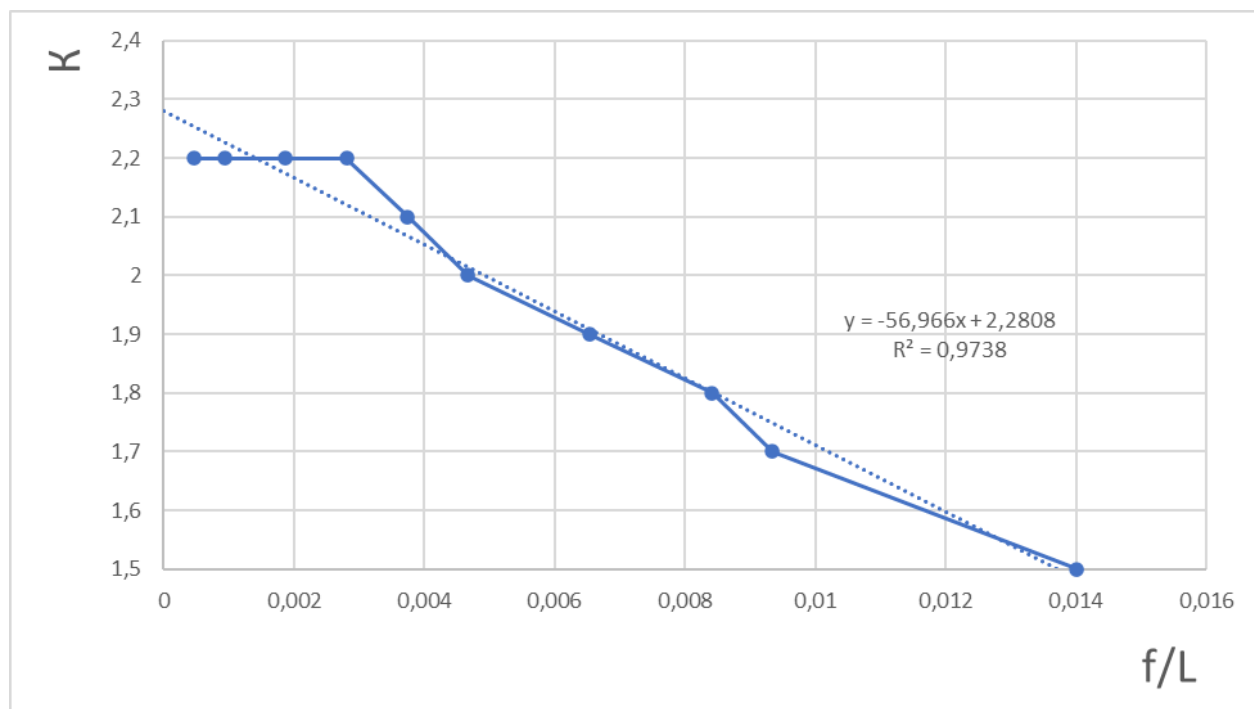


Рис. 3.17

3.6 Дослідження впливу викривлення елементів ферми на жорсткість

На рис. 3.18 ... 3.21 представлені дані переміщень елементів ферми без викривлених елементів і з наявністю викривлених елементів.

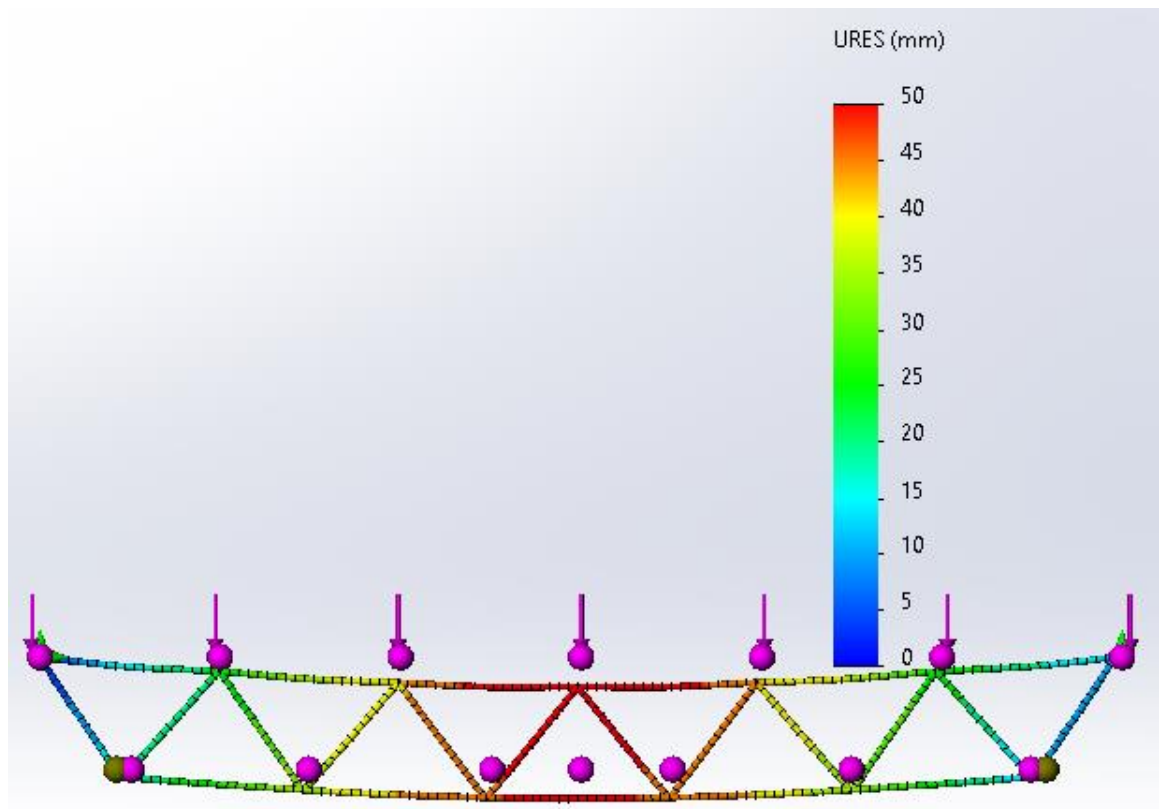


Рис. 3.18 Ферма без викривлених елементів.

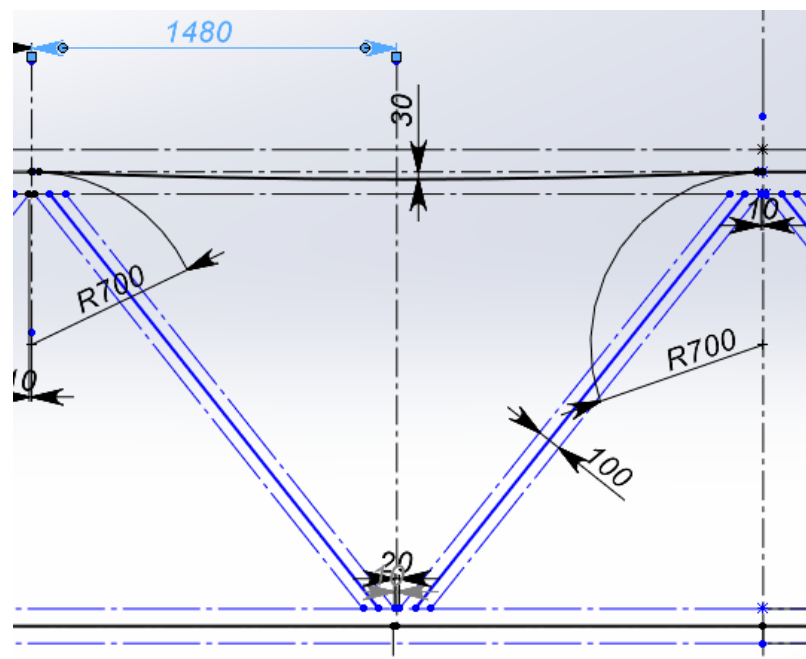


Рис. 3.19,а) Фрагмент ескізу ферми з викривленою панеллю верхнього поясу

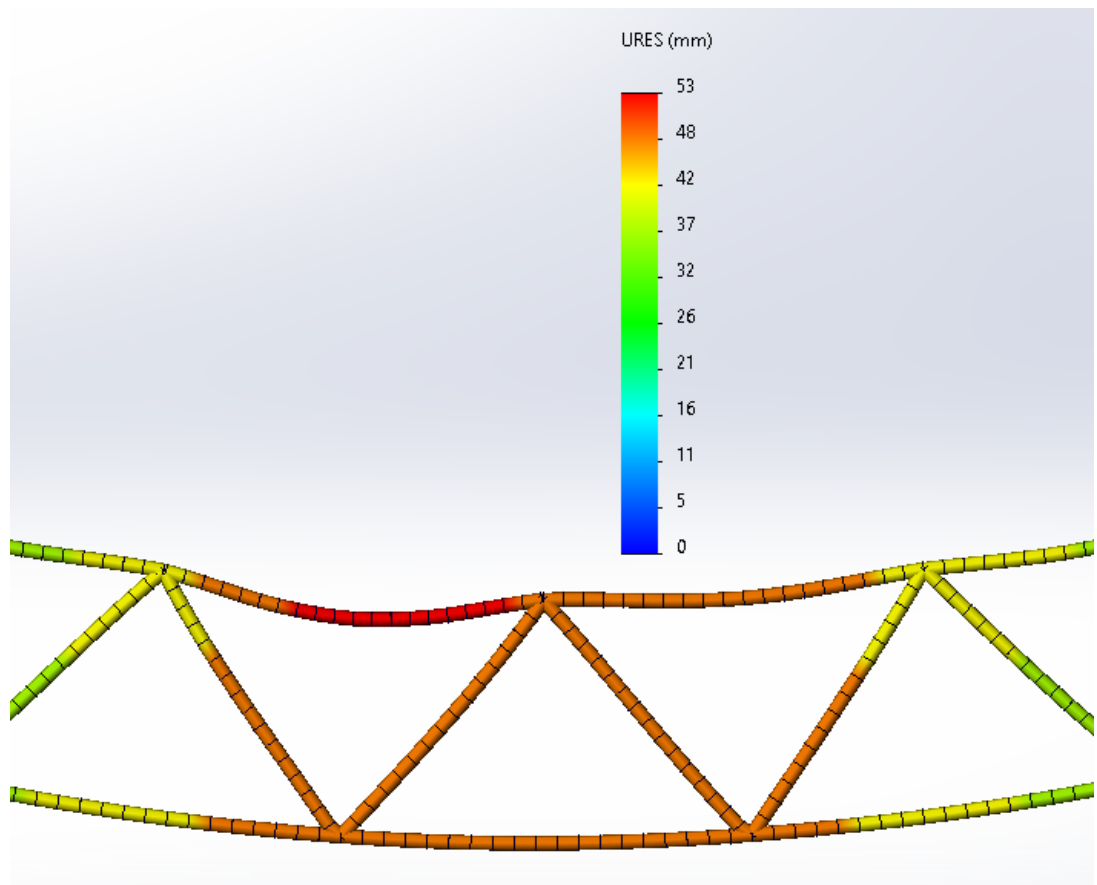


Рис. 3.19, б) Ферма з викривленою панеллю верхнього поясу $f/L=0,01$.

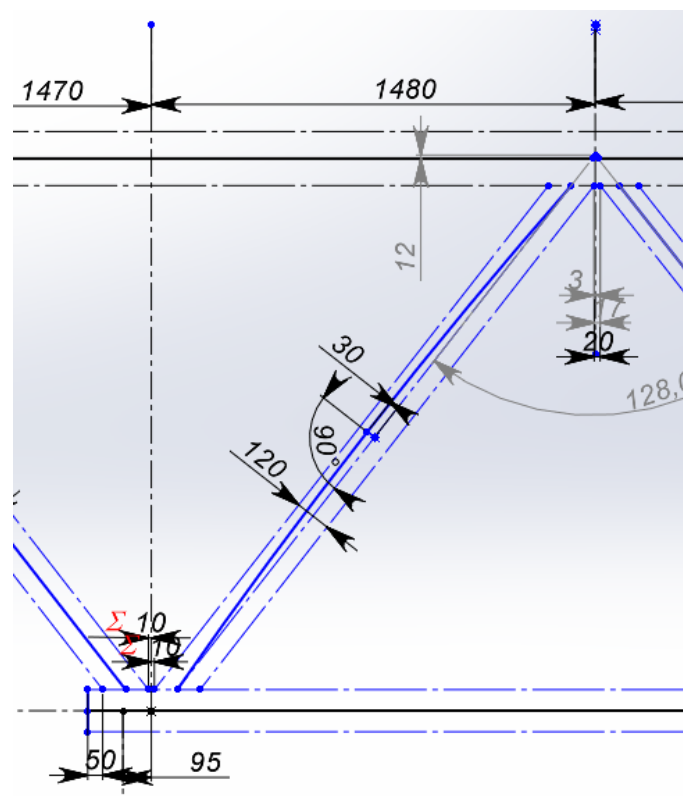


Рис. 3.20 ,а) Фрагмент ескізу ферми з викривленим опорним розкосом

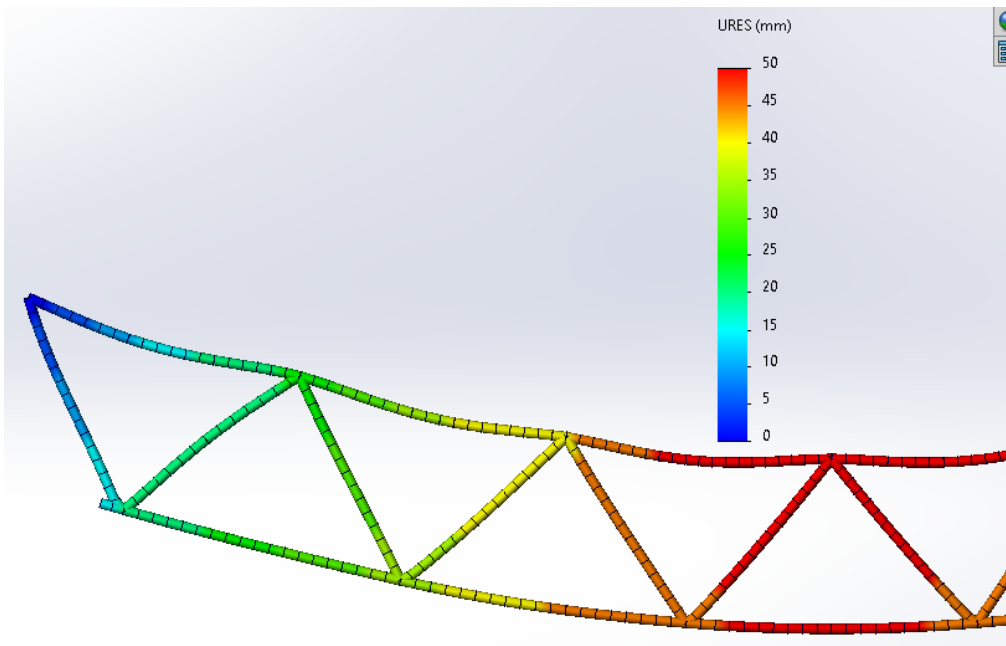


Рис. 3.20, б) Ферма з викривленим опорним розкосом $f/L=0,01$.

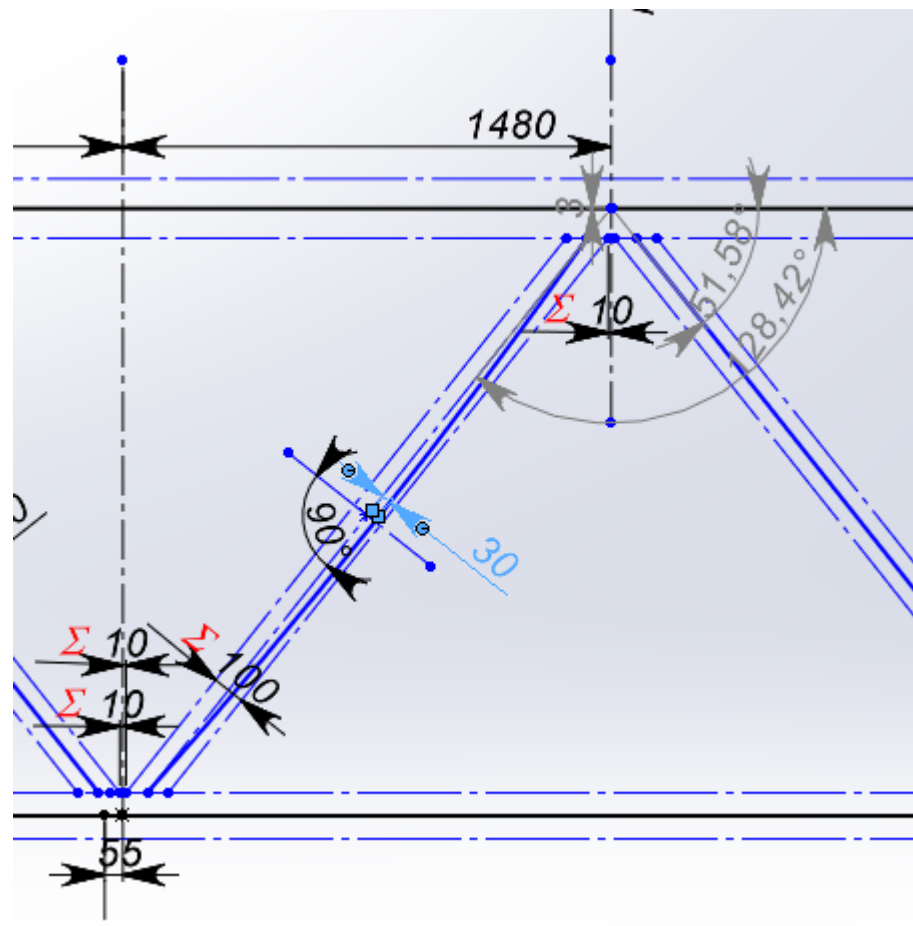


Рис. 3.21 ,а) Фрагмент ескізу ферми з викривленим розкосом решітки

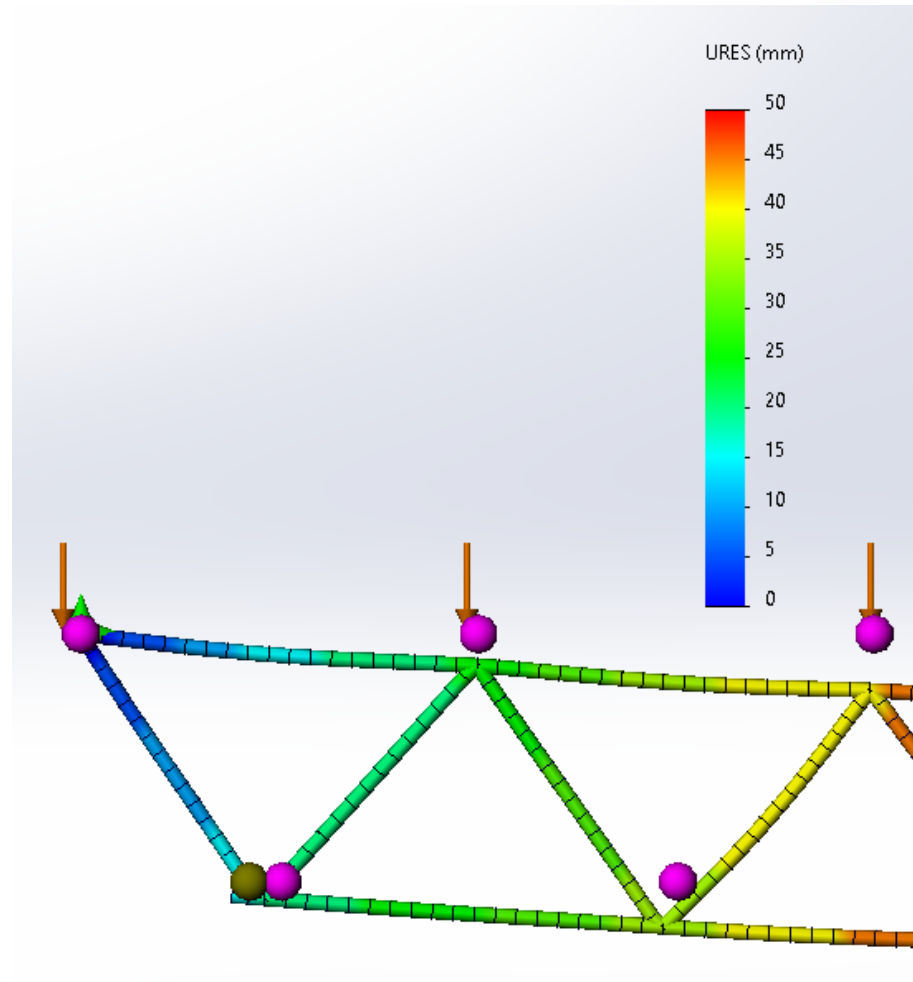


Рис. 3.21, б) Ферма з викривленим розкосом решітки $f/L=0,01$.

3.3 Аналіз даних дослідження

3.3.1 Викривлення найбільш стиснутої панелі верхнього поясу істотно впливає на НДС елемента ферми. З ростом стріли прогину f/L від 0 до 0,01 коефіцієнт запасу міцності елемента K знижується від 1,0 до 0,84. Апроксимація залежності описується рівнянням

$$K = -14,011 f/L + 0,9901 \quad (3.1)$$

$$R^2 = 0,9915$$

3.3.2 Викривлення найбільш стиснутого опорного розкосу істотно впливає на НДС елемента ферми. З ростом стріли прогину f/L від 0 до 0,01 коефіцієнт запасу міцності елемента K знижується від 2,2 до 1,5. Апроксимація залежності описується рівнянням

$$K = -42,415 f/L + 2,165 \quad (3.2)$$

$$R^2 = 0,9833$$

3.3.3 Викривлення найбільш стиснутого розкосу решітки істотно впливає на НДС елемента ферми. З ростом стріли прогину f/L від 0 до 0,01 коефіцієнт запасу міцності елемента K знижується від 2,2 до 1,8. Апроксимація залежності описується рівнянням

$$K = -56,966 f/L + 2,2808 \quad (3.3)$$

$$R^2 = 0,9738$$

3.3.4 Збільшення стріли прогину f/L стиснутих елементів ферми від 0 до 0,014 призводить до відносного зниження коефіцієнту міцності K_0 на 20 – 25% (рис. 3.22).

3.3.5 Збільшення стріли прогину f/L стиснутих елементів ферми від 0 до 0,01 не впливає на жорсткість конструкції.

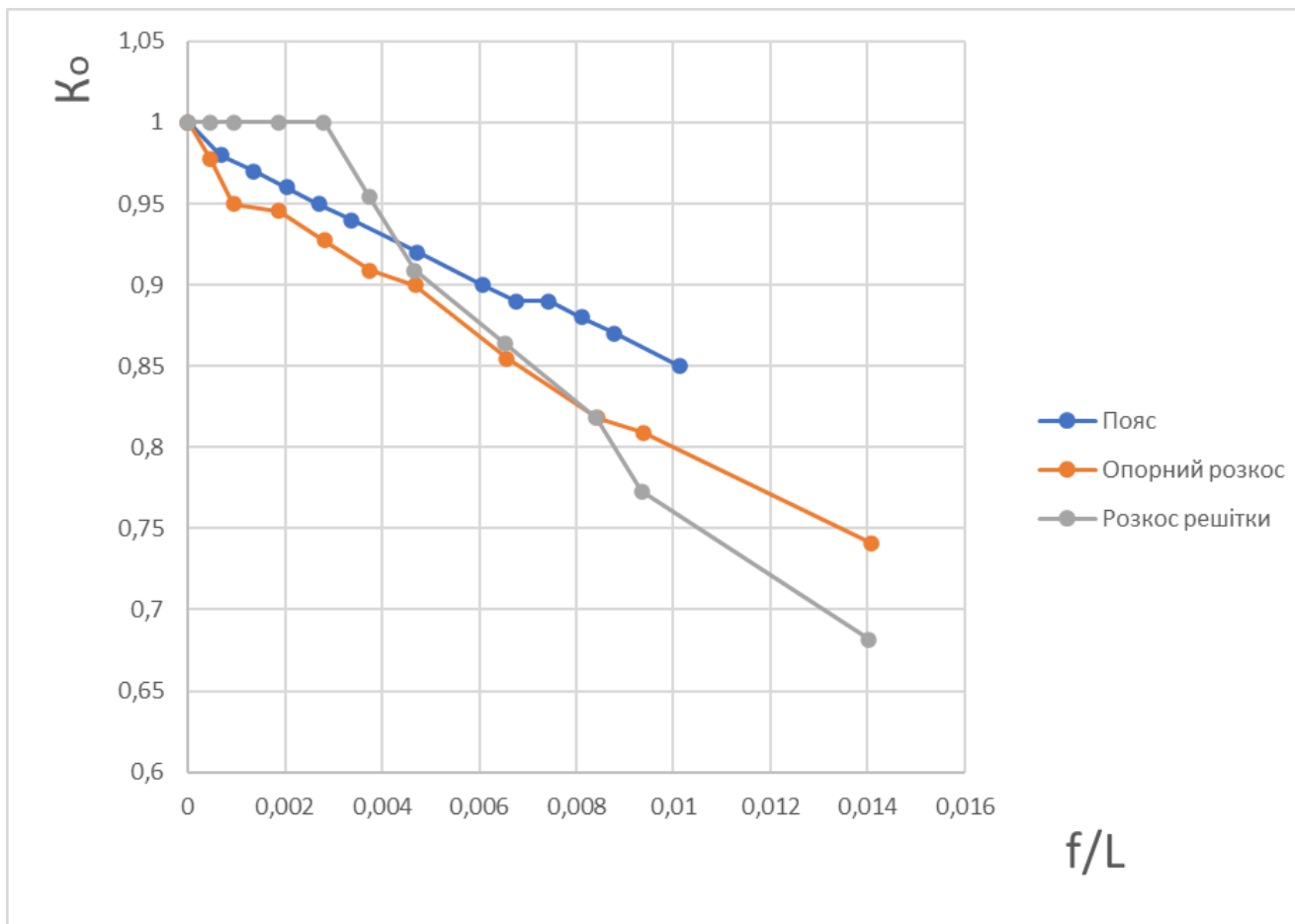


Рис. 3.22

ВИСНОВКИ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ДОСЛІДЖЕНЬ

1. Викривлення стиснутих елементів ферм типу «Молодечно» істотно впливає на їх напружено – деформований стан.
2. Отримані дані дозволяють оцінити зниження коефіцієнту запасу міцності стиснутих елементів ферми при їх викривленні в залежності від типу елемента за лінійними рівняннями.
3. Розроблена методика дослідження впливу викривлення елементів на несучу здатність ферми типу «Молодечно» надає можливість оцінки напружено – деформованого стану ферм з дефектами викривлення елементів.

CONCLUSIONS RESULTS OF RESEARCH

1. The distortion of the compressed elements of the Molodechno-type trusses significantly affects their stressed-deformed state.

2. The obtained data make it possible to estimate the decrease in the safety factor of compressed truss elements during their distortion depending on the type of element according to linear equations.

3. The developed methodology for studying the impact of element distortion on the load-bearing capacity of the Molodechno-type truss provides an opportunity to assess the stress-deformed state of trusses with element distortion defects.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДБН В.1.2-2:2006 Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Навантаження і впливи. Норми проектування -К.: Сталь, 2006. - 59 с.
2. ДСТУ Б В.12-3:2006. Прогини і переміщення. Вимоги проектування Мінбудархітектури України. - К.: Сталь, 2006. - 10 с.
3. ДБН В.2.6-198:2014. Сталеві конструкції. Норми проектування - К.: Укрархбудінформ, 2014. - 199 с.
4. ДБН В.1.2-14:2009. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ - К.: Мінрегіонбуд України, 2009. - 37 с.
5. ДСТУ Б А.2.4-43:2009 Правила виконання проектної та робочої документації металевих конструкцій - К.: Мінрегіонбуд України, 2009. - 37с.
6. ДСТУ Б В.2.6-74:2008. Ферми сталеві кроквяні з гнutosварних профілів прямокутного перерізу. Технічні умови. Київ. Мінрегіонбуд України 2009. – 33с
7. Серия 1.460.3-14 Стальные конструкции покрытий производственных зданий пролетами 18, 24 и 30 м с применением замкнутых гнutosварных профилей прямоугольного сечения типа Молодечно. Чертежи КМ. ЦИТП Госстроя СССР (СІТР, Gosstroy (USSR) 1988 г.). 135с.
8. Бененсон І.І., Кінцевий Є.М. Пошкодження металоконструкцій кранових мостів в експлуатації та способи їх усунення. Тр.ВНДІПТМАШ, -М. 1967, N01 (74), с.36-88.
9. Бірюлев В.В., Чернов І.М. Сталеві ферми з коробчастими перерізами стрижнів, зварених із прокатних куточків. / В. вузів, Сер. Буд-во і архіт. 1973 №4.

10. Клименко Ф.Є., Барабаш В.М. Металеві конструкції: Підр. для вузів, - Львів.: Світ, 1994.-277с.
11. Кой Бун Тхорн, Соколов С.А. Дослідження місцевого вигину в стрижнях фермових кранових конструкцій. // Молодіжна наукова конференція (у рамках двадцять шостого Тижня науки СПбГТУ). Матеріали доповідей. Ч. I. – СПб.: СПбДТУ, 1998. – С. 147 – 148.
12. Кой Бун Тхорн, Соколов С.А. Дослідження місцевого вигину стрижнів ферм, що виникає внаслідок їх викривлення. // XXVII Тиждень науки СПбГТУ (7-12 Грудня 1998). Ч. II: Матеріали міжвузівської наукової конференції (механіко-машинобудівний факультет та факультет технології та дослідження матеріалів). - СПб.: В-во СПбГТУ, 1999. - 3. 83 - 84.
13. Металеві конструкції. Матеріали. Основи розрахунку з'єднання [Текст] : навч. посібник для студ. спец. "Промислове та цивільне будівництво" / В. О. Пермяков [та ін] ; Київський держ. технічний ун-т будівництва і архітектури. - К. : [б.в.], 1996. - 204 с.
14. Металеві конструкції: Загальний курс: Підручник для вищих навчальних закладів / Під заг. ред. О.О. Нілова та О.В.Шимановського- К.: Сталь, 2010 - 869 с.
15. Новіков В.І., Ковтуненко В.А. Безфасоночні вузли з примиканням двох трубчастих елементів// Автоматичне зварювання.-1968.-№2.
16. Новіков В.І., Ковтуненко В.А., Шумицький О.І. Прикріплення трубчастих елементів решітки до вузлових фасонки // Автоматичне зварювання. - 1959. - № 4 (73). - С.3-13.
17. Новіков В.І., Ковтуненко В.А., Шумицький О.І. Прикріплення елементів трубчастого перерізу безпосередньо друг до друга // Автоматична зварювання.-1959.-№ 9(78).- с. 45-49.
18. "Оптимізація ферм з труб прямокутного перерізу за критерієм мінімуму маси", А.М. Діденко, "Механіка будівель і споруд", 2021 р., № 4.

19. Пічугін С.Ф. Нові конструктивні системи легких комбінованих ферм / С.Ф. Пічугін, В.П. Чичулін, К.В.Чичуліна // 36. Наук. Пр.: Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди - Вип.31. - Рівне: ПУВГП, 2015. - С. 486 -491.
- 20.Підвищення довговічності металевих конструкцій промислових будівель / А. І. Кікін, А. А. Васильєв, Б. Н. Кошутін та ін; Під ред. А.І.Кікіна. - 2-ге вид., перераб. та дод. -М.: Будвидав, 1984. -301с.
21. Проектування металевих конструкцій. Спец. курс. /В.В.Бірюлев, І.І.Кошин, І.І.Крилов, А.В.Сильвестров. - Л.: Будвидав, 1990. -432с.
- 22."Розрахунок ферм з труб прямокутного перерізу на статичну та динамічну міцність", В.М. Бондаренко, "Сучасні проблеми механіки", 2022 р., № 3.
- 23.Хечумов Р.А., Кеплер Х., Прокоп'єв В.І. Застосування методу скінченних елементів до розрахунку конструкцій. -М. Вид-во АСВ, 1994. -353с.
24. Шейнфельд Н.М., Кисельов Б.Є., Євінгов В.А., Смородинський І.М. Дослідження міцність вузлів трубчастих конструкції баштового крана// Будівельні та дорожні машини.-1966.-№12.