

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

БАСАРА МИКОЛА АНДРІЙОВИЧ

УДК 624.014.078.45

ДИСЕРТАЦІЯ

**ПОШКОДЖЕННЯ І РУЙНУВАННЯ К-ПОДІБНИХ ВУЗЛІВ
ПЛОСКИХ ЗВАРНИХ ФЕРМ**

131 – прикладна механіка

13 – механічна інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

підпис

М.А. Басара

ініціали та прізвище дисертанта

Науковий керівник: Ковальчук Ярослав Олексійович, кандидат технічних
наук, доцент

Тернопіль - 2021

АНОТАЦІЯ

Басара М.А. «Пошкодження і руйнування К-подібних вузлів плоских зварних ферм». – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 131 “Прикладна механіка” в галузі знань 13 “Механічна інженерія” . - Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. Тернопіль, 2021.

Дана робота стосується актуальної науково-технічної проблеми пошкодження і руйнування К-подібних вузлів плоских зварних ферм. Саме К-подібні вузли є найпоширенішими для усіх фермових конструкцій. Зварні металеві ферми впродовж експлуатації зазнають комплексного впливу робочих навантажень, вітру, снігу, зміни температури, сейсміки, аварійних ситуацій тощо. Внаслідок цього в елементах конструкцій та в місцях їх з'єднань відбувається формування пошкоджень, які призводять до втрати тримальної здатності й руйнування ферм. Особливо актуальним є попередження руйнування ферм за умов циклічних навантажень, оскільки їх довготривала дія викликає поступове накопичення пошкоджень, появу тріщин та їх поширення аж до руйнування при незмінних експлуатаційних навантаженнях.

У вступі обґрунтовано актуальність дослідження, наведено зв'язок роботи з науково-дослідною тематикою, поставлено мету та визначено завдання дослідження, об'єкт та предмет дослідження, наведено перелік методів дослідження, що застосовувались для досягнення мети дисертаційної роботи. Сформульовано наукову новизну, практичне значення отриманих результатів та особистий творчий внесок здобувача. Подано відомості щодо апробації та опублікування результатів дослідження.

У першому розділі зроблено огляд праць за темою дисертації, проаналізовано наявні конструкції К-подібних вузлів виявлено особливості їх пошкодження й руйнування за різних умов. Виявлено, що серед усіх

досліджень питома вага натурних експериментів досить низька, а достовірність результатів, отриманих комп'ютерним моделюючим експериментом, не підтверджена верифікацією. Переважна частина натурних досліджень вузлів виконана як для окремих елементів без їх поєднання в повномасштабних фермах. За результатами аналізу результатів досліджень, виконаних іншими авторами, сформульовано задачі для власних досліджень.

У другому розділі запропоновано комплексний методичний підхід до дослідження плоских зварних ферм із К-подібними вузлами, який поєднує натурний, напівнатурний і комп'ютерний моделюючий експерименти (КМЕ) і дає можливість верифікувати отримані результати й забезпечити вищу достовірність отриманих показників по відношенню до фактичних експлуатаційних значень.

У третьому розділі описано результати досліджень, які дали можливість оцінити ступінь пошкодження і умови руйнування вузлів зварних ферм із безфасонковим виконанням при дії на конструкцію статичних силових впливів. Натурний силовий експеримент здійснено за спареною схемою навантажування ферм статичними зосередженими зусиллями до центрального вузла на верхньому поясі. Отримано діаграму прогину нижнього пояса досліджуваної конструкції в межах пружної деформації. Побудовано діаграму локального деформування. Виявлено, що найслабшим місцем в досліджуваних фермах є середня частина верхнього поясу в місці прикладання навантажень. Там відбувається локальне пошкодження у вигляді протискання верхньої стінки і випучування двох бокових стінок профільної труби, яка формує Т-подібний вузол. Саме ці пошкодження зумовлюють настання граничного стану конструкції аж до її руйнування. Виконано комп'ютерний моделюючий експеримент для повномасштабної ферми. Побудовано діаграму деформування нижнього поясу та діаграму локального деформування в місці зминання верхньої стінки. Отримано діаграми розподілу напружень по верхній, боковій та нижній стінці верхнього поясу. Виконано верифікацію

отриманих результатів для ділянки пружного деформування по нижньому поясі, порівнявши їх з аналогічними показниками для натурального експерименту. Отримано їх співпадання на рівні 87,5...92,6%. Запропоновано варіант зміцнення центрального вузла накладанням двох спарених кутників. Виконано моделювання зварної повномасштабної ферми з підсиленням центральним верхнім вузлом у вигляді двох спарених кутників. Побудовано діаграму локального деформування в місці підсилення верхньої стінки. Суміщено отримані діаграми локального деформування для варіантів без підсилення та з підсиленням. Виявлено, що для варіанту з підсиленням міцність в місці протискання верхньої стінки збільшилася на 7,6 %. Отримано діаграми розподілу напружень по верхній, боковій та нижній стінці верхнього поясу. Визначено деформації вздовж верхнього поясу зварної ферми при різних навантаженнях.

Натурні експериментальні дослідження виконано для масштабного зразка зварної ферми. Силовий експеримент виконано на серврогідрравлічному випробувальному комплексі СТМ-100. За результатами дослідження виявлено, що пошкодження ферми відбуваються за рахунок пластичної деформації зминанням у верхній частині верхнього пояса в місці прикладання навантаження, як і для повномасштабної ферми. При цьому К-подібні вузли залишаються не пошкодженими і не визначають тримкість ферми в цілому. Отримано діаграму прогинів нижнього поясу.

Методом скінченних елементів промодельовано поведінку фізичної моделі (масштабного зразка) при дії статичних навантажень. Отримано діаграму локального деформування для місця прикладання навантаження на верхньому поясові. Побудовано діаграму розподілу деформацій по верхній стінці верхнього поясу та діаграму прогинів на нижньому поясі зварної ферми. Виконано верифікацію отриманих результатів для ділянки пружного деформування нижнього поясу. Рівень співпадання становить 93,3...96,4%.

У четвертому розділі виконано серію досліджень для зварних ферм із різноманітними конструктивними виконаннями вузлів при дії циклічних навантажень. Ці варіанти мають різні типи вузлів (безфасонкові, зі стандартними фасонками, з оригінальними фасонками, фасонками власної конструкції).

Виконано силовий експеримент на серврогідравлічному випробувальному комплексі СТМ-100 для масштабного зразка із безфасонковим виконанням вузлів . Циклічний силовий вплив здійснено на центральний вузол верхнього поясу. За результатами цього дослідження виявлено, що в К-подібних вузлах накопичуються пошкодження, які зумовлюють появу й поширення втомної тріщини аж до руйнування конструкції після певного напрацювання. Отримано кількісні показники циклів до зародження втомної тріщини та до моменту руйнування ферми.

Комп'ютерний моделюючий експеримент виконано для масштабного зразка зварної ферми з безфасонковим виконанням вузлів. Побудовано діаграму втомного руйнування. Отримано задовільне співпадання кількості циклів до моменту зародження втомної тріщини і до моменту руйнування конструкції в порівнянні з результатами напівнатурного експерименту на рівні 91,7...92,5%.

Виконано комп'ютерний моделюючий експеримент для повномасштабних ферм із різноманітним конструктивним виконанням вузлів.

Побудовано криві втомного руйнування для кожного конструктивного виконання К-подібних вузлів. Виявлено, що стандартні фасонки в К-подібних вузлах підвищують ресурс роботи зварної ферми при циклічних навантаженнях на 6...8,3% в порівнянні з безфасонковими конструкціями, а використання оригінальних фасонок дає можливість підвищити напрацювання ферми до настання граничного стану на 11...18,7% .

Наукова новизна одержаних результатів:

1) вперше отримано графічну залежність для визначення напруження плоскої зварної ферми з різноманітним виконанням К-подібних вузлів до моменту руйнування конструкції за умов циклічних навантажень;

2) вперше отримано чисельне співвідношення між напруженням плоских зварних ферм до моменту руйнування конструкції за умов циклічних навантажень для К-подібних вузлів з різними конструкціями фасонки в порівнянні з напруженням аналогічних ферм з безфасонковими К-подібними вузлами;

3) вперше отримано оптимальні геометричні параметри для оригінальної власної конструкції фасонки К-подібного вузла;

4) отримали подальший розвиток комплексні дослідження плоских зварних ферм, які поєднують натурний, напівнатурний і комп'ютерний моделюючий експерименти і дають можливість верифікувати отримані результати й забезпечити вищу достовірність отриманих показників в порівнянні з фактичними експлуатаційними даними.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що сформульовано рекомендації для проектування К-подібних вузлів плоских зварних ферм для роботи в умовах циклічних навантажень, які дають можливість підвищити експлуатаційний ресурс конструкції на 11...18,7%.

Ключові слова: зварна ферма, стиковий вузол, втомна тріщина, фасонковий вузол, тримальна міцність, довговічність зварної ферми, верхній пояс, нижній пояс, втомне пошкодження, руйнування К-подібних вузлів.

SUMMARY

Basara M.A. «Fracture and damage of K-shaped nodes of flat welded trusses».- Qualification scientific work with the manuscript copyright.

Ph.D thesis on a specialty 131 "Apply mechanics" in the field of knowledge 13 "Mechanical Engineering". – Ternopil Ivan Puluj National Technical University. Ternopil, 2021.

This paper presents the current scientific and technical problem of fracture and damage of K-shaped nodes of flat welded trusses. K-shaped nodes are the most common among all truss structures. Welded metal trusses during operation are exposed to the complex effects of workloads, wind, snow, temperature changes, seismic, emergencies and more. As a result, damage is formed in the structural elements and in their joints, which can lead to loss of bearing capacity and fracture of trusses. It is especially important to prevent fracture under cyclic loads, as their long-term action can cause the accumulation of damage, initiate cracks and their propagation till fracture at constant operating loads.

The introduction substantiates the relevance of the study, links the work with the research topic, sets the purpose and objectives of the study, object and subject of research, lists the research methods used to achieve the goal of the dissertation. The scientific novelty, practical significance of the obtained results and personal creative contribution of the applicant are formulated. Information on approbation and publication of research results is given.

In the first section the review of works on a dissertation theme was made, the available designs of K-shaped nodes are analyzed, features of their damage and fracture under various conditions are revealed. It was found that among all studies, the proportion of full-scale tests is quite low, and the reliability of the results obtained by computer simulation test is not confirmed by verification. The vast majority of full-scale tests of nodes performed for individual elements without their combination in full-scale trusses. Based on the results of the analysis of the results of research performed by other authors, the tasks for own research are formulated.

The second section proposes a comprehensive methodological approach to the study of flat welded trusses with K-shaped nodes, which combines full-scale, semi-scale and computer simulation tests (CST) and allows you to verify the results and ensure higher reliability of the actual indexes in relation to actual operating values .

The third section describes the results of research, which made it possible to assess the degree of damage and conditions of fracture of welded trusses with butt joints design under static loads. The full-scale test was performed according to the paired scheme of the trusses under static concentrated forces to the central node on the upper chord. The deflection diagram of the lower chord of the investigated structure within the elastic strain obtained. It was found that the weakest part in the researched trusses is in the middle of the upper chord at the place of application of loads. There is local damage in the form of squeezing the upper wall and bulging of the two side walls of the profile pipe, which forms a T-shaped node. It is these damage that determine the onset of the ultimate state of the structure until its fracture. A computer simulation test was performed for a full-scale truss. The diagram of deformation of the lower chord and the diagram of local deformation in the place of folding of the upper wall are constructed. The diagrams of stress distribution on the upper, side and lower wall of the upper chord obtained. Verification of the obtained results for the area of elastic deformation in the lower chord, comparing them with similar indicators for the full-scale test was performed. Their coincidence was obtained at the level of 87,5...92,6%. A variant of reinforcing the central node by superimposing two paired angles is proposed. The simulation of a welded full-scale truss with a reinforced central upper node in the form of two paired angles was performed. The diagram of local deformation in the place of reinforcement of the upper wall is constructed. The obtained diagrams of local deformation for variants without reinforcement and with reinforcement are combined. It was found that for the variant with reinforcement, the ultimate strength at the part of compression of the upper chord increased by 7.6%. The diagrams of stress distribution on the upper, side and lower wall of the upper chord obtained.

Deformations along the upper chord of the welded truss at different loads are determined.

Semi-scale test was performed for a semi-scale sample of a welded truss. The force test was performed on the STM-100 servo-hydraulic test complex. According to the results of the research, it was found that the damage to the truss occurs due to plastic deformation by creasing in the upper part of the upper chord at the place of application of the load, as for a full-scale truss. The K-shaped nodes remain undamaged and do not determine the strength of the truss as a whole. The diagram of deflections of the lower chord obtained.

The behavior of a physical model (semi-scale sample) under the action of static loads is modeled by the finite element method. A diagram of local deformation for the place of application of the load on the upper chord obtained. The diagram of distribution of deformations on the upper wall of the upper chord and the diagram of deflections on the lower chord of the welded truss are constructed. Verification of the obtained results for the area of elastic deformation of the lower chord was performed. The level of coincidence is 93.3... 96.4%.

In the fourth section, a series of researches for welded trusses with various designs of nodes under the action of cyclic loads was performed. These options have different types of node (butt joints, with standard gussets, with original gussets, gussets of own design).

A force experiment was performed on the STM-100 servohydraulic test complex for a semi-scale sample with butt joints design . Cyclic force was exerted on the central node of the upper chord. According to the results of this research, it was found that in the K-shaped nodes accumulate damage that causes the initiation and spread of fatigue cracks until fracture of the structure after a certain time. Quantitative indicators of cycles to the fatigue crack initiation and to the moment of fracture of the truss obtained.

A computer simulation test was performed for a semi-scale sample of a welded truss with butt joints. The diagram of fatigue failure was constructed. The

acceptable coincidence of the number of cycles to the moment of initiation of fatigue crack and to the moment of fracture of the structure in comparison to the results of the semi-scale test at the level of 91.7... 92.5% was obtained.

A computer simulation test was performed for full-scale trusses with a variety of nodes designs.

Fatigue failure curves are constructed for each design of K-shaped nodes. It was found that standard gussets in K-shaped nodes increase the service life of the welded truss at cyclic loads by 6... 8.3% compared to butt joint structures, and the use of original gussets allows to increase the operating time of the truss to the limit state by 11... 18.7 %.

Scientific novelty of the obtained results.

1) For the first time a graphical dependence was obtained to determine the operating time of a flat welded truss with different K-shaped nodes until the fracture of the structure under cyclic loads;

2) For the first time the numerical ratio between the operating time of flat welded trusses to the moment of fracture of the structure under cyclic loads for K-shaped nodes with different designs of gussets in comparison with the operating time of similar trusses with K-shaped butt joints was obtained;

3) For the first time the optimal geometric parameters for the original and own design of the K-shaped nodes are obtained;

4) Comprehensive researches of flat welded trusses have been further developed, which combine full-scale, semi-scale and computer modeling tests and allow to verify the obtained results and ensure higher reliability of the obtained indicators in comparison to the actual operational values.

The practical significance of the obtained results is that the recommendations for the design of K-shaped nodes of flat welded trusses for operation under cyclic loads was formulated, which make it possible to increase the service life of the structure by 11... 18.7%.

Key words: welded truss, butt joint, fatigue crack, gusset node, bearing strength, durability of the welded truss, upper chord, lower chord, fatigue damage, fracture of K-shaped nodes.

Список публікацій здобувача за темою дисертації

1. Ковальчук Я.О, Басара М.А, Шингера Н. Я. «Конструювання вузлів з використання ПК ANSYS», Вісник ТНТУ. — Тернопіль 2017. — Том 85. — № 1. — С. 47–52. ISSN: 1727-7108
2. Basara M. Fatigue failure of gusset plates nodes of welded truss (Втомна пошкоджуваність фасонкових вузлів зварної ферми)/ Mykola Basara, Yaroslav Kovalchuk, Natalia Shynhera // Scientific Journal of TNTU. — Ternopil : TNTU, 2019. — Vol 96. — No 4. — P. 39–44. ISSN:2522-4433.
3. Basara M. Durability of a welded truss under cyclic loads / Mykola Basara, Yaroslav Kovalchuk, Natalia Shynhera // Innovative solutions in modern science. 5(41). ТК Meganom LLC. New York. p. 147-158 2020 .
4. Ковальчук Я.О, Басара М.А, Шингера Н. Я. «К-подібний вузол зварної ферми» патент №124552. Україна, МПК E04C 3/02 (2006.01); E04B 1/24 (2006.01); опубл.10.04.2018, Бюл. №7.
5. Ковальчук Я.О, Басара М.А, Шингера Н. Я. «К-подібний вузол зварної ферми» патент № 131723. Україна, МПК E04B 1/24 (2006.01); F16S 3/00; E04C 3/02 (2006.01), опубл. 25.01.2019, Бюл. №2.
6. Ковальчук Я.О, Басара М.А, Шингера Н. Я. «Вузол зварної ферми для циклічних навантажень» патент № 141363. Україна, МПК E04B 1/24 (2006.01), опубл. 10.04.2020, Бюл. №7.
7. Ковальчук Я.О, Басара М.А, Шингера Н. Я. «К-подібний фасонковий вузол зварної ферми» патент №147231 Україна, МПК E04C 3/02; E04B 1/24 (2006.01), опубл. 22.04.2021, Бюл №16.
8. Басара М.А. «Вплив конструктивних особливостей вузлів на тримкість зварних ферм» *X Всеукраїнська студентська науково-технічна*

конференція „Природничі та гуманітарні науки. Актуальні питання“, 25-26 квітня 2017 р. Тернопіль, С.229 -230.

9. Басара М.А. «Деформування нижнього поясу прямокутної зварної ферми». *Міжнародна науково-технічна конференція молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“* 16-17 листопада 2017 р. Тернопіль, С.15.

10. Басара М.А. «Статична міцність вузлів зварних ферм». *Міжнародна науково-технічна конференція „Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій”* 22-24 травня 2018р. Тернопіль, С. 27.

11. Басара М.А. «Вплив конструкції вузлів на розподіл напружень вздовж нижнього поясу зварних ферм» *Міжнародна науково-технічна конференція молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“* 28-29 листопада 2018р. Тернопіль, С.16.

12. Басара М.А. «Деформування нижнього поясу зварної ферми із фасонковими вузлами» *II Міжнародна студентська науково - технічна конференція «Природничі та гуманітарні науки. актуальні питання»,* 25-26 квітня 2019 р. Тернопіль, С.154.

13. Басара М.А. Довговічність к-подібних вузлів зварних ферм/ М. А. Басара, Я. О. Ковальчук // *Праці VI Міжнародної науково-технічної конференції „Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи його діагностування і прогнозування“,* 24-27 вересня 2019 р. — Т. : ТНТУ, 2019. — С. 143–144. — (Оцінювання залишкового ресурсу елементів конструкцій).

14. Басара М.А, Зінкевич О.П «Деформування нижнього поясу зварної ферми із підсиленням центральним вузлом» *VIII Міжнародна науково-технічна конференція молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“* 27-28 листопада 2019р. Тернопіль, Том 1. С.15.

15. Басара М.А. «Деформування верхнього поясу фізичної моделі зварної ферми» *IX Міжнародна науково-технічна конференція молодих учених*

та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“ 25-26 листопада 2020 р. Тернопіль, С.25.

	Стор.
ВСТУП	17
Розділ 1 СУЧАСНИЙ СТАН ДОСЛІДЖЕНЬ ПЛОСКИХ ЗВАРНИХ ФЕРМ	22
1.1 Загальний опис зварних ферм із К-подібними вузлами, їх конструктивні особливості та експлуатаційні вимоги.....	22
1.2 Конструкційні рішення К-подібних вузлів зварних ферм.....	26
1.3 Особливості пошкодження К-подібних вузлів та ферм в цілому....	32
1.4 Класичні підходи до розрахунку міцності зварних з'єднань у вузлах ферм	35
1.5 Використання методів скінченно- елементного аналізу для оцінювання пошкоджуваності зварних вузлів.....	37
1.6 Аналіз відомих результатів досліджень і постановка задач дисертації	45
1.7 Висновки за розділом 1	46
Розділ 2 МЕТОДИЧНІ АСПЕКТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ПОШКОДЖЕННЯ І РУЙНУВАННЯ ВУЗЛІВ ЗВАРНИХ ФЕРМ ПРИ НАВАНТАЖУВАННІ.....	48
2.1 Вибір конструкції повномасштабної ферми для дослідження, схеми її базування і навантаження	48
2.2 Методика натурного експериментального дослідження зварної ферми.....	50
2.3 Методика напівнатурного дослідження зварної ферми	52
2.4 Методика комп'ютерного моделюючого експерименту для дослідження вузлів зварних ферм.....	58
2.5 Структурна схема методики власних досліджень.....	63
2.6 Висновки за розділом 2	64

Розділ 3	ПОШКОДЖЕННЯ ВУЗЛІВ ПРИ ДІЇ СТАТИЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ	65
3.1	Механічні властивості суцільного матеріалу для виготовлення зварних ферм	65
3.2	Механічні властивості матеріалів зі зварними швами.....	70
3.3	Натурні дослідження поведінки безфасонкової зварної ферми при навантажуванні	72
3.4	Моделювання пошкоджуваності натурної безфасонкової зварної ферми комп'ютерним моделюючим експериментом	74
3.4.1	Деформування нижнього пояса ферми	74
3.4.2	Деформування верхнього пояса ферми	78
3.4.3	Підсилення ділянки прикладання навантажень на верхньому поясі ферми.....	83
3.5	Дослідження пошкодження і руйнування масштабного зразка зварної ферми напівнатурним експериментом.....	91
3.6	Дослідження пошкодження масштабного зразка зварної ферми комп'ютерним моделюючим експериментом.....	93
3.7	Висновки за розділом 3	99
Розділ 4	ПОШКОДЖЕННЯ ВУЗЛІВ ПРИ ДІЇ ЦИКЛІЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ	101
4.1	Дослідження масштабного зразка зварної ферми	101
4.2	Дослідження К-подібних безфасонкових вузлів повномасштабної зварної ферми	105
4.3	Дослідження натурної зварної ферми з фасонками у вигляді надставок	108
4.4	Дослідження повномасштабної зварної ферми з класичними фасонковими вузлами	111
4.5	Дослідження зварних ферм з фасонковими вузлами оригінальних	

конструкцій.....	114
4.5.1 Дослідження зварної ферми із фасонкою, в якій подовжена нижня частина.....	114
4.5.2 Дослідження зварної ферми з фасонковими вузлами власної конструкції.....	117
4.6 Порівняння результатів втомної довговічності вузлів зварних ферм	126
4.7 Рекомендації до використання результатів досліджень.....	128
4.8 Висновки за розділом 4.....	129
Загальні висновки.....	131
Список використаних джерел.....	132
ДОДАТОК	143

ВСТУП

Зварні металеві фермові конструкції впродовж експлуатації зазнають впливу різноманітних факторів (робочі навантаження, вітер, сніг, зміна температури, сейсмічні впливи, аварійні ситуації тощо). Внаслідок впливу цих чинників в елементах таких конструкцій та в місцях їх з'єднань відбувається формування пошкоджень, які можуть призвести до втрати тримальної здатності й руйнування ферм. Рівень пошкодження елементів ферм залежить від їх конструктивних і технологічних особливостей, а також експлуатаційних чинників. Особливо актуальним є попередження такого руйнування за умов циклічних навантажень, оскільки їх довготривала дія може викликати накопичення пошкоджень, появу тріщин та їх поширення аж до руйнування без зміни параметрів навантажування. Тому вже при проєктуванні зварної ферми потрібно враховувати параметри, які визначають тримальну здатність та довговічність, а саме залишкові напруження, концентрацію напружень, дефекти та неоднорідність матеріалу. Важливо знати місця концентрації напружень в конструкції, оскільки саме там буде відбуватися зародження втомних тріщин. Зазвичай для зварних ферм такими місцями є вузли, найпоширенішими з них є К-подібні виконання.

Комплексні фактори явища впливу на пошкодження і руйнування вузлів не враховують в повному обсязі загальноприйняті методи проєктних інженерних розрахунків зварних ферм. Акцент робиться на ідеалізовану розрахункову схему. Такий підхід дає низький ступінь співпадання проєктних показників з результатами експлуатації реальних ферм. Для досягнення високої надійності при експлуатації ферм закладають значні запаси міцності, що зумовлює збільшення їх матеріаломісткості і вартості.

Сучасний розвиток комп'ютерної техніки й прикладного програмного забезпечення, а також методики комп'ютерного моделюючого експерименту дозволяють враховувати комплексний вплив великої кількості чинників для

оцінювання пошкоджуваності й руйнування елементів зварних ферм. Таким чином досягається зменшення матеріаломісткості й вартості ферми при забезпеченні необхідної її тривкості й довговічності експлуатації.

Актуальність теми. Область застосування зварних ферм досить широка. Однак найбільшого поширення вони набули в покриттях громадських та виробничих будівель, металоконструкцій мостів, підймальних кранів, опор ліній електропередач, підвісних конвеєрів тощо. За результатами аналізу виявлено, що пошкодження і руйнування зварних ферм впродовж експлуатації відбувається у вузлах. Однією з найпоширеніших конструкцій вузлів є К-подібні вузли. У зв'язку із широким використанням зварних ферм із К-подібними вузлами, їх високою матеріаломісткістю та вартістю, складною конструкцією, наявністю технологічних дефектів зварних з'єднань, які комплексно врахувати за класичними інженерними методами проектування неможливо, розв'язання наукового завдання, яке полягає у виявленні особливостей пошкодження та руйнування К-подібних вузлів зварних ферм при дії статичних та циклічних навантажень є актуальним на сьогоднішній день.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Роботу виконано у Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя в рамках Державної Системи забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів згідно «Загальних принципів забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд» (ДБН В.1.2-14:2018).

Особистий внесок автора

Основу дисертаційної роботи складають результати, які отримані автором самостійно. В друкованих працях, написаних у співавторстві, автору належить методика дослідження методом скінченних елементів і результати досліджень, отримані комп'ютерним моделюючим експериментом, їх верифікація, аналіз і узагальнення.

Мета дослідження – виявлення умов пошкодження й руйнування у вузлах плоских зварних ферм при дії експлуатаційних навантажень до досягнення конструкцією граничного стану.

Для досягнення мети дослідження необхідно вирішити такі завдання:

- 1) вибрати конструкції зварних ферм та схеми їх навантажень;
- 2) розробити методики експериментальних досліджень ферм;
- 3) виявити особливості пошкодження й руйнування вузлів ферм за різних умов;
- 4) сформулювати рекомендації для визначення довговічності зварних ферм із К-подібними вузлами як на етапі їх проектування, так і впродовж експлуатації.

Об’єкт дослідження – втомне пошкодження вузлів зварних ферм.

Предмет дослідження – К-подібні вузли плоских зварних ферм.

Методи дослідження: натурний та напівнатурний силові експерименти, комп’ютерно-моделюючий експеримент за допомогою прикладного програмного комплексу ANSYS Workbench 17.1.

Наукова новизна одержаних результатів роботи:

– вперше отримано залежність для визначення напрацювання плоскої зварної ферми з різноманітним виконанням К-подібних вузлів до моменту руйнування конструкції за умов циклічних навантажень;

– вперше отримано чисельне співвідношення між напрацюванням плоских зварних ферм до моменту руйнування конструкції за умов циклічних навантажень для К-подібних вузлів з різними конструкціями фасонки в порівнянні з напрацюванням аналогічних ферм з безфасонковими К-подібними вузлами;

– вперше отримано оптимальні геометричні параметри для фасонки власної конструкції К-подібного вузла;

– отримали подальший розвиток комплексні дослідження плоских зварних ферм, які поєднують натурний, напівнатурний і комп'ютерний моделюючий експерименти і дають можливість верифікувати отримані результати й забезпечити вищу достовірність отриманих показників в порівнянні з фактичними експлуатаційними даними.

Практичне значення одержаних результатів. Отримані в роботі результати досліджень можуть бути використані для вдосконалення та оптимізації конструкції вузлів зварних ферм на стадії проектування та для оцінювання залишкового ресурсу ферм впродовж експлуатації.

Апробація результатів Результати дисертаційних досліджень доповідались і обговорювались на Всеукраїнській студентській науково-технічній конференції «Природничі та гуманітарні науки. Актуальні питання» (25-26 квітня 2017 р., Тернопіль, ТНТУ); Міжнародній науково-технічній конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій» (16-17 листопада 2017 р., Тернопіль, ТНТУ); Міжнародній науково-технічній конференції «Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій» (22-24 травня 2018р., Тернопіль, ТНТУ); Міжнародній науково-технічній конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій» (28-29 листопада 2018р., Тернопіль, ТНТУ); II Міжнародній студентській науково-технічній конференції «Природничі та гуманітарні науки. актуальні питання» (25-26 квітня 2019 р., Тернопіль, ТНТУ); VI міжнародній науково-технічній конференції «Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи його діагностування і прогнозування» (24-27 вересня 2019 р., Тернопіль, ТНТУ); VIII міжнародній науково-технічній конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій» (27-28 листопада 2019р. Тернопіль, ТНТУ); IX міжнародній науково-технічній конференції молодих учених та студентів

«Актуальні задачі сучасних технологій» (25-26 листопада 2020 р. Тернопіль, ТНТУ).

Публікації Результати проведених досліджень відображені у 15 друкованих працях. З них – 2 статті у фахових виданнях з переліку МОН України, 1 стаття, що індексується у міжнародних фахових виданнях, 8 в тезах і матеріалах доповідей науково-технічних конференцій та у 4 патентах на корисну модель.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел. Загальний обсяг роботи становить 143 сторінки, в тому числі 116 рисунків, 17 таблиць, список використаних джерел складає 101 найменування.

РОЗДІЛ 1

СУЧАСНИЙ СТАН ДОСЛІДЖЕНЬ ПЛОСКИХ ЗВАРНИХ ФЕРМ

1.1 Загальний опис зварних ферм із К-подібними вузлами, їх конструктивні особливості та експлуатаційні вимоги

Ферма – це решітчаста наскрізна конструкція, що складається із окремих прямолінійних стержнів, які з'єднані між собою у вузлах і утворюють геометричну незмінну систему [1]. Геометрична незмінність ферми досягається застосуванням решітки, яка утворює систему трикутників (рис. 1.1).

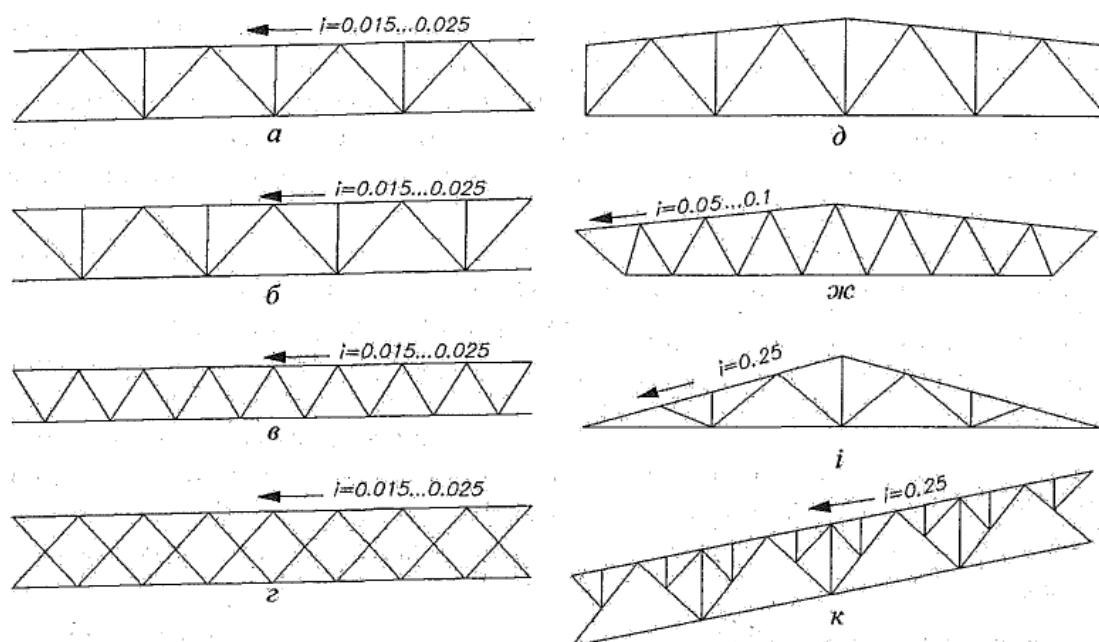


Рисунок 1.1 – Типові конструктивні схеми решіток ферм із К- подібними вузлами

а, б – з паралельними поясами та стійками; *в, г* – з паралельними поясами без стійок; *д* – трапецевидна зі стійками; *ж* – трапецевидна без стійок; *і* – трикутна за стійками; *к* – шпренгельна

Зварні будівельні ферми використовують при різних експлуатаційних навантаженнях. Конструктивна схема поясів підбирається головним чином

залежно від типу покрівлі, яка потребує певного ухилу, статичної схеми, яка визначає розподіл внутрішніх зусиль у конструкції, а також типу з'єднання з конструкцією на, яку буде опиратися [2...4].

Кроквяні ферми із трикутною решіткою застосовують при значному похилі покрівлі, які викликані умовами експлуатації будівлі або типом покрівельного матеріалу. Кроквяні ферми трикутного обрису мають ряд конструктивних недоліків. Гострий опорний вузол складний який допускає лише шарнірне з'єднання ферми з колонами. За таких умов знижується поперечна жорсткість конструкції. Стрижні решітки получаются занадто довгими і їх переріз необхідно підбирати за граничними прогинами, що викликає перевитрату матеріалу [5, 6] .

Трапецевидний обрис ферм має низку конструктивних переваг тому, що краще відповідає епюрі згинальних моментів і при з'єднанні з колонами дає можливість встановлювати жорсткі рамні вузли, які підвищують просторову жорсткість конструкції [7].

Ферми полігонального обрису найбільш підходять для важких ферм великих прольотів. Вони відповідають епюрі згинальних моментів, що зменшує матеріаломісткість конструкції. Додаткові конструктивні ускладнення через переломлення поясу у важких фермах не так відчутні, не важливо тому що пояси в таких фермах ,зазвичай, необхідно стикувати через умови транспортування.

Для легких ферм полігональний обрис нераціональний, так як конструктивні ускладнення, які виникають, не виправдовують зниження матеріаломісткості.

Ферми з паралельними поясами мають суттєві конструктивні переваги. Подібні довжини стержнів поясів і решітки, типові схеми вузлів та мінімальна кількість стиків поясів забезпечують в таких фермах найбільшу повторюваність деталей і можливість уніфікації конструктивних схем [8,9].

При виборі типу перерізу елементів ферм слід віддавати перевагу профілям з великим радіусом інерції при найменшій площі поперечного перерізу. Це пояснюється тим, що при роботі на стиск необхідно звести до мінімуму витрати матеріалу, для забезпечення стійкості стержнів: чим більший радіус інерції, тим менша гнучкість стержня, отже й більше значення коефіцієнта поздовжнього згину φ .

Одним із перерізів в кроквяних фермах набули таврові перерізи, скомпоновані з двох прокатних кутиків[10]. (рис 1.2).

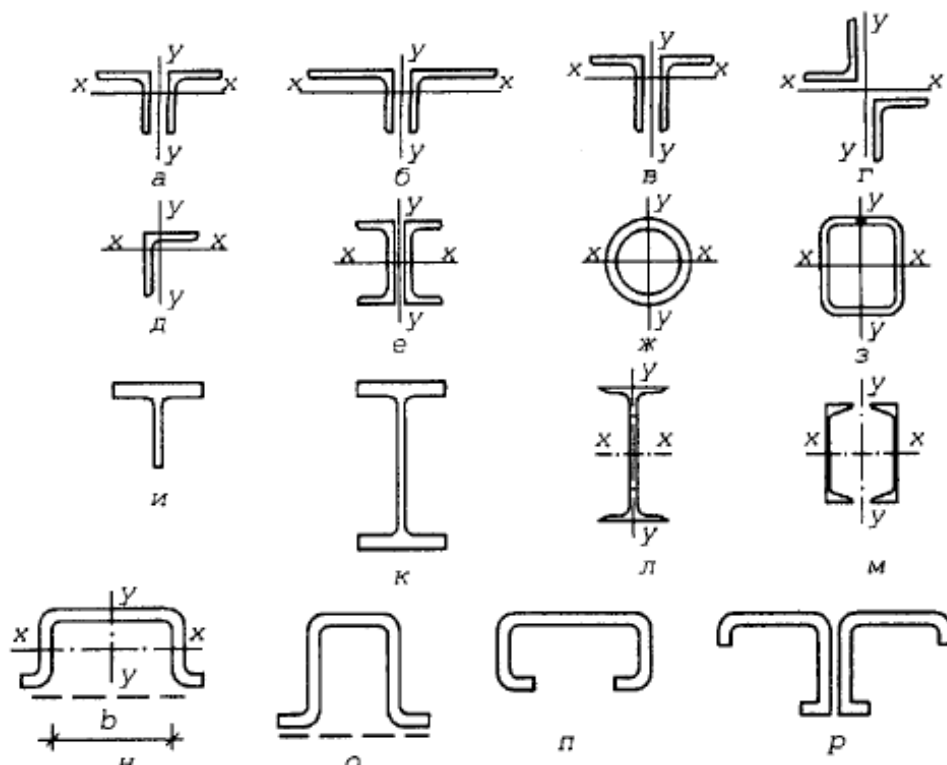


Рисунок 1.2 – Типи поперечних перерізів елементів ферм

Ці перерізи зручні в конструктивному відношенні, забезпечують просте приєднання до фасонки у вузлах. Комбінуючи типи та розміри кутиків, можна конструювати перерізи з різними радіусами інерції, що дозволяє при різних розрахункових довжинах стержня (в площині l_x поза площиною ферми l_y) підбирати рівностійкий стержень, тобто стержень у якого гнучкості в обох головних площинах рівні ($\lambda_x \approx \lambda_y$). Поперечний переріз всіх елементів ферм також може бути виконаний і з одинарних кутників [8,9].

Елементи решітки ферм, запроектованих із гнутих профілів [11] бажано центрувати по лінії симетрії перерізу. Якщо при цьому між внутрішніми гранями елементів решітки неможливо забезпечити проміжки $2c$, достатні для розміщення поперечних зварних швів (див рис.1.2), допускається виконувати децентрування елементів решітки з винесенням їх центра у зовнішній бік ферми. Вузлові ексцентриситети, що виникають при цьому, можна не враховувати, якщо вони не перевищують $0,25h$ [12,13].

Перерізи важких ферм відрізняються від легких міцнішими поперечними перерізами, які складаються із кількох елементів (рис.1.3).

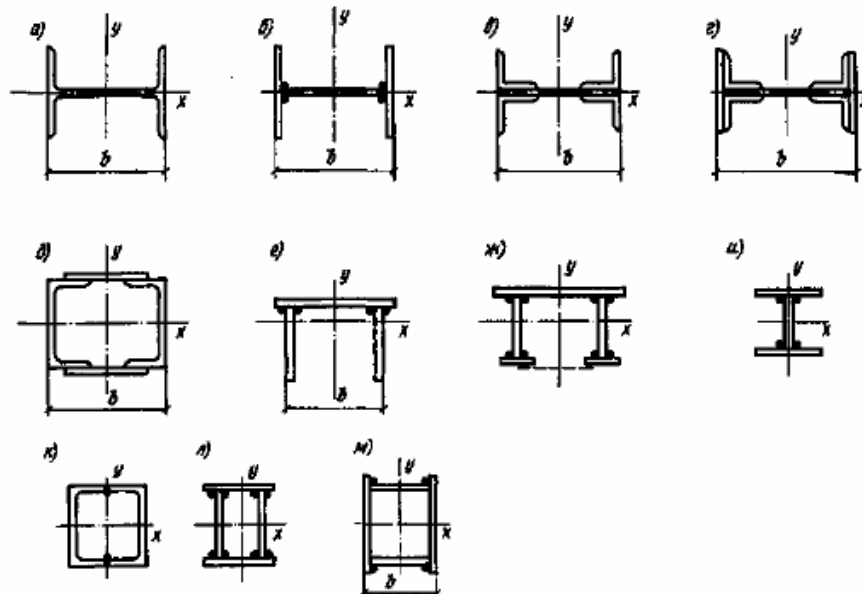


Рисунок 1.3 – Типи перерізів елементів важких ферм

Перерізи таких стержнів, зазвичай, проектують двоступеневими, а вузлові спряження виконуються за допомогою фасонки, які розміщені в двох площинах. Стержні важких ферм (розкоси, стійки та пояси) мають різні перерізи, але для зручності з'єднання у вузлах ширина елементів має бути однаковою [14,15].

Для поясів ферм бажано приймати перерізи, які мають дві осі симетрії, що полегшує стик у вузлі двох перерізів сусідніх панелей різної площини і не

створює додаткового моменту в результаті неспівпадання центрів ваги перерізу.

В кожному конкретному випадку вибір типу перерізів елементів ферм обумовлюється умовами роботи конструкції (ступінь агресивності середовища, характер і місце прикладання навантажень і т.д.), можливістю виготовлення, наявністю сортаменту й економічними показниками [16,17].

1.2 Конструктивні рішення К-подібних вузлів зварних ферм

Конструювання вузлів зварних ферм, зазвичай, полягає в розміщенні підібраних перерізів елементів відносно геометричних осей наскрізної конструкції, розрахунку типу з'єднання стержнів у вузлах, виборі розмірів вузлових фасонки та інших деталей, необхідність яких обумовлена використовуваними типами перерізів і характером сполучення на опорах

При проектуванні ферм слід прагнути того, щоб центральні осі стержнів решітчастої конструкції сходилися в вузлах в одну точку, тобто в центр ваги перерізу. За допомогою цього можна знехтувати згинальними моментами, які викликані ексцентриситетом. В реальній конструкції можливі відхилення від цієї установки, внаслідок чого виникають згинальні моменти [18]. Їх можна врахувати теоретично, де $M = Ne$, де N - поздовжнє зусилля в стержні, e – ексцентриситет відносно прикладення дії сили [19, 20].

Усі з'єднання мають відповідати конструктивним вимогам і передбачати зручність виконання та контролю їх якості [21,22]. Сховані зварні шви потрібно звести до мінімуму. Необхідно передбачати заходи, що знижують зварювальні деформації [23] та концентрацію напружень: забезпечувати плавність зміни перерізів, запобігати застосуванню зварних швів, що розташовані поперек профілів. Розрізняють вузли безфасонкові, тобто виконані встик [8...10] (рис. 1.4, а), і з фасонкою у формі надставки, вставки, прокладки [24], накладки (рис. 1.4...1.6).

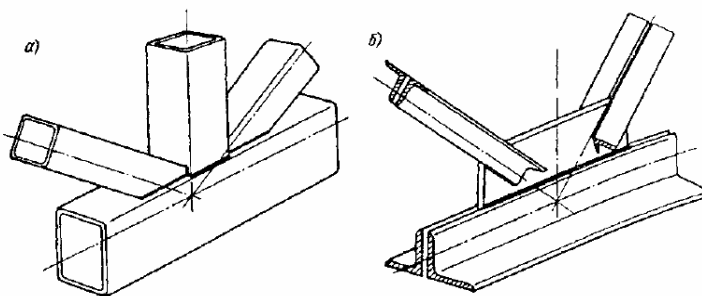


Рисунок 1.4 – Типи вузлів зварних ферм

a – без фасонки; *б* – з фасонкою

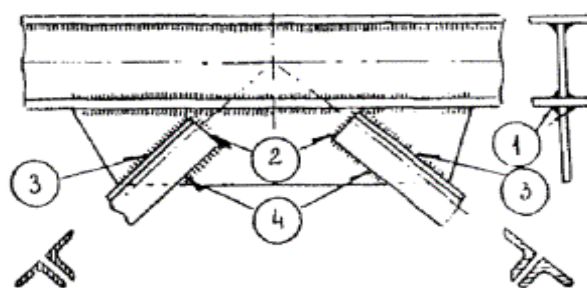


Рисунок 1.5 – Вузол з надставкою

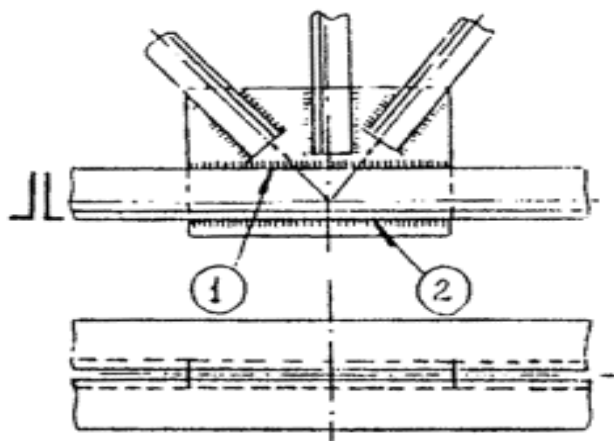


Рисунок 1.6 – Вузол у вигляді прокладки

Одні із найпоширеніших конструкцій К-подібних вузлів є вузли із труб вони застосовуються в будівлях з підвищеним агресивним середовищем і з високими гігієнічними вимогами. Дослідженням вузлів із трубного профілю

присвячено низка робіт [25...33]. Зокрема у праці Зінькової А.В. розроблено та удосконалено безфасонковий вузол із профільної труби (рис. 1.7, *а*) таким чином, що нова конструкція (рис 1.7, *б*) підвищує несучу здатність при зниженні матеріаломісткості, а також знижує концентрацію напружень за рахунок зниження залишкових напружень в зоні зварювання. При цьому деформації у площині приєднання розкосу до поясу знижуються в 1,7... 4,4 рази у порівнянні із традиційним стиковим вузлом.

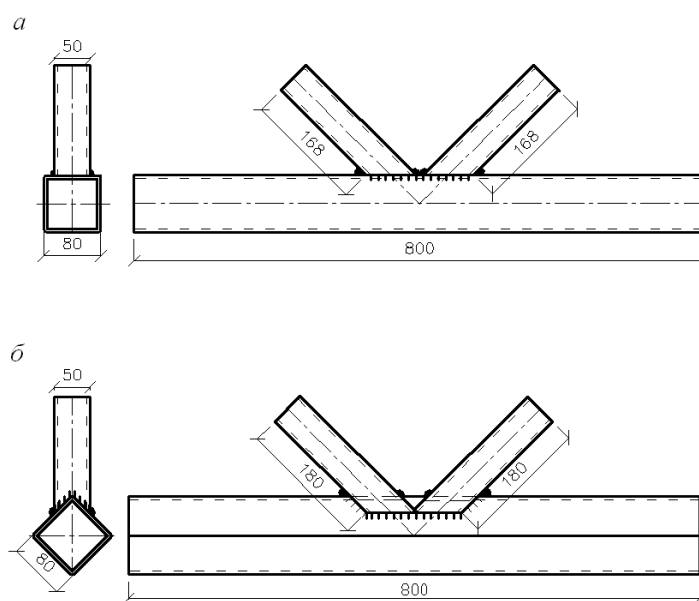


Рисунок 1.7 – Конструктивне рішення К- подібного вузла

а – стандартний стиковий вузол; *б* – [30]

У працях Wenwei Yang , Ruhao Yan, Yaqi Suo, Guoqing Zhang та Bo Huang [34...38] досліджено К-подібні вузли із заповненою порожиною бетоном при статичних та циклічних навантаженнях.

В фермах з труб найраціональнішими є бесфасонкові вузли з безпосереднім приварюванням стержнів решітки до поясів [30,38...41] (рис. 1.8, *а*). При недостатній товщині в площині пояса в вузлі він може бути посилений листовою накладкою, привареною до поясу (рис. 1.8, *в*). Внутрішня порожнина труб повинна бути захищена від проникнення вологи та повітря.

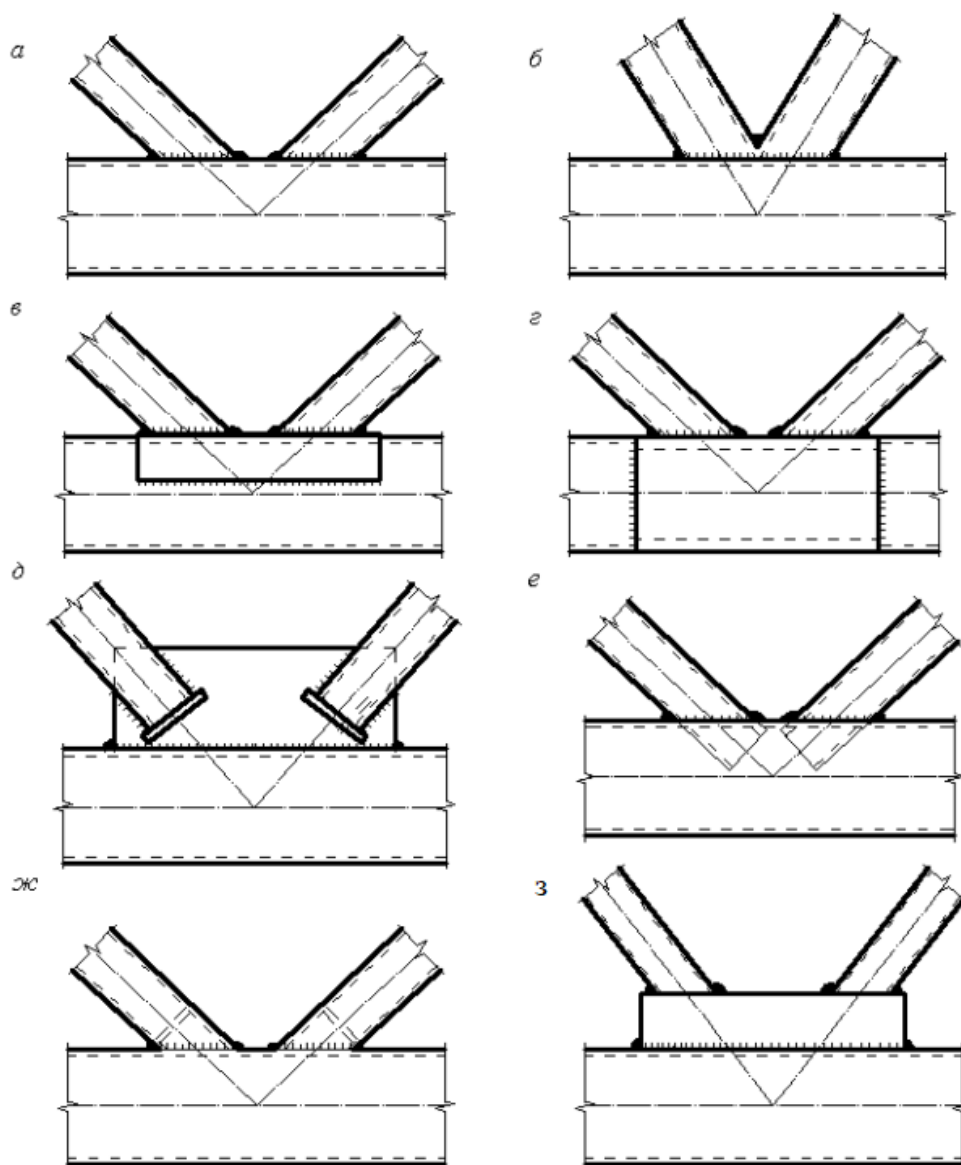


Рисунок 1.8 – Вузлові з'єднання елементів к-подібних вузлів ферм:
а – безпосереднє з'єднання розкосів з поясом; *б* – з розкосами, які перетинаються; *в* – з накладкою; *г* – з потовщеними стінками поясу; *д* – з вузловими фасонками; *е* – із врізкою розкосів в пояс; *ж* – із посиленням елементом у площині розкосів; *з* – із посиленням поясу за допомогою штампованої листової фасонки

Для поясів, опорних розкосів товщину стінок труб слід приймати не менше, як 3 мм, для інших елементів – не менше 2,5 мм.

У вузлах стрижні, як правило, центруються по осях. При неповному

використанні несучої здатності пояса допускається ексцентриситет не більше $\frac{1}{4}$ його діаметру. Щоб уникнути продавлювання верхньої стінки діаметр труби не повинен бути менше $0,3$ діаметра труби пояса. Якщо у вузлі стрижні з труб перетинаються між собою, розтягнутий розкіс приварюється до поясу по всьому периметру, а стислий розкіс або стійку частково приварюють до розтягнутого стрижня [42].

У сучасній практиці будівництва застосовують як жорстке кріплення ферми збоку до колони, так і шарнірне зверху колони чи збоку (рис. 1.9...1.10). У типових рішеннях при спиранні ферм на сталеві або залізобетонні колони зверху застосовують шарнірне з'єднання ферми з колоною .

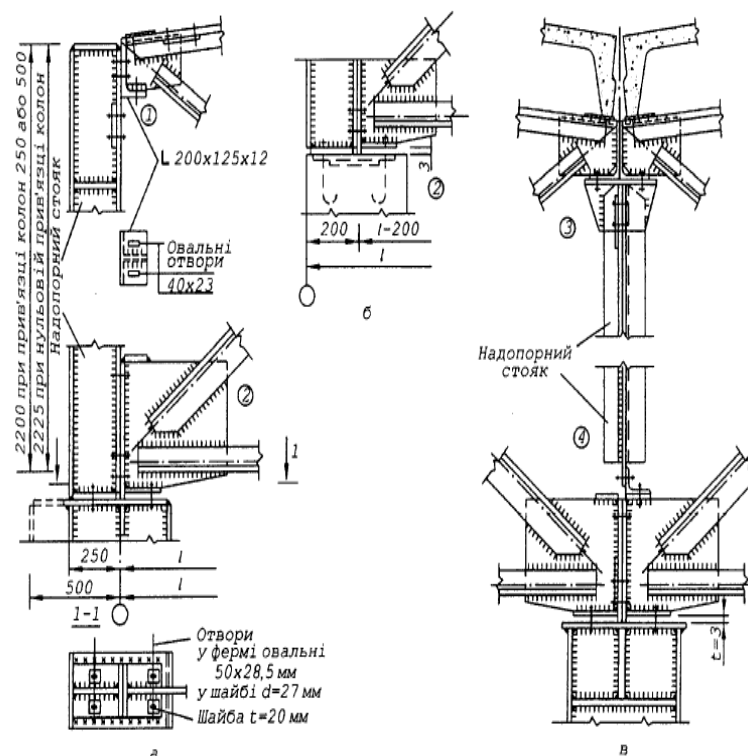


Рисунок 1.9 – Опорні вузли з прикріпленням ферм до колони зверху з обпирання на крайню (а) та на середню (б) колони

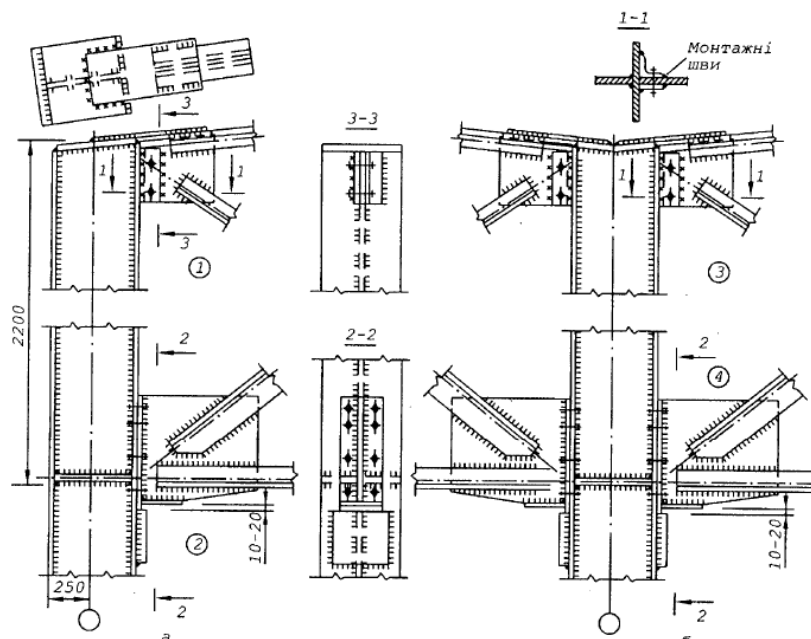


Рисунок 1.10 – Опорні вузли з прикріпленням ферм до колони збоку:
а – обпирання на крайню; *б* – на середню колону

Найбільш відповідальними вузлами ферм є монтажні стикові вузли (рис. 1.11), які поділяють кроквяну ферму на два окремих відправних елементи - півферми.

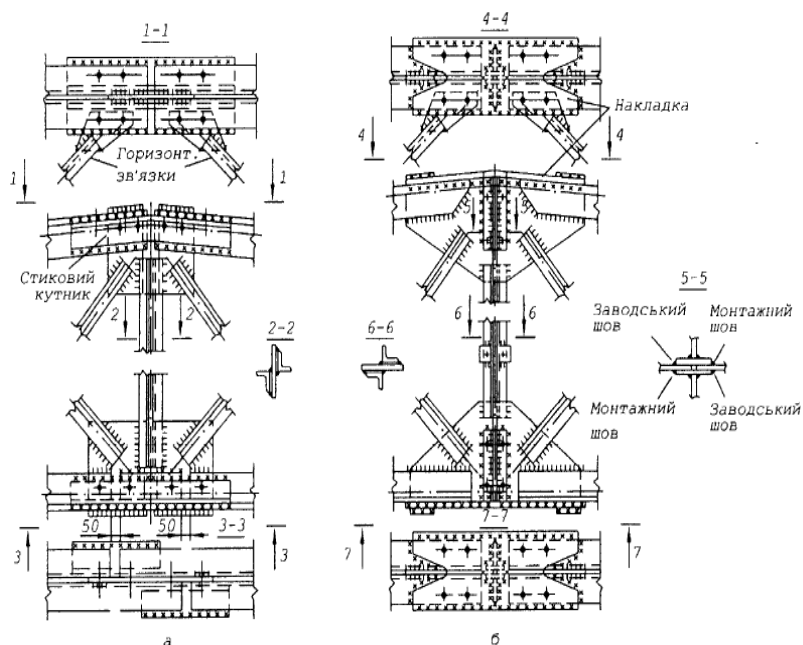


Рисунок 1.11 – Монтажні стики верхнього та нижнього поясів ферм:
а – з кутовими; *б* – з листовими стиковими накладками

З умов взаємозамінності півферм ферму поділяють таким чином, щоб кожна відправна марка в монтажному вузлі мала фасонку з двох рівних частин. У даному випадку стики поясів перекриваються листовими накладками. Стики поясів можна перекривати кутниковими накладками з обробленими обушками та зрізаними поличками.

1.3 Особливості пошкодження К-подібних вузлів та ферм в цілому

Однією із причин руйнування ферм із К-подібними вузлами є втрата стійкості стиснутими елементами (рис 1.12). Досвід показує, що втрата стійкості суттєво залежить від геометричних і фізичних недосконалостей стержнів [43...49].



Рисунок 1.12 – Втрата стійкості опорного розкоса

Серед причин, які викликають викривлення елементів при експлуатації, необхідно виділити такі:

- початкові недосконалості (викривлення та місцеві прогини), які виникають при виготовленні та монтажі);

- порушення правил технічної експлуатації (використання ферм для підвіски блоків при ремонті обладнання, кріплення комунікацій між вузлами і т.д.);

- невідповідність фактичної розрахункової схеми прийнятої при проектуванні (збільшення жорсткості опорних вузлів ферм при шарнірній розрахунковій схемі, позацентрове обпирання прогонів і плит, пропуск в'язей, які закріплюють стиснуті пояси із площини ферм і т.д.) [50];

- перенавантаження ферм;

- температурні впливи [51,52].

Частіше ці недосконалості виявляються в більш гнучких стержнях (в елементах решітки), для яких вплив початкових ексцентриситетів і можливих кривин згідно з вимогами враховують введенням коефіцієнта умов роботи $\gamma_c = 0,8$ (для стиснутих елементів решітки, крім опорних, при гнучкості $\lambda > 60$) .

Якщо стійкість стержнів ферми забезпечена, то руйнування ферми відбувається в результаті появи тріщин у зварних швах, які прикріплюють елементи решітки до вузлових фасонки (рис. 1.13).

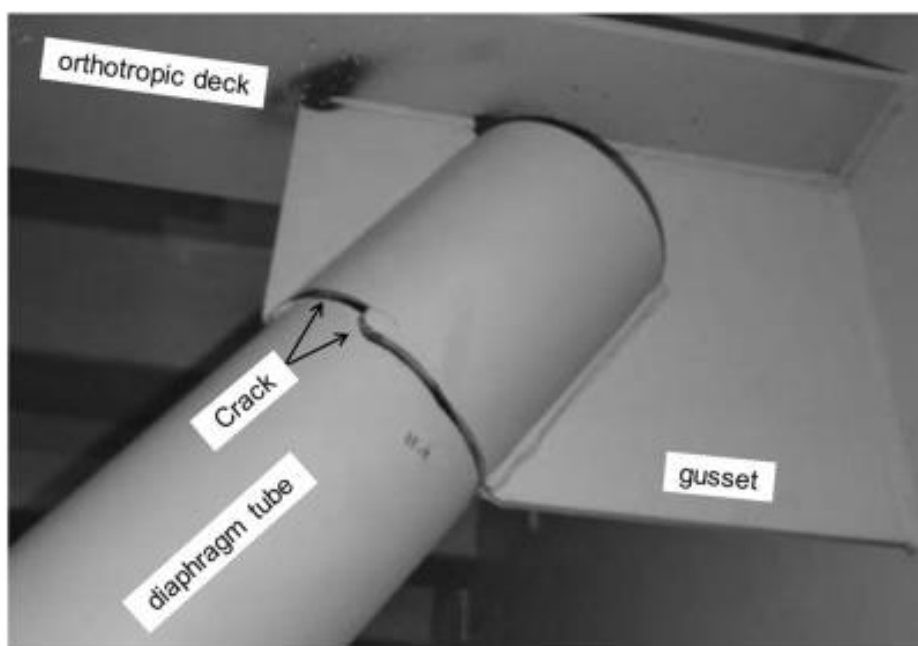


Рисунок 1.13 – Поперечна тріщина у верхньому К-подібному вузлі [53]

Такий характер руйнування особливо вірогідний при циклічних навантаженнях [54...67]. Розширення області пружної роботи (явище наклепу) знижує пластичність і в місцях наявності концентрації напружень, якими є

зварні шви, сприяє крихкому руйнуванню. Аналогічно діють концентратори і при циклічних впливах, внаслідок чого вібраційна міцність знижується до 100 МПа і може бути вичерпана протягом невеликого числа циклів [68] .

Зменшити вплив концентрації напружень можна застосуванням пологих швів, відмовою від флангових швів, плавним примиканням стержнів до косинок, проте ці заходи ускладнюють виготовлення ферм.

Крихке руйнування можливе й при експлуатації ферм при температурах нижчих ніж -40 °С. У цьому разі також необхідно зменшувати вплив концентраторів напружень та виконувати розрахунок з урахуванням наявності додаткових напружень від жорсткості вузлів, тобто не використовуючи спрощену (шарнірну) розрахункову схему.

Для ферм із профільних труб основним типом руйнування – є продавлення верхньої стінки в площині кріплення стиснутого розкосу, через виникнення місцевих згинаючих моментів [30, 62] (рис 1.14).



Рисунок 1.14 – Руйнування К-подібного вузла у фермі з профільної труби [30]

При закріпленні ферм до колони збоку частими дефектами є: перекіс опорної поверхні фланця ферми і позацентрова передача навантаження на опорний столик; зазор між фланцем, опорним столиком та провисання ферми

на монтажних болтах; зазор між фланцем і колоною і мала площа обпирання фланця на опорний столик. Всі ці ефекти спотворюють прийняту при розрахунку схему роботи опорного вузла, що призводить до перенапруження елементів .

1.4 Класичні підходи до розрахунку міцності зварних з'єднань у вузлах ферм

В залежності від розміщення шва відносно діючої на з'єднання сили шви можуть бути лобовими (торцевими) і фланговими [69]. Кутові шви для таких з'єднань розраховують, виходячи з умови міцності на зрізання (1.1):

$$\tau_{cp} = \frac{F}{0,7 \cdot k \cdot \ell_c} \leq [\tau_{cp}'] \quad (1.1)$$

де F – зусилля в приварюваному елементі; k – катет шва (зазвичай приймають катет рівним товщині полиці приварювано деталі); ℓ_c – розрахункова сумарна довжина швів; $[\tau_{cp}]$ – допустиме напруження зварного шва на зрізання.

Допустимі напруження зварного шва призначаються в залежності від виду технологічного процесу і марки електродів. При ручному електродуговому зварюванні електродами Э42А і Э50А $[\tau_{cp}] = 0,65 \times [s_p]$; при зварюванні електродами Э42 і Э50 $[\tau_{cp}] = 0,65 \times [s_p]$; а електродами Э34 $[\tau_{cp}] = 0,5 \times [s_p]$, де $[s_p]$ – допустиме напруження на розтяг основного металу .

Для конструкцій з незагартованих низьковуглецевих сталей, які експлуатуються при постійних навантаженнях, допустиме напруження на розтяг основного металу (1.2):

$$[\sigma_p] = \frac{\sigma_T \cdot e}{[s] \cdot k_\sigma}, \quad (1.2)$$

де σ_T – межа текучості матеріалу вибраного сортаменту, МПа; e – масштабний фактор; для зварних конструкцій при статичному навантажуванні $e = 0,9$; $[s]$ – коефіцієнт безпечності; для вуглецевих сталей $[s]=1,2\dots1,3$; k_σ – ефективний коефіцієнт концентрації напружень; при статичному навантажуванні $k_\sigma = 1,0\dots1,2$ (більше значення для лобових і флангових швів) [70].

При дії змінних навантажень допустимі напруження слід домножувати на коефіцієнт ψ

$$\psi = \frac{1}{[(0,6 \cdot k_\sigma + 0,2) - R \cdot (0,6 \cdot k_\sigma - 0,2)]},$$

де R – коефіцієнт асиметрії циклу напружень; k_σ – коефіцієнт концентрації напружень, при змінних напруженнях для флангових швів можна прийняти $k_\sigma = 3,5$.

При зварюванні елементів з рівносторонніх кутників зазвичай використовують два флангових шви різної довжини (рис. 1.15).

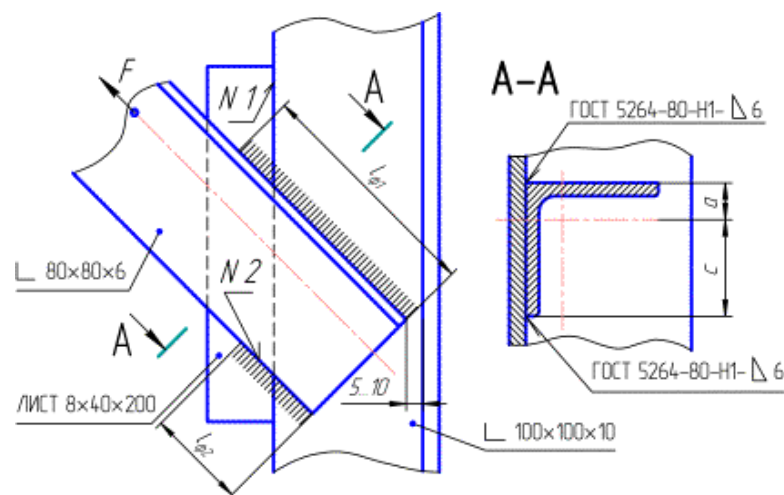


Рисунок 1.15 – Види зварних швів: стиковий – №1; внапусток – №2

Довжини швів обернено пропорційні віддалям від лінії дії сили до краю кутника, тобто

$$\frac{\ell_{\phi 1}}{\ell_{\phi 2}} = \frac{c}{a}$$

Виходячи з цього

$$F_1 = F \cdot \frac{c}{b}; F_2 = F \cdot \frac{a}{b}.$$

Необхідна розрахункова довжина швів

$$\ell'_{\phi 1} = F_1 / (0,7k[\tau'_{cp}]),$$

$$\ell'_{\phi 2} = F_2 / (0,7k[\tau'_{cp}]).$$

Дійсну довжину швів з врахуванням дефектів (можливості не проварювання на початку і кратера в кінці шва) беруть більшою за розрахункову на 10...15 мм, тобто

$$\ell'_{\phi} = \ell_{\phi} + (10..15)_{\text{мм.}}$$

1.5 Використання методів скінченно-елементного аналізу для оцінювання пошкодженості зварних вузлів

У сучасній науці та інженерній практиці широко використовується велика кількість розрахункових програмних комплексів, кожний з яких має свої ключові переваги і недоліки.

Розрахунок металевих конструкцій, зокрема зварних ферм та їх вузлів за допомогою програмних комплексів виклали у своїх роботах Дрокін А.В. , Алпатов В.Ю. (ПК ПОФСК-Мираж-ПСМК, «Ли́ра-W», SCAD, Cosmos Works, Design Space) , Алдушкін Р.В. (ПК SCAD і Mathcad) , Дубенець В.Г., Савченко О.В. (ПК APM WinTruss) , Шингера Н.Я. (ПК ANSYS) [9] та ін.

Для розрахунку і проектування вузлів сталевих конструкцій будов і споруд в промисловому і цивільному будівництві широке застосування знаходить програмний комплекс «Комета» (рис. 1.16), яка входить до складу SCAD Office.

Розрахунки виконуються згідно ДБН В-2.6-163:2010 «Конструкції будівель і споруд. Сталеві конструкції. Норми проектування, виготовлення і монтажу». Основна задача, яку вирішують за допомогою комплексу «Комета» – отримання проекту вузла (рис.1.16, 1.17).

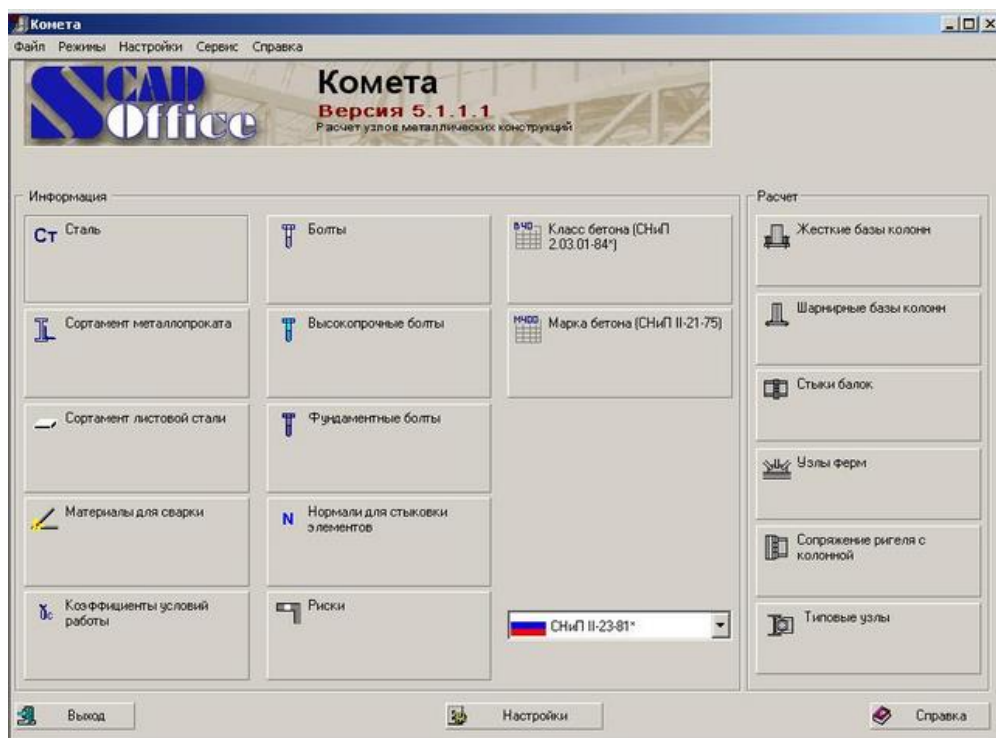


Рисунок 1.16 – Головне меню програми «Комета»

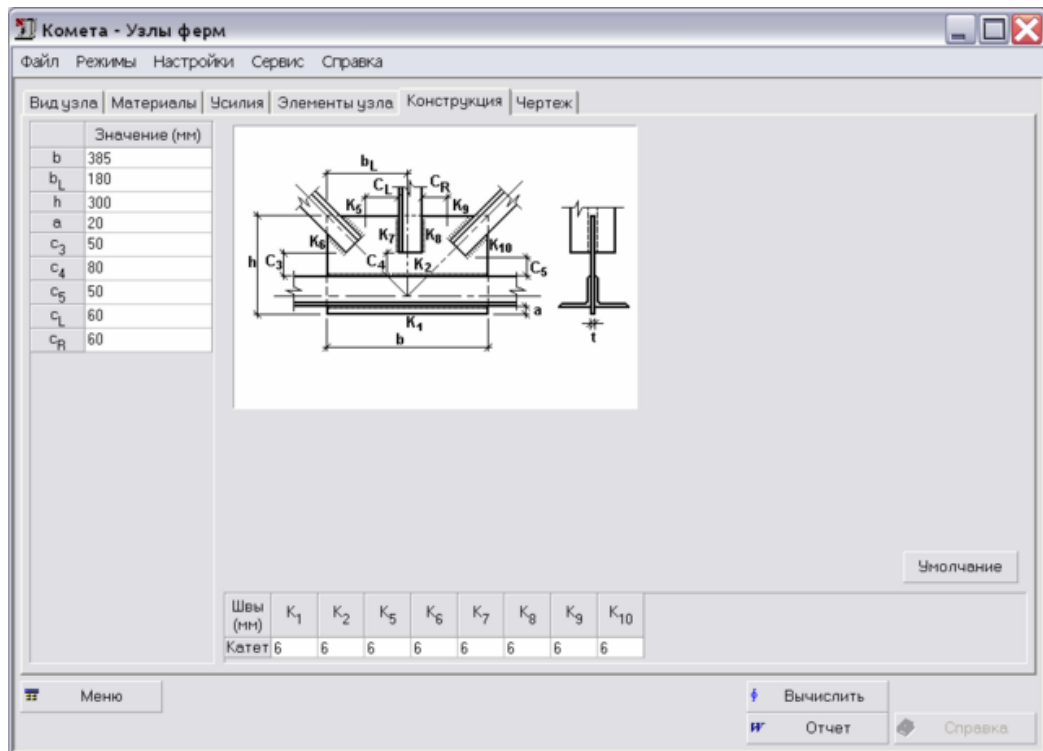


Рисунок 1.17 – Розрахунок вузлів зварних ферм з ПК «Комета»

ПК «Комета» дає можливість проектувати зварні вузли ферм заводського виготовлення і монтажних вузлів. Вихідними даними для проектування є інформація про геометрію вузла, переріз елементів ферми, діючих навантаженнях і матеріал конструкції. Проектуються вузли зі спарених кутників і труб різного перерізу.

Результатом роботи є креслення вузла й інформація про міцність його окремих елементів (деталей конструкції та зварних швів). Передбачена можливість експорту отриманих вузлів в формат DXF-файлов системи AutoCAD

Одним із найпотужніших програмних комплексів, що базується на методі скінченних елементів є ANSYS Workbench 17.1, тому що цей програмний комплекс має ряд переваг:

- побудова моделі конструкції або імпорт їх з CAD систем (а саме із SolidWorks, AutoCAD, Inventor та ін.);

- вивчення реакції конструкції на різні фізичні впливи, такі, як вплив різних навантажень;
- оптимізація геометрії конструкції;
- на базі Workbench реалізовані інструменти для обміну і ефективного керування розрахунковими даними користувачів (ANSYS EKM);
- висока продуктивність.

Програмне забезпечення ANSYS включає десятки можливостей, які мінімізують час, тощо. Програмний комплекс ANSYS відноситься до числа лідерів в області CAE-продуктів скінченно-елементного аналізу і має майже сорок років практики в розв'язанні прикладних задач числовими методами. Перша версія ANSYS, що вийшла в 1970 р., дозволяла проводити розрахунок напружено-деформованого стану конструкції і тепловий розрахунок в стаціонарній постановці, з тих пір можливості програми вирости в багато разів. Основним напрямком розвитку програмного пакета ANSYS, визначеним його засновником – професором Джоном Свонсоном (John Swanson), стала реалізація багатодисциплінарних інженерних розрахунків. Це багато в чому визначило політику розвитку компанії ANSYS, Inc. і в теперішній час програмний комплекс ANSYS охоплює практично всі види інженерного аналізу: від механіки деформівного твердого тіла і теплового аналізу до гідрогазодинаміки і аналізу процесів горіння, вибуху, тепломасообміну і фазових переходів, електродинаміки .

Враховуючи тенденції інтенсивного розвитку CAD-систем проектування, фірма ANSYS, Inc., запропонувала нову платформу Workbench, яка реалізує сучасний графічний інтерфейс і дозволяє ефективно керувати окремими модулями і продуктами ANSYS.

Застосування систем скінченно-елементного аналізу, реалізованих в різних комп'ютерних програмах міцнісних розрахунків, дозволяє на стадії проектування підібрати найбільш оптимальні розміри зварних швів і підвищити їх надійність і довговічність [21,69,71...75].

Застосування зварювання особливе доцільно при виготовленні конструкцій складної форми, окремі деталі яких отримують вальцюванням, куванням, штампуванням і литвом.

До недоліків зварних конструкцій відносяться: поява залишкових напружень в зварюваних елементах після закінчення процесу зварювання, викривлення, погане сприйняття змінних і, особливо, циклічних навантажень, складність і трудомісткість контролю якості зварних швів.

При конструюванні зварних з'єднань враховують такі важливі чинники :

- 1) значна концентрація напружень з'являється на краях і біля основи зварних швів, на кінцях швів і поблизу внутрішніх тріщин [77];
- 2) процес зварювання може викликати крихкість на певній площі поверхні з'єднання і змінити фізичні властивості матеріалу [78];
- 3) при зварюванні можуть з'являтися включення шлаку, з'єднання, що зменшують міцність [79];
- 4) на міцність швів сильно впливають залишкові напруження від усадки і викривлення .

Зварні з'єднання найбільш чутливі до знакозмінних навантажень.

Найбільш потужним чисельним методом дослідження напружено-деформованого стану різного роду з'єднань нині є метод скінчених елементів, реалізований на заміні досліджуваного твердотілого об'єкту сукупністю скінченого числа дискретних елементів, пов'язаних між собою у вузлах . У такому разі поставлене в роботі завдання виконується по трьох основних етапах:

- 1) побудова геометричної моделі вузла (рис 1.18);
- 2) встановлення навантажень, механічних характеристик, граничних умов, а також отримання рішення;
- 3) аналіз результатів.

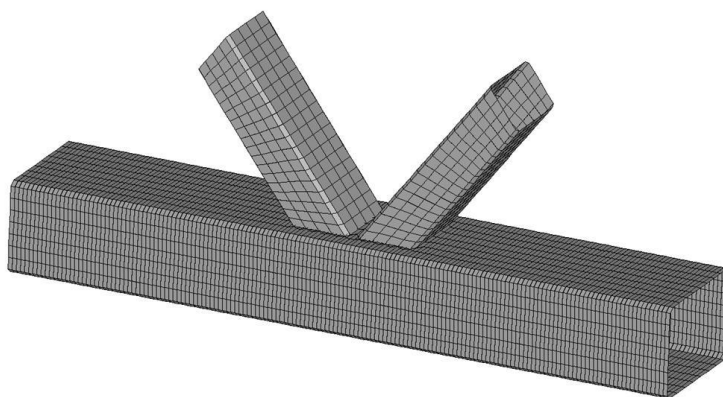


Рисунок 1.18 – Скінченно-елементна модель К-подібного зварного стикового вузла

Дослідження при статичному навантажуванні і вплив конструкції вузла на міцність зварних швів виконано на прикладі нижче зображених вузлів навантажених ферм із профільної труби (рис. 1.19) та (рис. 1.20).

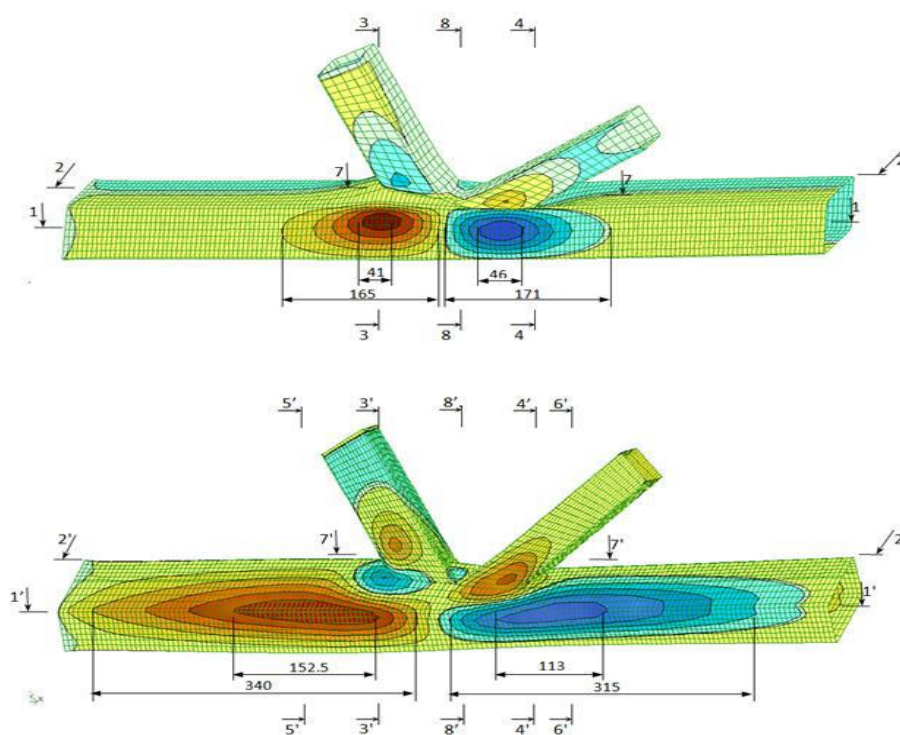


Рисунок 1.19 – Розподіл напружень в стержнях і зварних швах К-подібного вузла [30]

На рисунку 1.19 подано розподіл напружень та деформацій в стержнях і зварних швах по нижньому поясі.

У даній конструкції стержні приварені безпосередньо до несучих поясів ферми без використання оригінальної конструкції вузла. Максимальне напруження, що виникає в зварних швах цього вузла, чисельно рівне $\sigma_{\max} = 330$ МПа.

Тут виразно помітні темні плями на скінченно-елементній сітці.

На рисунку 1.20 зображено розподіл напружень в стержнях і зварних швах після встановлення поясу зварної ферми на ребро [30].

У такому разі максимальне напруження в основному матеріалі не перевищує значення $\sigma_{\max} = 90$ МПа, а концентрація напружень на краях швів $\sigma_{\max} = 301$ МПа.

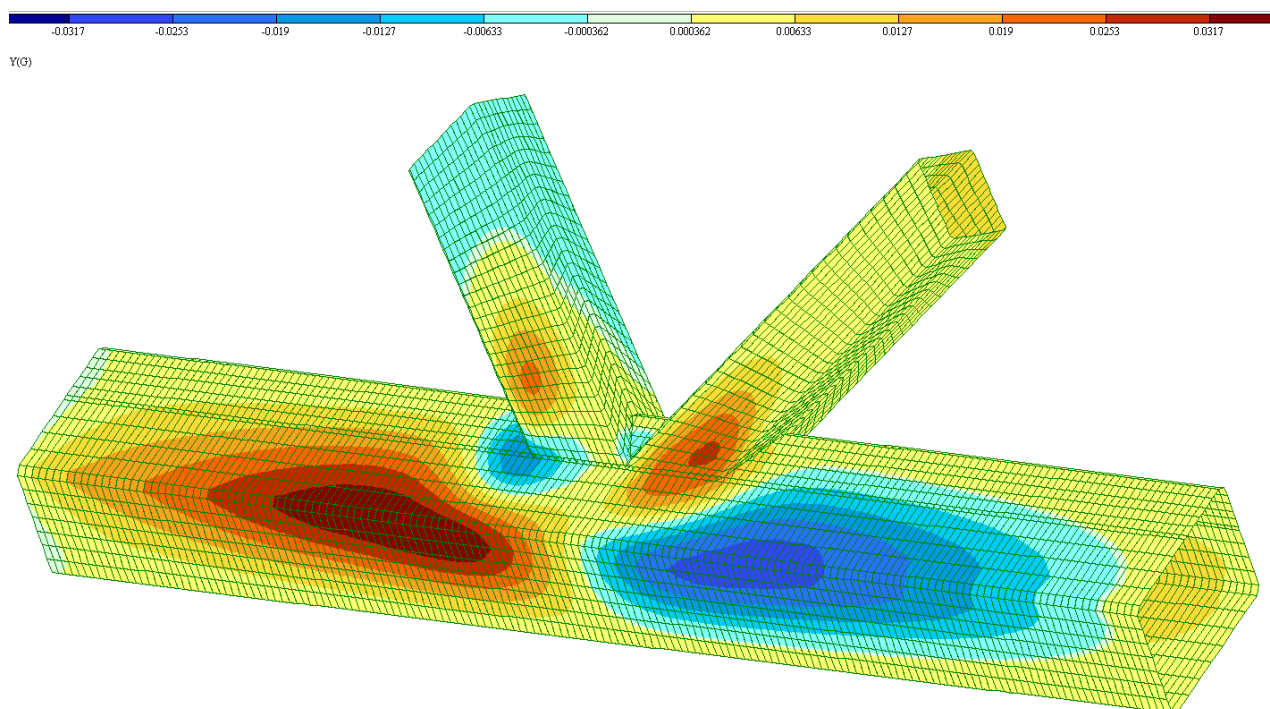


Рисунок 1.20 – Розподіл напружень в оригінально виконаному К-подібному вузлі з профільної труби [30]

На рисунку 1.21 показано розподіл напружень у елементах та вузлах ферми із круглої труби [80].

Напруження тут розподілено в діапазоні $\sigma=90\dots150$ МПа, в елементах ферми, а концентрації напружень на краях швів досягають величини $\sigma_{\max} = 190$ МПа.



Рисунок 1.21 – Напруження в фермі з круглої труби [80]

Розглянуто вузол ферми з профільної труби при дії циклічного навантаження (рис. 1.22) [81].

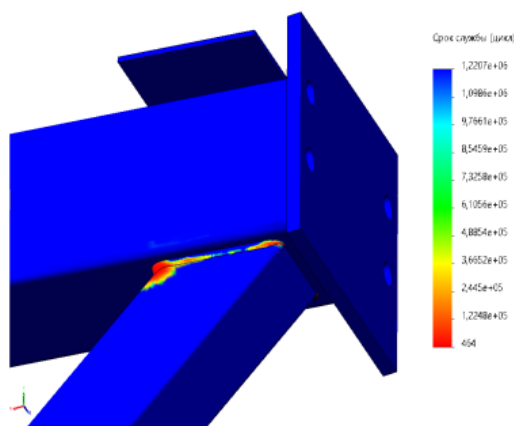


Рисунок 1.22 – Зосередження максимальних напружень в зварних швах [81]

При розгляді помітні місця концентрації напружень на межі сплавлення основного матеріалу та зварного шва. Саме там відбувається зародження втомної тріщини в результаті фазових перетворень металу під час зварювання. На основі розрахунку отримано криві втоми зварних з'єднань (рис.1.23) [81].

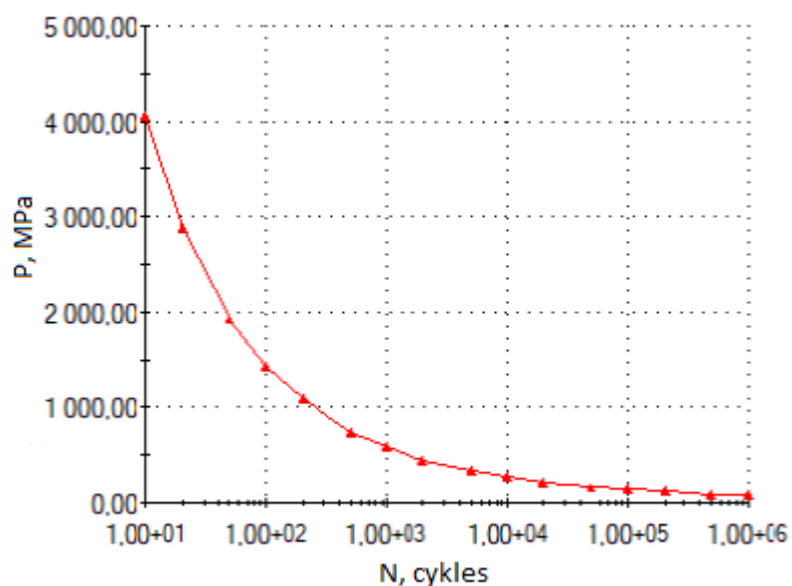


Рисунок 1.23 – Крива втоми зварних з'єднань [81]

Комп'ютерне моделювання і міцнісні розрахунки за методом скінченних елементів дозволяють з досить високою достовірністю підібрати розміри елементів і спроектувати вузол таким чином, щоб знизити напруження в області зварних швів [88...91], а це безпосередньо впливає на підвищення їх надійності й довговічності [92...95].

1.6 Аналіз відомих результатів досліджень і постановка задач дисертації

За результатами аналізу вузлів зварних ферм, результатів досліджень, виконаних іншими авторами, виявлено:

1. Багатофакторний вплив на показники пошкоджуваності К-подібних вузлів ускладнюють процес розрахунку зварних ферм з високим рівнем вірогідності.

2. Значні розміри зварних ферм, необхідність значних матеріальних і енергетичних витрат стримують розвиток експериментальних досліджень

натурних зразків для формування бази даних з метою верифікації розрахункових результатів .

3. Розвиток сучасних засобів обчислювальної техніки і прикладного програмного забезпечення створюють можливості їх адаптації для дослідження умов пошкоджуваності К-подібних вузлів зварних ферм за умов комплексного впливу на них різноманітних чинників.

На основі огляду літератури і проведеного аналізу виконаних раніше досліджень сформульовані задачі дисертаційної роботи.

Для розкриття теми роботи і досягнення поставленої мети потрібно:

1) вибрати конструкцію зварної ферми, схеми і режимів її навантажування;

2) розробити методики експериментальних натурних, напівнатурних та комп'ютерно-моделюючих досліджень ферми;

3) виявити особливості пошкодження і руйнування К-подібних вузлів ферми за умов статичних і циклічних навантажень, які ідентифікують експлуатаційні умови конструкції;

4) сформулювати рекомендації для проєктування зварних ферм, які забезпечать максимальну несучу здатність конструкції при статичних навантаженнях і довговічність при циклічних впливах без пошкодження і руйнування.

1.7 Висновки за розділом 1

1. Проаналізовано дослідження зварних ферм різними авторами та систематизовано їх результати для К-подібних вузлів зварних ферм.

2. Виявлено, що питома вага натурних досліджень досить низька, а достовірність результатів комп'ютерним моделюючим експериментом не підтверджена верифікацією.

3. Переважна частина натурних досліджень вузлів виконана як для окремих елементів без їх поєднання в повномасштабних фермах.

4. На підставі систематизації і аналізу результатів досліджень іншими авторами сформульовано задачі для власних досліджень.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИЧНІ АСПЕКТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ПОШКОДЖЕННЯ І РУЙНУВАННЯ ВУЗЛІВ ЗВАРНИХ ФЕРМ ПРИ НАВАНТАЖУВАННІ

2.1 Вибір конструкції повномасштабної ферми для дослідження, схеми її базування і навантаження

Для розкриття теми роботи прийнята конструкція прямокутної плоскої зварної ферми (рис. 2.1) довжиною 4954 мм та висотою 1546 мм. Запропонована схема базування і навантажування при виконанні натурального силового експерименту для зварної ферми ідентифікує її експлуатаційний режим.

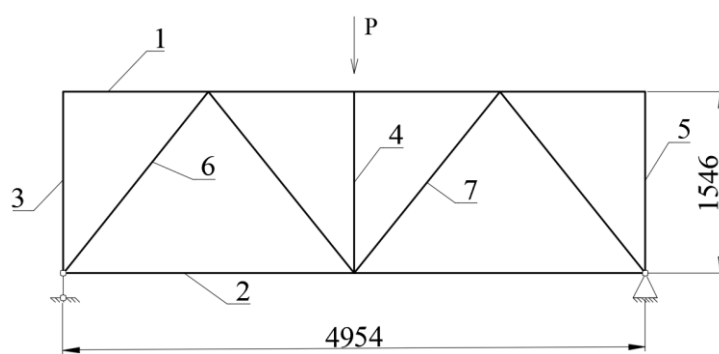


Рисунок 2.1 – Конструктивна схема зварної ферми, схема її базування і навантажування

Ферма виготовлена із профільних труб. Розміри елементів подано у табл. 2.1.

Така конструкція розроблена для ТОВ «Смартехбуд» (м. Тернопіль). Підприємство виготовило 2 таких ферми для власних технологічних потреб. Для експлуатації кожна з ферм встановлюється опорними вузлами поясу на 2 колони одна навпроти другої. Навпроти центрального вузла на верхньому поясі нерухомо фіксується кран балка. Кран балка по середині має нерухомий підймальний вузол (електродвигун, редуктор, електромагнітне гальмо, барабан, трос, гак), які створюють незмінне статичне навантаження від його

ваги. Крім того ферми сприймають циклічне навантаження від технічної ваги, що підіймається кран-балкою.

Таблиця 2.1

Профілі та розміри елементів зварної ферми

№ елемента	Профіль	Довжина, мм
1	Профільна труба 80x4	4830
2	Профільна труба 80x4	4840
3	Профільна труба 100x6	1186
4	Профільна труба 100x6	1186
5	Профільна труба 60x4	1870
6	Профільна труба 60x4	1910
7	Профільна труба 60x4	1465
8	Профільна труба 60x4	1910
9	Профільна труба 60x4	1870

Перевагами вибору такої ферми для дослідження є:

1. Наявність двох симетричних К-подібних вузлів, один з яких знаходиться ближче до жорсткої опори, інший – ближче до шарнірної опори;
2. Наявність двох повномасштабних ферм дає можливість використати спарену схему для натурних випробувань конструкції.
3. Умови реальної експлуатації ферм дають можливість порівняти результати напівнатурного і комп'ютерного моделюючого експерименту з фактичними показниками повномасштабних ферм.

2.2 Методика натурного експериментального дослідження зварної ферми

Для виявлення особливостей поведінки складних технічних систем доцільно використовувати натурний експеримент повномасштабних зразків. Такі дослідження дають можливість отримати результати з найвищою вірогідністю.

Для побудови діаграми деформування ферми при дії статичних навантажень виконаний натурний силовий експеримент. Його особливістю є те, що дослідження проведено за спареною схемою (рис 2.2...2.4) для двох однакових ферм зі стиковим (безфасонковим) виконанням вузлів.

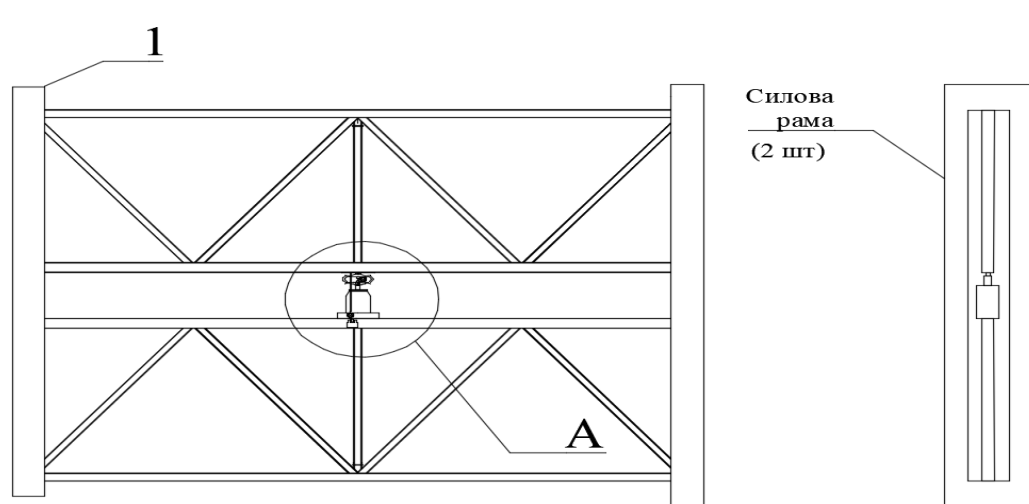


Рисунок 2.2 – Конструктивна схема дослідної установки для натурного експерименту для двох ферм

Дослідна установка складається з двох силових рамок 1 (рис. 2.2), які забезпечують сумісне базування обох ферм по опорних вузлах згідно рис. 2.1, та вузол для створення навантажень та визначення деформацій (рис. 2.4).

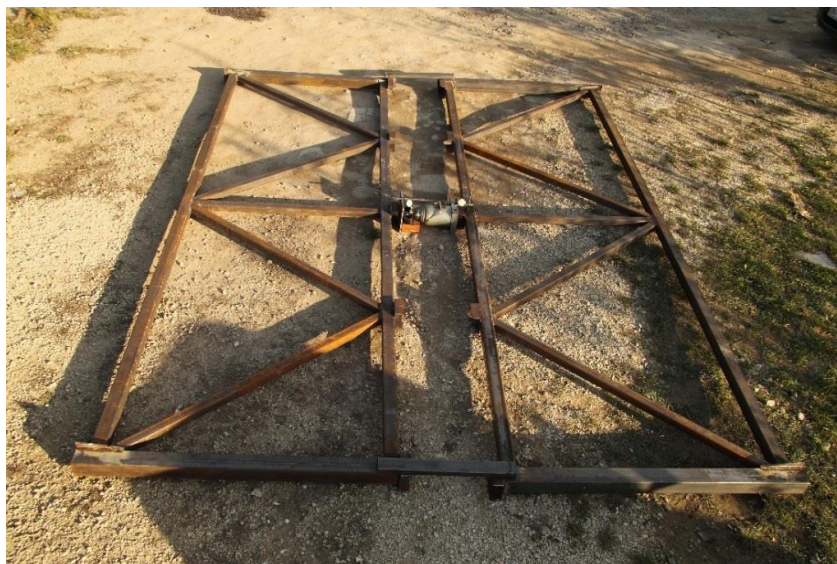


Рисунок 2.3 – Експериментальна установка для натурального випробування ферм за спареною схемою

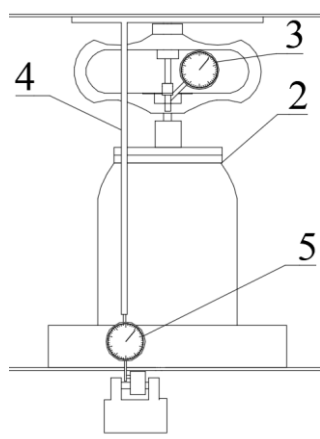


Рисунок 2.4 – Вузол для створення навантаження і визначення деформацій при натурному експерименті

Для виконання експерименту і побудови діаграми деформування ферми дослідні зразки встановлюють в силові рамки 1. Для створення навантаження використано домкрат 2. Його розміщують опорною ділянкою впритул посередині однієї з ферм співвісно з центральною стійкою ферми. Для визначення поточного значення сили між штоком домкрата і площадкою для прикладання сили на іншій фермі встановлюють динамометр 3. Для

визначення величини деформацій ферм паралельно з віссю домкрата між площадками для прикладання сили встановлено індикатор часового типу 5 з подовжувальним штоком 4.

Перед початком прикладання сили шток домкрата виводять аж до створення контакту між обома фермами, динамометром і штоком домкрата. За таких умов «0» на шкалі на індикаторі 5 і на індикаторі динамометра 3 виставляють навпроти великої стрілки індикатора. Далі виводячи шток домкрата на 2 качки важеля домкрата записують поточне значення сили і деформації. Таким чином виконують періодичне зняття показів з індикаторів аж до появи візуальних ознак пошкодження ферми. Після того експеримент зупиняють.

2.3 Методика напівнатурного дослідження зварної ферми

Реальні зварні ферми є складними технічними системами, що мають комплекс різноманітних фізичних властивостей та недосконалостей, які не завжди цілком можна описати теоретично. При інженерних розрахунках враховують якусь обмежену кількість вхідних даних, які не охоплюють всіх властивостей конструкції, а лише найголовніші з них. Однак неврахування, на перший погляд, несуттєвих факторів впливу при їх комплексному поєднанні зумовлює неузгодженість розрахункових та фактичних результатів, отриманих при експлуатації конструкції чи при її натурних дослідженнях.

Для дослідження складних технічних систем широко використовується фізичне моделювання, в основу якого покладено подібність фізичних процесів [96...98]. У випадках, коли математичний розв'язок задачі ускладнений або навіть не можливий, зазвичай використовують натурні експериментальні дослідження на фізичних моделях з наступним перерахунком отриманих результатів на реальну конструкцію, яка стала прототипом моделі. Такі експериментальні дослідження фізичних моделей ще називають

напівнатурними. Тобто при фізичному моделюванні вивчення поведінки конструкції, яка нас цікавить, замінюють вивченням поведінки її фізичної моделі, як правило, в спеціальних лабораторних умовах.

Фізичне моделювання для дослідження НДС у вузлах зварних ферм зумовлене:

- складністю врахування впливу багатьох експлуатаційних та фізичних чинників при їх комплексному поєднанні;
- значною матеріало- трудо- і енергомісткістю випробування натурних зразків.

При виконанні напівнатурного експерименту система може піддаватися різноманітним видам впливу. Цей вплив повинен якомога точніше відтворювати робочі навантаження як за величиною, так і за характером дії.

Обов'язковою умовою при розробці фізичної моделі є дотримання умов подібності реальної конструкції і її фізичної моделі. В свою чергу це забезпечує можливість ідентифікувати результати дослідження, отримані з використанням фізичної моделі, для повномасштабних зварних ферм.

Для дослідження прийнято масштабну (фізичну модель) зварної ферми (рис. 2.5). Ферма виготовлена з профільної труби 25x25x2 для елементів зовнішньої обрешітки та 20x20x1,5 для внутрішньої.

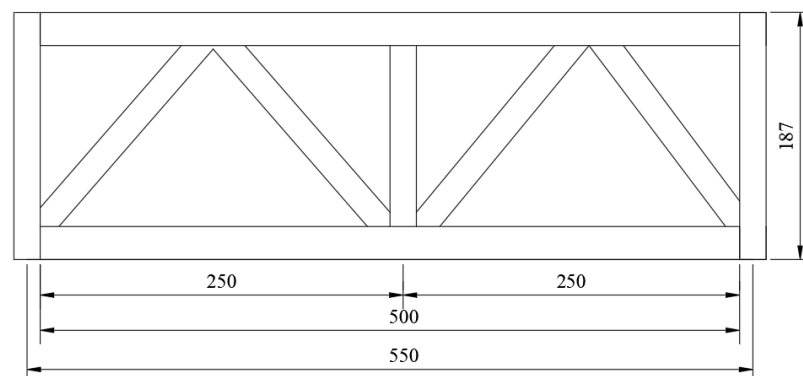


Рисунок 2.5 – Конструкція фізичної моделі зварної ферми

Напівнатурний силовий експеримент здійснено на випробувальному комплексі на базі сервогідравлічної випробувальної машині СТМ-100 виробництва авіаційного науково-технічного комплексу (АНТК) імені О.К.Антонова (м. Київ). Керування машиною здійснювалось програмно від комп'ютера.

Випробувальний комплекс забезпечує проведення статичних та циклічних випробувань при одновісному розтягові та стискові.

Основні показники технічної характеристики випробувальної машини СТМ-100 подано в табл. 2.2.

Таблиця 2.2

Основні показники технічної характеристики
випробувальної машини СТМ-100

Показники, розмірності	Значення
Максимальні зусилля статичного розтягу та стиску, кН	100
Максимальні зусилля циклічних навантажень (розтяг-стиск), кН	80
Робоча частота циклічних випробувань, Гц	0,005...100
Потужність електродвигуна гідростанції, кВт	11
Робочий хід силового штока гідроциліндра, мм	100
Допустимий режим роботи при випробуваннях	Довготривалий

На рисунку 2.6 зображено структурну схему і загальний вигляд випробувального комплексу СТМ-100 в процесі виконання напівнатурного експерименту.

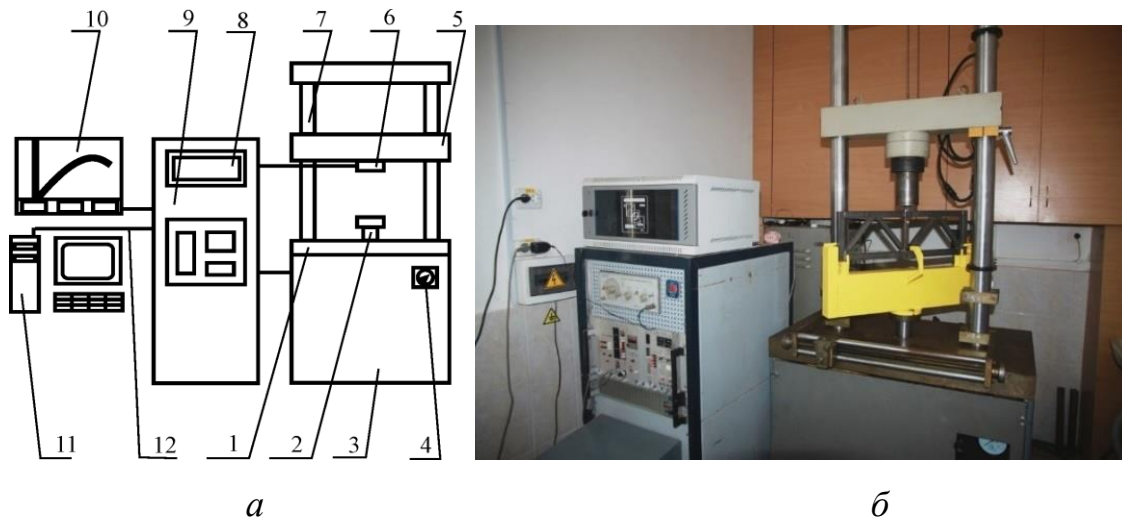


Рисунок 2.6 – Випробувальний комплекс СТМ-100

а – структурну схему; *б* – загальний вигляд в процесі виконання напівнатурного експерименту.

На рисунку 2.6 показано: 1 – робочий стіл; 2 – шток гідроциліндра; 3 – силова гідростанція; 4 – манометр; 5 – траверса; 6 – динамометр; 7 – колона; 8 – генератор стандартних сигналів ГЗ-112; 9 – блок аналогово-цифрових перетворювачів; 10 – двокоординатний самопишучий потенціометр Н-307/1; 11 – керуючий комп'ютер; 12 – лінії зв'язку.

Робоча ділянка для встановлення зразків знаходиться між штоком гідроциліндра 2 та динамометром 6.

Дослідження при дії статичного та циклічного навантаження виконувалось у м'якому режимі. При статичних випробуваннях навантаження збільшували покроково на 500 Н з проміжним візуальним контролем стану конструкції і записом показників сили, переміщення штока і деформації прогину нижнього пояса.

При дослідженні зварної ферми за циклічних силових впливів застосовувались такі параметри: $P_{\max} = 15$ кН; $P_{\min} = 3$ кН; коефіцієнт асиметрії циклу $r = 0,2$; частота навантажування циклу $\nu = 50$ Гц.

Вимірювали довжину тріщини оптичним методом за допомогою накладного вимірювального мікроскопа МПБ-3 зі збільшенням поля зору $\times 50$ (рис. 2.7).

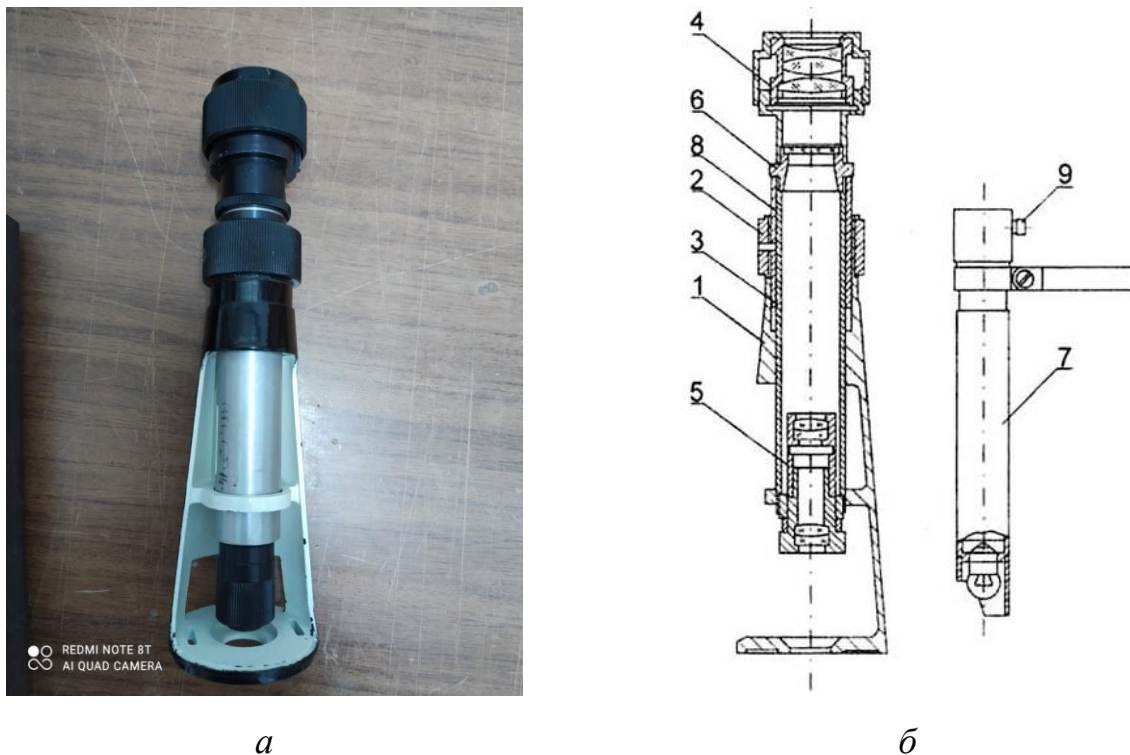


Рисунок 2.7 – Мікроскоп МПБ-3
а-загальний вигляд б- структурна схема

Мікроскоп складається із таких частин: 1 – колонка, 2 – встановлювальне кільце, 3 – тубус, 4 – окуляр, 5 – об’єктив, 6 – сітка. 7 – освітлювач, 8 – ручка тубуса, 9 – ручка освітлювача.

Вимірювання проводили таким чином, основу мікроскопа встановлюють на досліджувану ділянку, так щоб отвір у основі розташовувався концентрично із місцем зародження тріщини. Після цього мікроскоп повертають, щоб вікно в колонці було розташовано проти зовнішнього джерела освітлення. Шкала вимірювання розміщується паралельно до траєкторії росту тріщини.

Під час випробувань керування машиною СТМ-100 виконується від персонального комп’ютера. Вхідні параметри вводилися у програмі TestBuilder (fatigue tool) (рис.2.8)

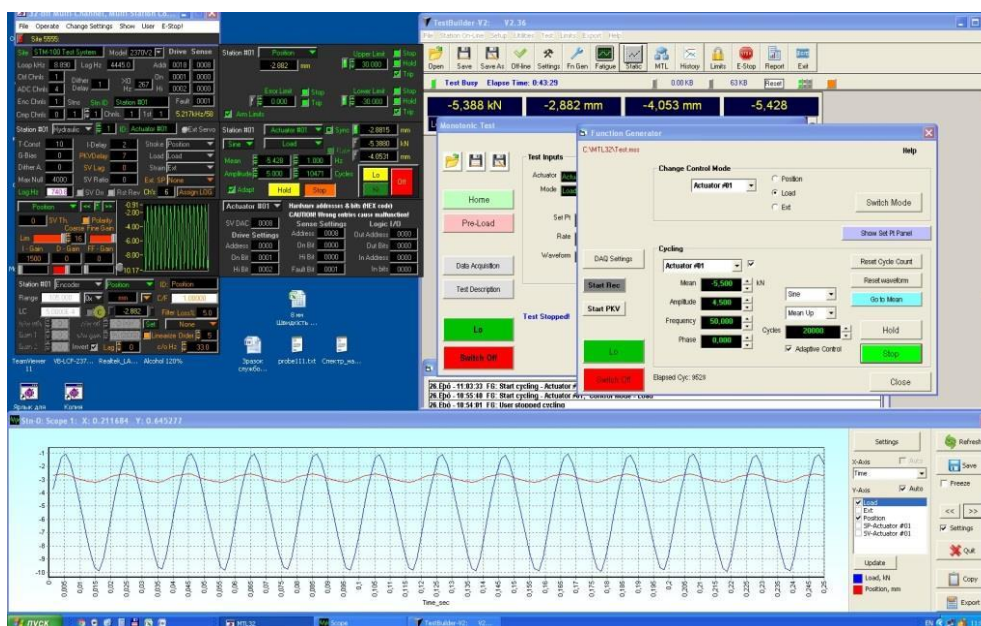


Рисунок 2.8 – Інтерфейс програми TestBuilder із встановленими параметрами циклічних випробувань

Для керування експериментом і запису його результатів використано програмне забезпечення (базовий модуль) MTL32 Base Module, в якому задаються робочі параметри випробувань: жорсткий чи м'який режим випробувань, аварійні межі каналів, апаратні і програмні коефіцієнти регулювання, випробування проводяться в модулі TestBuilder.

MTL32 Base Module та TestBuilder забезпечують виконання таких функцій:

- підготовку параметрів і конфігурацію одного з керуючих каналів;
- підготовку параметрів і конфігурацію за чотирма незалежними вимірювальними каналами;
- підготовка і реалізація програми керуючого і вимірювальних каналів;
- реєстрація вибраних керуючих і контрольованих параметрів випробувань, а також їх вивід на екран ПК або експорт у документ формату Microsoft Excel;

- контроль реалізації програми випробувань і установлених аварійних меж каналів;
- можливість зміни програми каналів в процесі випробувань або її зупинки з наступним продовженням з місця зупинки або виходом на заданий рівень статичного навантаження;
- зусиллям P , переміщенням штока S , поздовжньою або поперечною деформацією ε . Похибка сигналу завдання і точність вимірювання контрольованих величин не перевищує 1 % максимального значення встановленого масштабного діапазону.

2.4 Методика комп'ютерного моделюючого експерименту для дослідження вузлів зварних ферм

Для дослідження впливу зовнішніх навантажень на зварну будівельну ферму використовувалась універсальна програма скінченно-елементного аналізу ANSYS. Проектування моделі конструкції та розрахунки були виконані в програмній платформі ANSYS Workbench 17.1 [99], яка дозволяє в єдиному інформаційному просторі інтегрувати модулі для виконання зв'язаного багатоступеневого аналізу.

Для дослідження зварної ферми при дії силових впливів в середовищі ANSYS, структурно вибрано два напрямки розв'язання поставленої задачі:

- за статичних навантажень;
- при циклічних навантаженнях;

За статичних навантажень – розрахунок проводився, як статичний міцнісний аналіз (Static Structural), а для циклічних навантажень у вбудованому підмодулі (Fatigue Tool). Процес моделювання і розрахунків відбувався поетапно. На першому етапі була створена структура статичного міцнісного аналізу (рис. 2.9), в якій виконувались подальші дії.

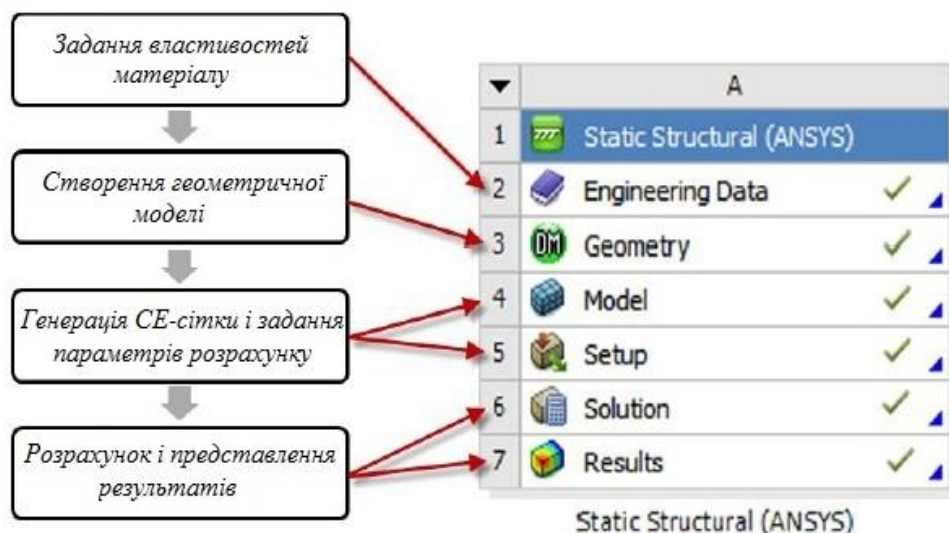


Рисунок 2.9 – Структура статичного міцнісного аналізу

Другим етапом було задання властивостей матеріалу (Engineering Data) (рис 2.10).

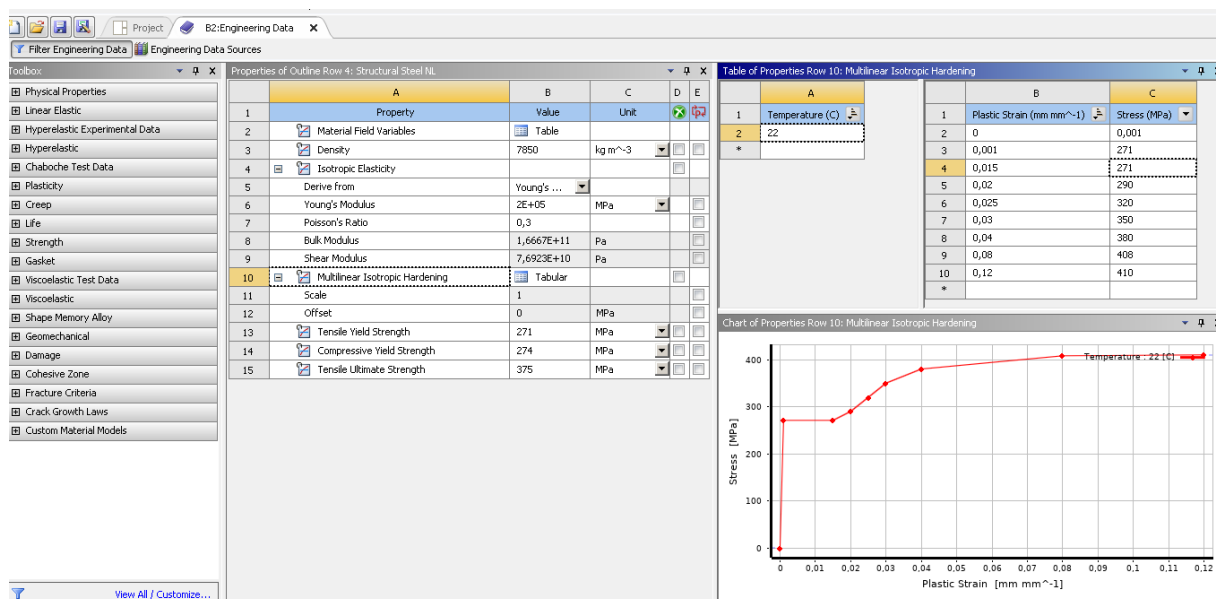


Рисунок 2.10 – Меню Engineering Data із заданими характеристиками

Для елементів зварної ферми та зварного шва задано такі механічні характеристики і властивості:

- густина матеріалу;
- коефіцієнт Пуассона;

- модуль Юнга для елементів (модуль зсуву для зварних швів);
- межа текучості на стиск та розтяг;
- межа міцності на стиск та розтяг;
- коефіцієнт термічного розширення;
- коефіцієнт теплопровідності;
- діаграму деформування;
- криву Веллера.

Після створення матеріалу, перейшли до наступного етапу.

Третій етап полягає у створенні геометричної моделі (Geometry). У складі ANSYS Workbench є спеціальний модуль для 3D-моделювання, редагування CAD-геометрії і присвоєння атрибутів моделі перед розбиванням на сітку скінчених елементів. Етап побудови геометричної моделі реалізовувався елементом Geometry. Геометрична модель створюється в модулі Design Modeler, який реалізує сучасні методи моделювання плоскої чи тривимірної геометрії. Крім стандартних інструментів геометричного моделювання, Design Modeler має ряд спеціальних функцій, які дозволяють підготувати модель до інженерного аналізу в ANSYS. Після створення ескізів та задання їм розмірних параметрів, виконання ряду послідовних операцій з витискання, об'єднання та видалення граней, отримано тривимірну геометричну модель зварної будівельної ферми (рис. 2.11).

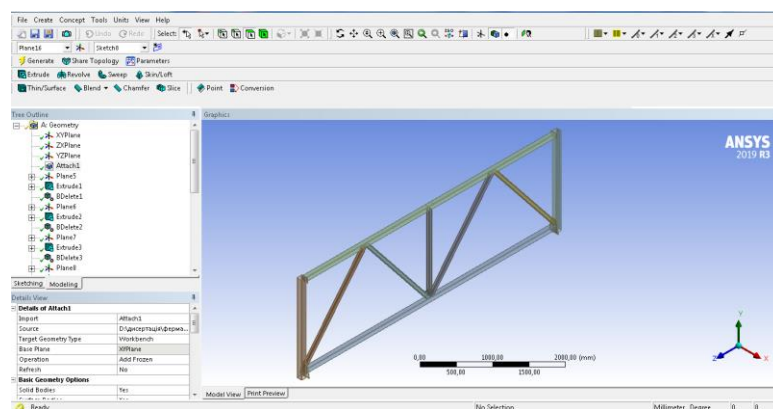


Рисунок 2.11 – Тривимірна модель зварної ферми

Четвертим етапом є визначення залишкових напружень після зварювання в навколошовних ділянках ферм. Для цього обираємо інтегрований тепловий модуль (Transient Thermal) (рис. 2.12) у якому проводим відповідні налаштування.

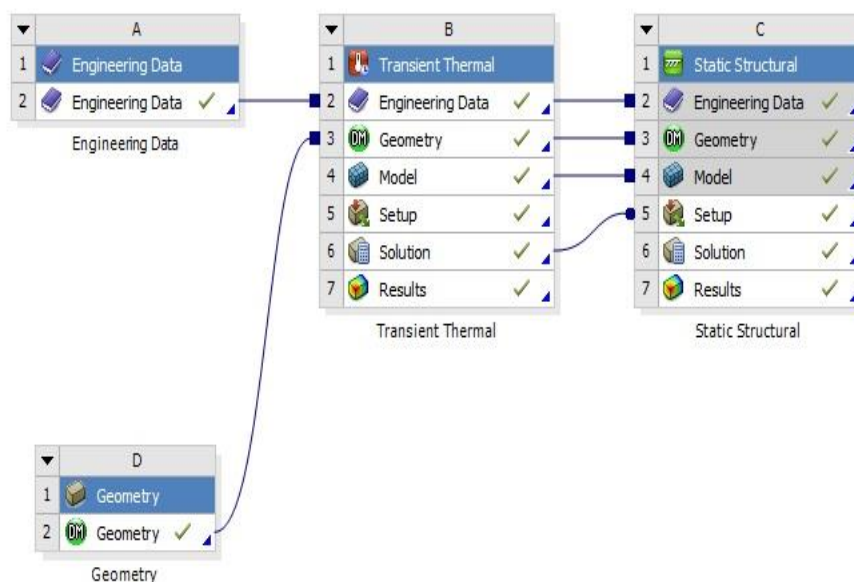


Рисунок 2.12 – Структурна схема отримання залишкових напружень

Першим кроком у центр геометрії зварного шва прикладається тепловий потік величиною в 1650°C , що відповідає умовам зварювання інверторним напівавтоматом. Другим кроком відбувається охолодження, тобто зниження температури до кімнатної, що становить 22°C . Отримані результати імпортуються у структурний модуль (Static Structural).

П'ятим етапом є генерація сітки скінчених елементів (Model) у структурному модулі Static Structural. За допомогою команди Mesh виконано розбиття моделі на скінченні елементи відповідно до її геометрії. Сітка генерується на геометричній моделі і є основою до вирішення рівнянь в матричному вигляді. Для даної моделі зварної ферми обрано генерацію сітки для розрахунку в нелінійній постановці (Nonlinear mechanical). Обрано тип скінченного елемента для елементів зварної ферми та зварного шва solid 226 (рис. 2.13).

SOLID226 Geometry

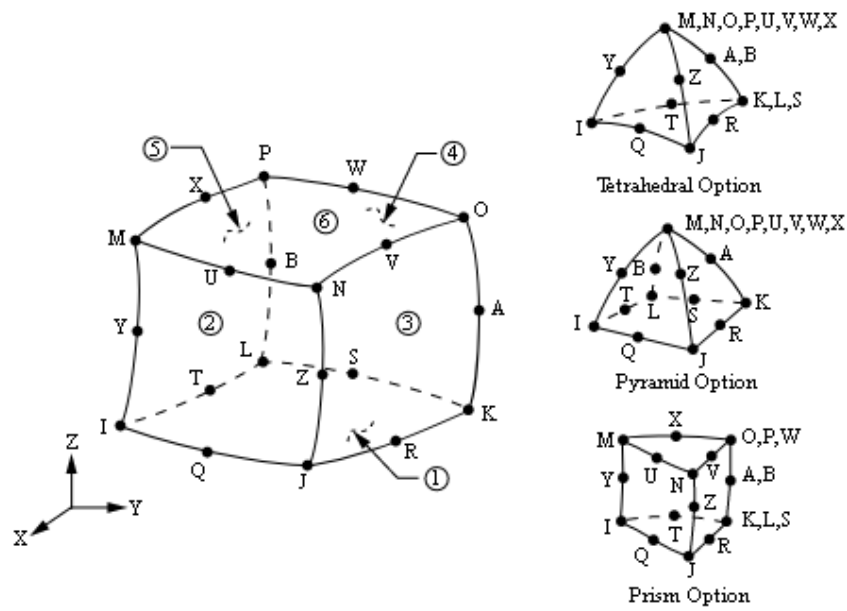


Рисунок 2.13 Набір скінченних елементів типу Solid 226 [100]

Геометрія обраного скінченного елемента містить в собі до 20 вузлових сполучень та може нараховувати до 6 ступеней вільності у вузлах. Скінченний елемент дає можливість враховувати залишкові напруження після зварювання, а також підтримує такі структурні можливості:

- структурний термічний;
- структурний дифузійний
- структурний статичний.

Розмір скінченно-елементної сітки варіюється в залежності від геометрії зварної ферми. Для ферми із безфасонковим виконанням розмір скінченного елемента становить $S_{\max} = 100\text{мм}$ та $S_{\min} = 1\text{мм}$. Для фізичної моделі становить $S_{\max} = 50\text{мм}$ та $S_{\min} = 1\text{мм}$.

При цьому зберігається можливість попереднього перегляду сітки (команда Preview) перед запуском на розрахунок, щоб оцінити її відповідність поставленій задачі.

Шостим етапом є задання параметрів розрахунку (Setup): опор (Supports), навантажень (Loads) та інерційних сил (Inertial). В даній моделі

наявні дві опори, крайня ліва опора забороняє будь-які переміщення конструкції та крайня права, що дозволяє переміщення зварної будівельної ферми по осі Z. Зовнішнє навантаження здійснено на центральний вузол верхнього поясу, що подано на рисунку 2.1, що ідентифікує експлуатаційний режим для такої конструкції.

Інерційна сила є заданням гравітаційного прискорення (Standart Earth Gravity), що моделює власну вагу конструкції. В системі СІ величина гравітаційного прискорення рівна $9,8 \text{ м/с}^2$.

Сьомий (Solution) (Results) етап є завершальним в структурі статичного міцнісного аналізу, який після виконання розрахунків дозволяють нам вибрати потрібні результати.

2.5 Структурна схема методики власних досліджень

За результатами аналізу методичних підходів до виявлення умов пошкодження й руйнування K-подібних вузлів плоских зварних ферм і виходячи з існуючої матеріальної бази для виконання експериментів, запропоновано структурну схему для власних досліджень (рис. 2.14).



Рисунок 2.14 – Структурна схема дослідження K-подібних вузлів зварних ферм

Схема включає комплексний підхід до виявлення умов пошкодження і руйнування К-подібних вузлів плоских зварних ферм, який полягає у поєднання натурного, напівнатурного й комп'ютерного моделюючого експерименту, дає можливість отримати результати з високим рівнем вірогідності і сформулювати узагальнення і рекомендації для проектування і експлуатації зварних ферм з К-подібними вузлами.

2.6 Висновки за розділом 2

1. Прийнято рішення про комплексне дослідження зварної ферми з К-подібними вузлами з поєднанням натурного, напівнатурного і комп'ютерного моделюючого експерименту.

2. Виявлено, що для дослідження пошкодження і руйнування ферм із К-подібними вузлами при дії циклічних та статичних навантажень доцільно розробити фізичну модель конструкції з дотриманням нормативних вимог ідентифікації та подібності, що дасть можливість отримати реальні результати із серії напівнатурних досліджень.

3. Прийнято рішення про використання для комп'ютерного моделюючого експерименту програми ANSYS, оскільки її можливості забезпечують виявлення умов пошкодження і руйнування зварних ферм з К-подібними вузлами при дії експлуатаційних навантажень з високим ступенем співпадання з фактичними показниками експлуатації натурних ферм.

РОЗДІЛ 3

ПОШКОДЖЕННЯ ВУЗЛІВ ПРИ ДІЇ СТАТИЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

3.1 Механічні властивості суцільного матеріалу для виготовлення зварних ферм

Найпоширенішим конструкційним матеріалом для виготовлення зварих ферм є сталь ВСтЗсп. Вона оптимально поєднує механічні властивості, зварюваність і ціну і, зазвичай, задовольняє конструктивні, технологічні й експлуатаційні вимоги до зварних фермових конструкцій.

Одним з визначальних чинників, які забезпечують точність розрахунку типової зварної ферми, є фактичні показники міцності матеріалу. Якщо вважати, що експлуатація конструкцій відбувається в межах пружних деформацій, то таким показником буде межа текучості матеріалу. Оцінка межі текучості матеріалу може виконуватися:

- за стандартами та сертифікатами якості металопрокату (на етапі проектування конструкції);
- за результатами випробувань на статичний розтяг стандартних зразків, виготовлених з наявного металопрокату (на етапі виготовлення зварних ферм);
- неруйнівними (опосередкованими) методами на етапі експлуатації конструкції:

$$\bar{\sigma}_T = 0,2\bar{HB} \quad (3.1)$$

Для формування вхідної інформаційної бази механічних характеристик виконано серію натурних експериментів по визначенню механічних властивостей сталі ВСтЗсп за стандартизованими методиками на сертифікованому випробувальному комплексі СТМ-100.

Для натурального експерименту використано стандартні плоскі зразки (рис. 3.1).

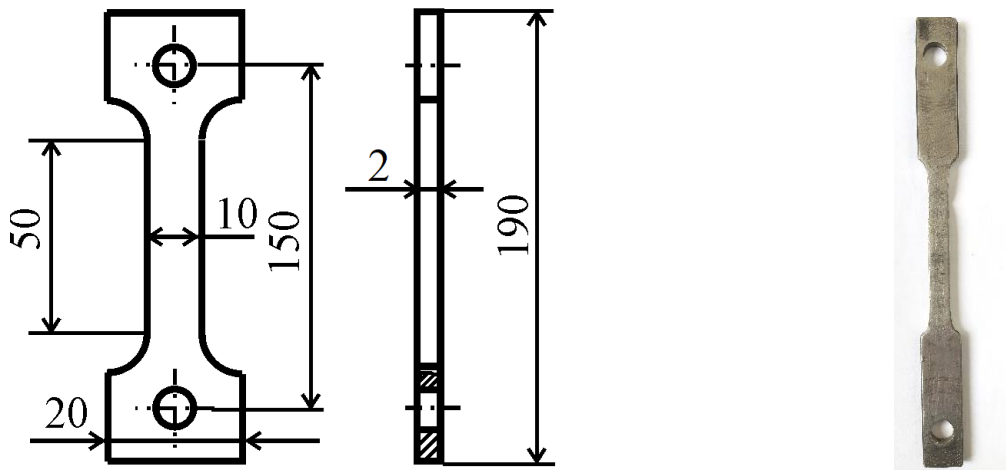


Рисунок 3.1 – Суцільного зразка для експериментального визначення показників міцності сталі ВСтЗсп за статичного розтягу

Заготовки для зразків вирізані з профільної труби 25x25x2 мм зі сталі ВСтЗсп вздовж напрямку вальцювання (рис. 3.2). Саме такий профіль використано для виготовлення фізичної моделі ферми (див. п. 2.3), яку досліджували натурним експериментом.

Інформацію про миттєві зусилля в процесі навантажування зразків отримано від динамометра, а деформацію – від накладного тензOMETричного давача 1, встановленого за допомогою опорних ножів 2 з пружинними затискачами 3 на зразкові 4 (рис. 3.3).

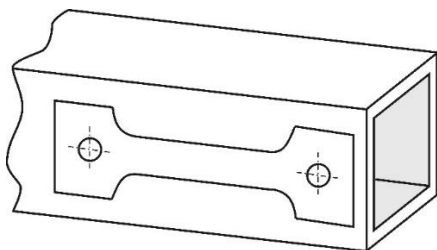


Рисунок 3.2 – Схема вирізки зразків з трубного металопрокату

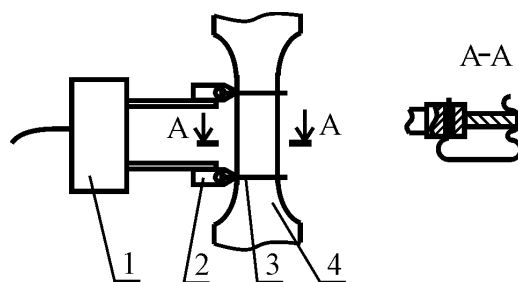


Рисунок 3.3 – Схема встановлення тензодавача для визначення поздовжньої деформації зразка

На статичну міцність при розтягуванні досліджено 20 зразків з суцільного матеріалу. Зразки отримано з 1 метра трубного металопрокату сталі ВСтЗсп по 4 штуки з п'яти ділянок (ділянка I, II, III, IV, V) вздовж труби.

Результати, отримані для суцільних зразків, подано в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

Механічні властивості сталі ВСтЗсп при розтягові
за результатами натурних досліджень суцільних зразків

Номер ділянки/ зразок	Межа текучості σ_T , Мпа	Межа міцності σ_B , Мпа	Відносне видовження δ , %	Номер ділянки/ зразок	Межа текучості σ_T , Мпа	Межа міцності σ_B , Мпа	Відносне видовження δ , %
1	2	3	4	1	2	3	4
I/1	245	378	18	III/3	270	367	18
I/2	258	367	16	III/4	276	372	22
I/3	279	358	20	IV/1	273	390	20
I/4	261	386	17	IV/2	269	368	19
II/1	273	368	15	IV/3	268	365	17
II/2	277	373	16	IV/4	264	360	16
II/3	285	393	18	V/1	291	406	21
II/4	280	374	20	V/2	278	375	16
III/1	273	377	22	V/3	270	385	17
III/2	265	368	21	V/4	260	357	19

Виконано статистичне опрацювання експериментально отриманих показників міцності. Визначено характеристики розсіювання механічних властивостей основного металу при розтягові. Результати подано в табл. 3.2.

Таблиця 3.2

Характеристики розсіювання механічних властивостей основного металу при розтягові сталі ВСт3сп за результатами натурних досліджень

Механічні властивості	Статистичні характеристики		
	Вибіркове середнє значення	Вибіркове середнє квадратичне відхилення	Дисперсія
Межа міцності	$\bar{\sigma}_\epsilon = 374$ МПа	$S_{\sigma_\epsilon} = 12,4$ МПа	$D_{\sigma_\epsilon} = 155,6$ МПа ²
Межа текучості	$\bar{\sigma}_T = 271$ МПа	$S_{\sigma_T} = 10,33$ МПа	$D_{\sigma_T} = 106,7$ МПа ²
Відносне видовження	$\bar{\delta} = 0,36$	$S_\delta = 0,012$	$D_\delta = 1,44 \times 10^{-4}$

Побудовано зведені графіки щільності розподілу механічних характеристик по межі текучості (рис. 3.4) і щільності розподілу механічних характеристик по межі міцності (рис. 3.5).

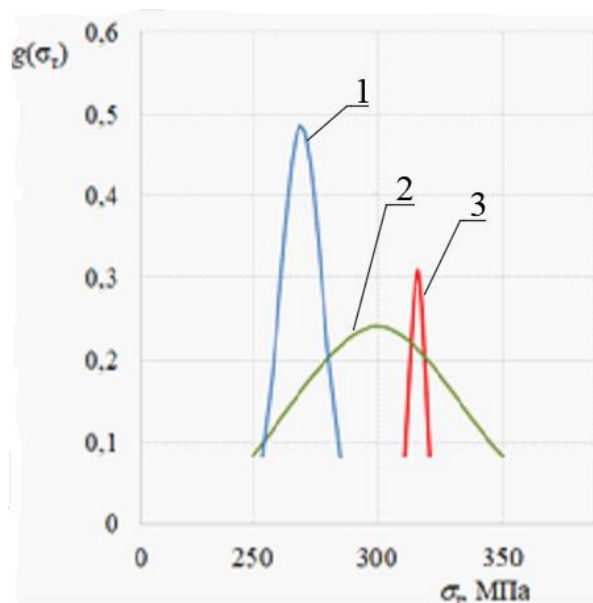


Рисунок 3.4 – Щільність розподілу механічних характеристик по межі текучості

- 1 – за результатами натурального експерименту; 2 – за вимогами ДСТУ;
3 – за інформацією з сертифікатів якості виробника

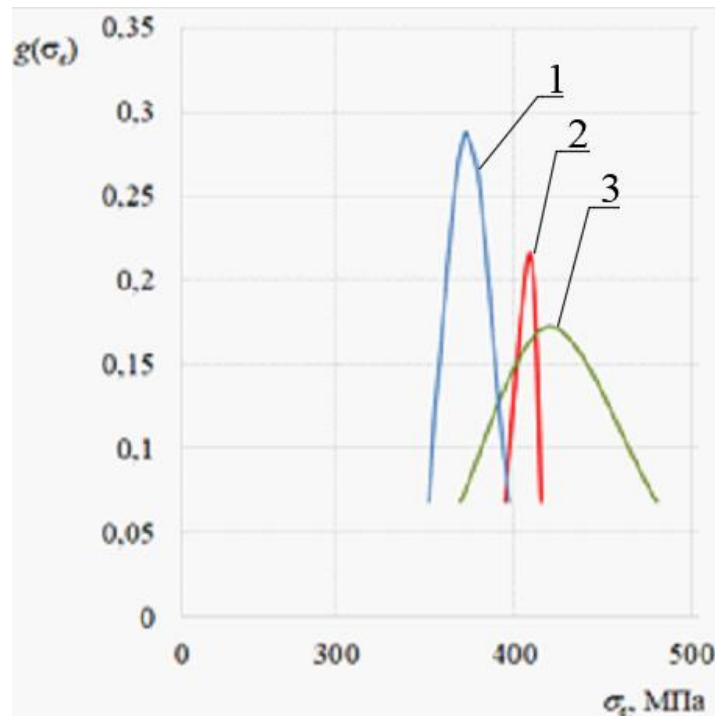


Рисунок 3.5 – Щільність розподілу механічних характеристик по межі міцності
1 – за результатами натурального експерименту; 2 – за вимогами ДСТУ;
3 – за інформацією з сертифікатів якості виробника

Проаналізувавши рис. 3.4 і 3.5 очевидним є, що для отримання розрахункових результатів з високим рівнем співпадання з експлуатаційними показниками ферм, доцільним є виконання натурних досліджень механічних властивостей матеріалу саме тієї поставочної партії, з якої виготовляється зварна конструкція.

Надалі саме показники міцності, отримані експериментально, буде використано в якості вхідної інформаційної бази при виконанні комп'ютерного моделюючого експерименту.

3.2 Механічні властивості матеріалів зі зварними швами

Для формування вхідної інформаційної бази при виконанні комп'ютерного моделюючого експерименту виконано дослідження механічних властивостей сталі ВСтЗсп на зразках зі зварними швами.

На статичну міцність при розтягуванні досліджено 20 зварних зразків (рис. 3.6).

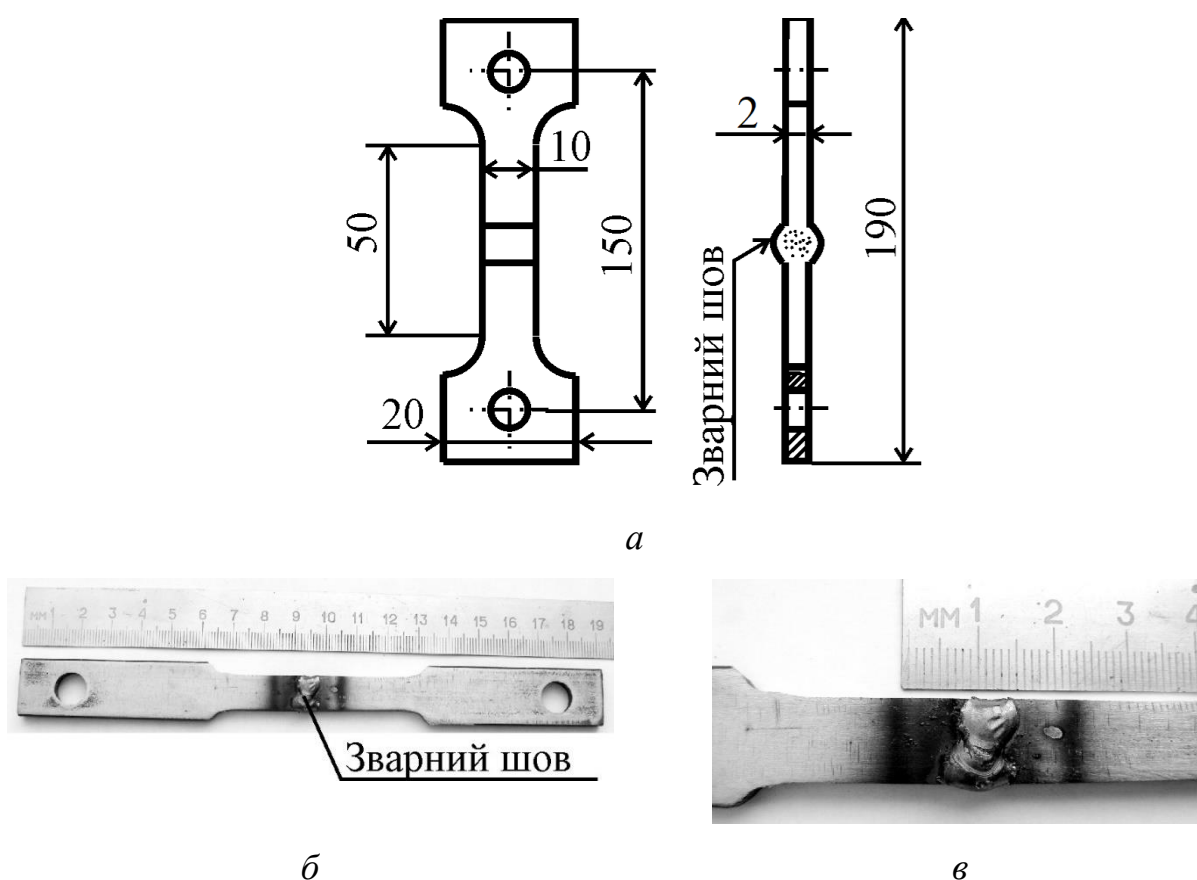


Рисунок 3.6 – Зварний зразок для дослідження показників міцності:
а – конструкція; *б* – загальний вигляд; *в* – область термічного впливу на ньому

Конструкція зразка для визначення показників міцності зварного шва (рис. 3.6, *а*) аналогічна до зразка з суцільного матеріалу. Зварний шов виконано напівавтоматичним дуговим зварюванням постійним струмом

$I=110A$ дровим електродом діаметром 1,2 мм Св-08Г2С в захисному середовищі CO_2 за стандартизованою технологією.

Результати, отримані для зварних зразків, подано в табл. 3.3.

Таблиця 3.3

Механічні властивості зварного шва сталі ВСтЗсп при розтягові за результатами натурних досліджень зварних зразків

Номер ділянки	Межа міцності σ_s (МПа) для зварних зразків			
	1	2	3	4
I	274	288	283	286
II	282	261	310	314
III	290	283	266	313
IV	303	301	289	284
V	278	325	287	290
	Умовна межа текучості $\sigma_{0,2}$ (МПа) для зварних зразків			
I	242	254	248	252
II	245	249	253	248
III	256	243	241	246
IV	257	253	241	253
V	254	251	253	244

Виконано статистичне опрацювання експериментально отриманих показників міцності для зварних зразків, аналогічно п. 3.1. Визначено характеристики розсіювання механічних властивостей зварних зразків при розтягові. Результати використано в базі для комп'ютерного моделюючого експерименту при визначенні пошкоджуваності і руйнування вузлів зварих ферм.

3.3 Натурні дослідження поведінки безфасонкової зварної ферми при навантажуванні

Виконано силовий експеримент для виявлення поведінки натурної зварної ферми при дії зосередженого статичного навантаження за спареною схемою згідно методики, описаної в п. 2.2. Навантаження до середнього вузла ферми покроково збільшували на 5 кН. При цьому визначали поточне значення сили (P , кН) і відповідне значення прогину нижнього пояса ферми (δ , мм) (табл. 3.4).

Таблиця 3.4

Експериментальні результати для побудови діаграми деформування ферми

P , кН	δ , мм	P , кН	δ , мм
5	0,27	25	1,33
10	0,54	30	1,61
15	0,79	32	1,74
20	1,06		

Одночасно експериментальні точки заносили на діаграму деформування (рис. 3.7). За отриманою діаграмою очевидно, що прогин ферми відбувається в пружному діапазоні деформацій.

Однак в процесі експерименту візуально виявлено, що при силі $P=32$ кН в місці прикладання навантажень на верхній стінці верхнього поясу починає формуватися пошкодження у вигляді локальної вм'ятини, а бокові стінки профільної труби навпроти цього місця випучуються. Для збереження досліджуваної ферми в стані, придатному до експлуатації, подальше навантажування не виконували.

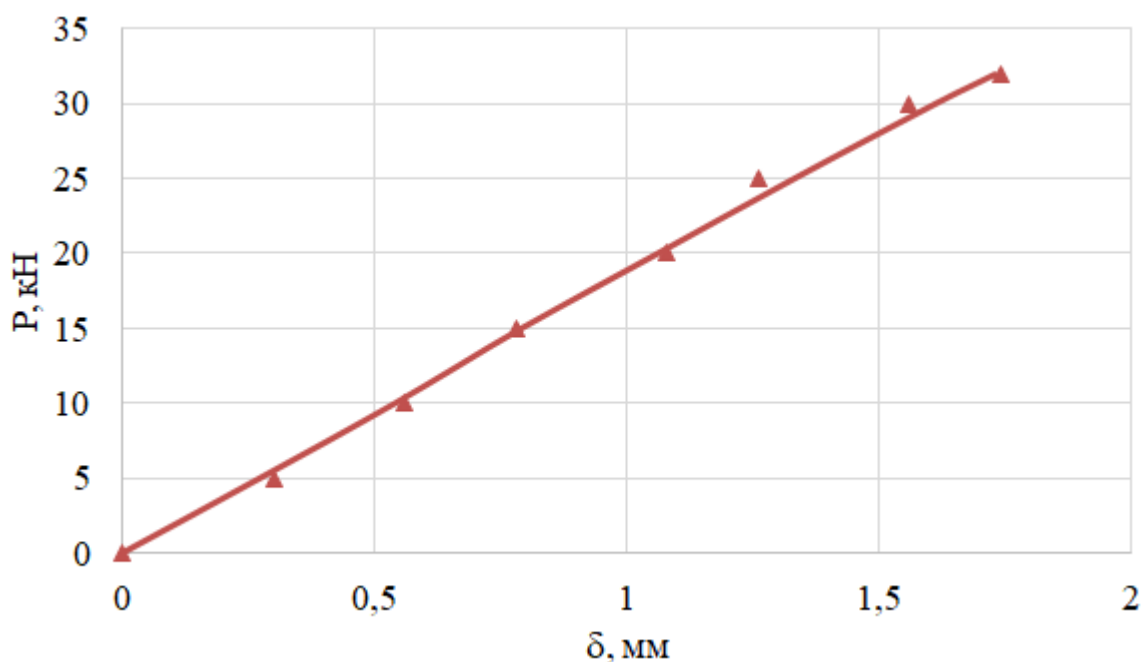


Рисунок 3.7 – Діаграма деформування ферми за результатами натурального експерименту

В процесі експерименту виявлено, що в місці прикладання навантажень на верхній стінці верхнього поясу формується пошкодження у вигляді локальної вм'ятини, а бокові стінки профільної труби навпроти цього місця випучуються.

Після виконаних досліджень ферму передали виробнику ТОВ «Смарттехбуд» для монтажу і використання в режимі експлуатаційних навантажень. Це дало можливість зменшити витрати для виготовлення спеціальних дослідних зразків і продовжити спостереження за поведінкою ферми при її експлуатації.

3.4 Моделювання пошкоджуваності натурної безфасонкової зварної ферми комп'ютерним моделюючим експериментом

3.4.1 Деформування нижнього пояса ферми

Виконано дослідження за методикою комп'ютерного моделюючого експерименту для натурної ферми, описаною в п. 2.5.

Для дослідження створено тривимірну модель для натурної безфасонкової ферми (рис. 3.8).

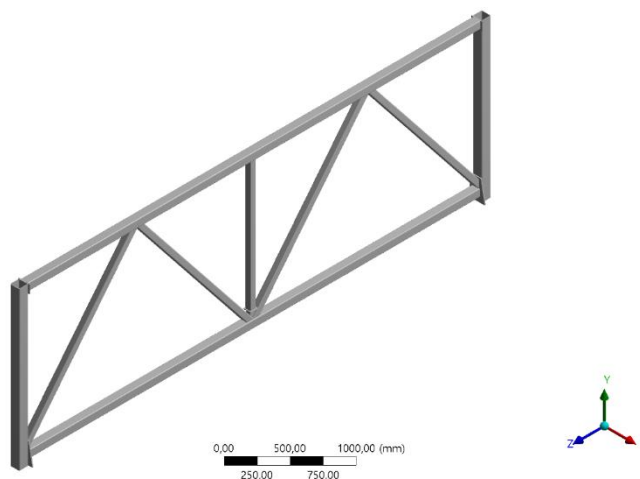


Рисунок 3.8 – Тривимірна модель для натурної безфасонкової ферми

В процесі моделювання виконано візуалізація розподілу напружень в центральній частині нижнього поясу (рис. 3.9). Розкоси і стійки умовно не показані, а залишено лише їх вплив.

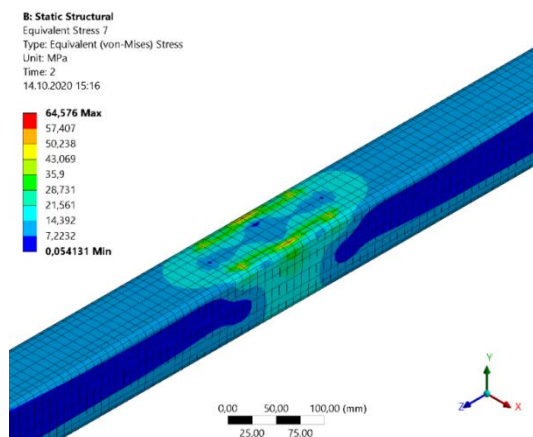


Рисунок 3.9 – Візуалізація розподілу напружень в центральній частині нижнього поясу

Візуалізовано факт локалізації максимальних напружень посередині поясу в місті приварювання стійки. Побудовано діаграму розподілу напружень по довжині нижнього поясу для різних навантажень на ферму в діапазоні від 10 до 60 кН (рис. 3.10).

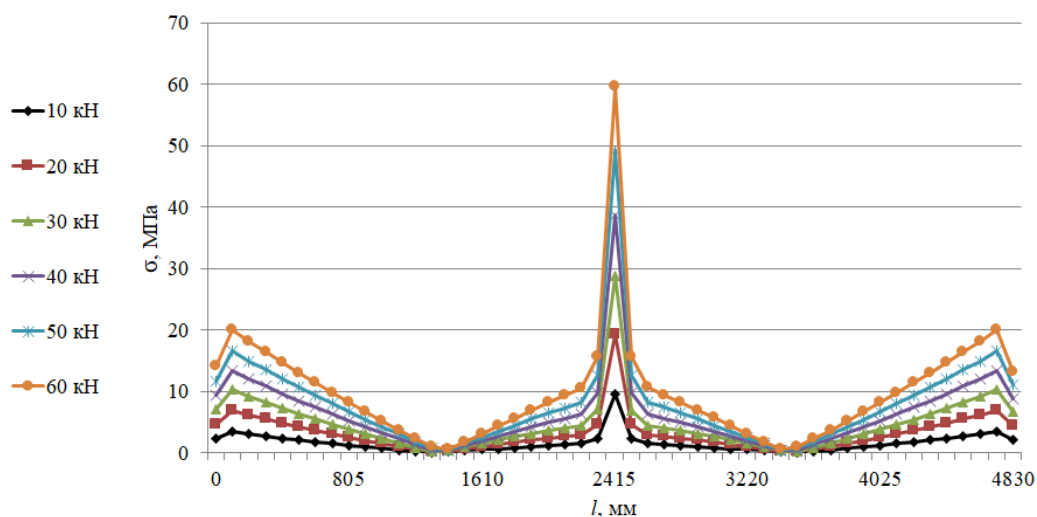


Рисунок 3.10 – Діаграма розподілу напружень вздовж нижнього поясу

Ця діаграма підтверджує факт локалізації максимальних напружень посередині поясу в місті приварювання стійки і визначає чисельні значення цих напружень.

За результатами комп'ютерного моделюючого експерименту побудовано діаграму деформації прогину нижнього поясу ферми (рис. 3.11).

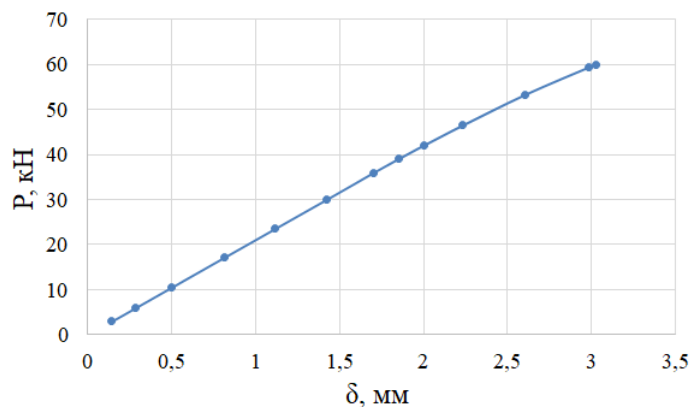


Рисунок 3.11 – Діаграма деформації прогину нижнього поясу

Виявлено, що при навантаженнях до 60 кН відбувається лінійна деформація і нижній пояс не є тим конструктивним елементом, де формується пошкодження чи руйнування ферми.

Суміщено діаграми деформування нижнього поясу ферми за результатами натурального і комп'ютерного моделюючого експериментів (рис. 3.12).

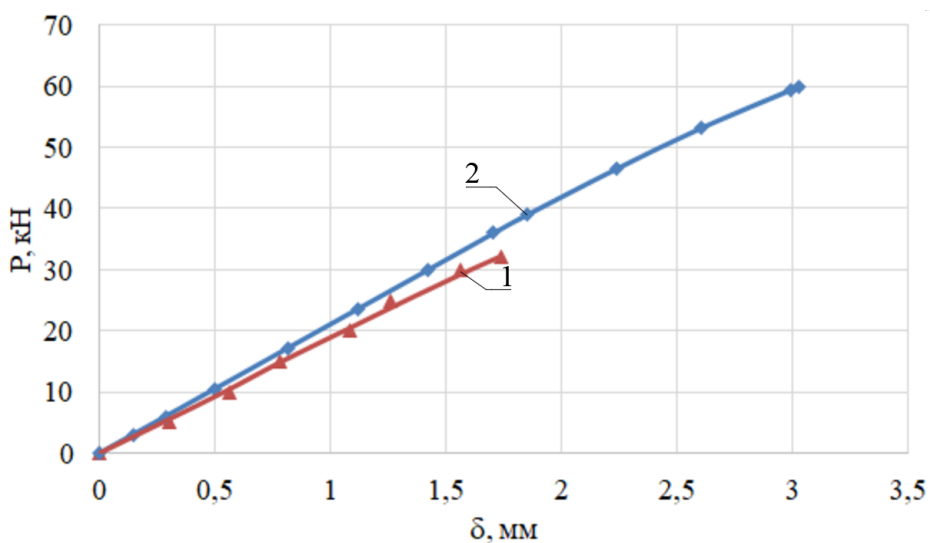


Рисунок 3.12 – Суміщені діаграми деформування нижнього поясу ферми за результатами натурального (1) і комп'ютерного моделюючого (2) експериментів

Виконано верифікацію результатів комп'ютерного моделюючого експерименту, порівнявши діаграми деформування нижнього поясу повномасштабної безфасонкової ферми з результатами натурального силового експерименту (див. п. 3.3). Визначали ступінь співпадання за формулою 3.2

$$C_{\%} = \left(1 - \frac{[\delta_{\text{Нат}} - \delta_{\text{КМЕ}}]}{\delta_{\text{Нат}}}\right) \cdot 100\% \quad (3.2)$$

де $\delta_{\text{нат}}$ – прогин за результатами натурних випробувань, $\delta_{\text{КМЕ}}$ – прогин за комп'ютерного моделюючого експерименту.

Чисельні показники збіжності подано у табл.3.5

Таблиця 3.5

Ступінь співпадання показників прогину нижнього поясу натурної ферми

Навантаження, кН	Деформація, δ мм		C, %
	Натурний, $\delta_{\text{нат}}$	КМЕ, $\delta_{\text{КМЕ}}$	
$P_1 = 10$	0,54	0,5	92,6
$P_2 = 20$	1,06	0,97	91,5
$P_3 = 30$	1,65	1,48	89,6
$P_4 = 32$	1,74	1,52	87,5

Виявлено, що співпадання величини прогину нижнього пояса ферми за результатами комп'ютерного моделюючого експерименту в порівнянні з результатами натурального експерименту на межі пружної деформації конструкції становить 87,5%. При зменшенні навантажень співпадання прогинів підвищується.

3.4.2 Деформування верхнього пояса ферми

При дослідженні прогинів нижнього пояса ферми виявлено, що в процесі навантажування відбувається суттєве локальне пошкодження ділянки прикладання сили на верхньому поясі, яке проявляється у втисканні верхньої стінки профільної труби внаслідок концентрації значних напружень.

Отримано візуалізацію деформацій по верхній стінці верхнього поясу зварної ферми (рис. 3.13), розподіл деформацій по верхньому поясу зварної ферми при різних навантаженнях (рис. 3.14) та діаграму локального деформування верхньої стінки верхнього пояса (рис. 3,15).

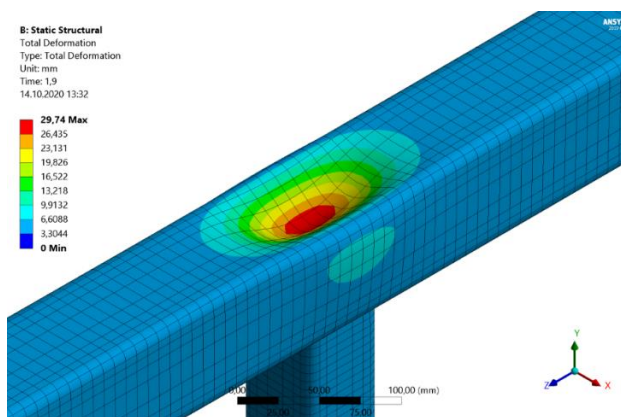


Рисунок 3.13 – Візуалізація деформацій по верхньому поясу зварної ферми

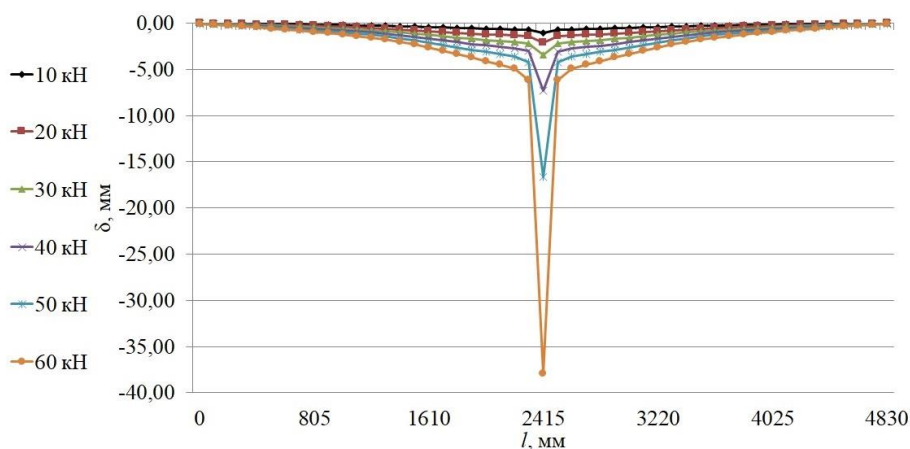


Рисунок 3.14 – Розподіл деформацій вздовж верхньої стінки верхнього поясу зварної ферми

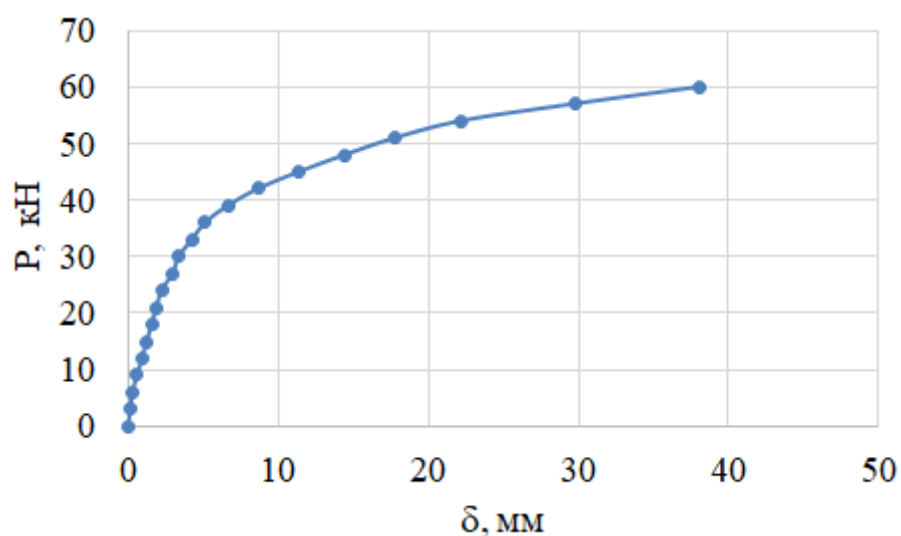


Рисунок 3.15 – Діаграма локального деформування верхньої стінки верхнього поясу

За результатами комп'ютерного моделюючого експерименту отримано візуалізацію розподілу еквівалентних напружень по верхній стінці верхнього поясу (рис. 3.16).

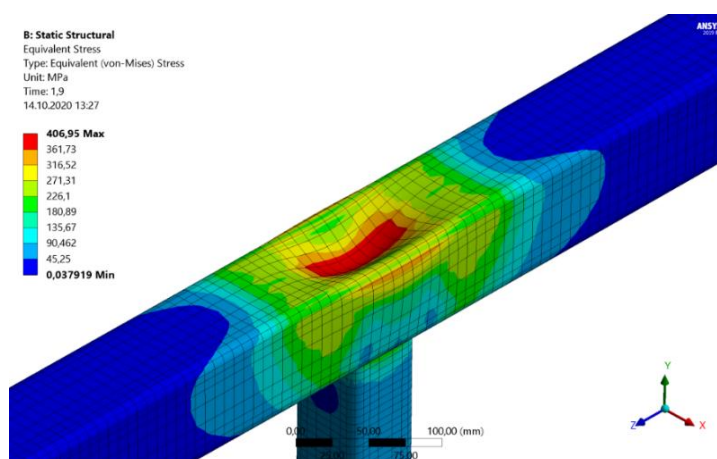


Рисунок 3.16 – Візуалізація розподілу еквівалентних напружень по верхній стінці верхнього поясу

Побудовано діаграму розподілу напружень по верхній стінці верхнього поясу у центральному вузлі (рис. 3.17).

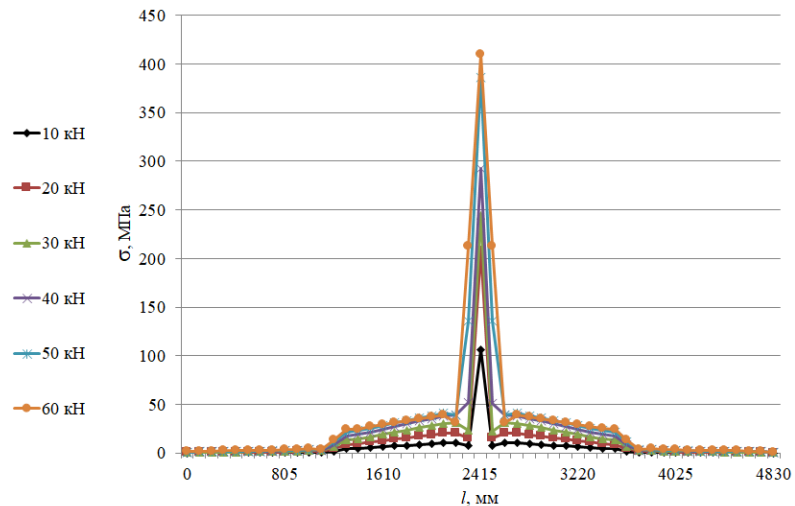


Рисунок 3.17 – Діаграма розподілу напружень по верхній стінці верхнього поясу у центральному вузлі

Виявлено локальний пік напружень у місці прикладання навантажень. За рахунок цього відбувається пошкодження ферми, яке проявляється не лише у протисканні верхньої стінки труби верхнього поясу, а й випучування бокових стінок навпроти місця прикладання навантажень.

Побудовано діаграми розподілу напружень по бічній стінці верхнього поясу у центральному вузлі (рис. 3.18) та розподілу напружень по нижній стінці верхнього поясу у центральному вузлі (рис. 3.19), які підтверджують факт локалізації пікових напружень в усіх елементах вузла прикладання навантажень, в т.ч. і в центральній стійці.

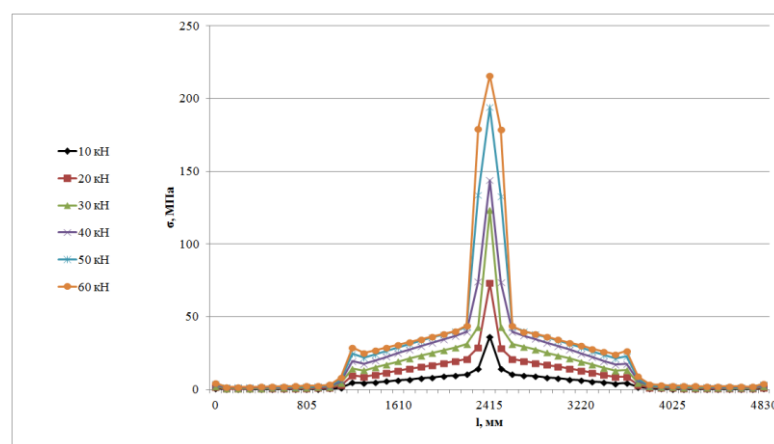


Рисунок 3.18 – Діаграма розподілу напружень по бічній стінці верхнього поясу у центральному вузлі

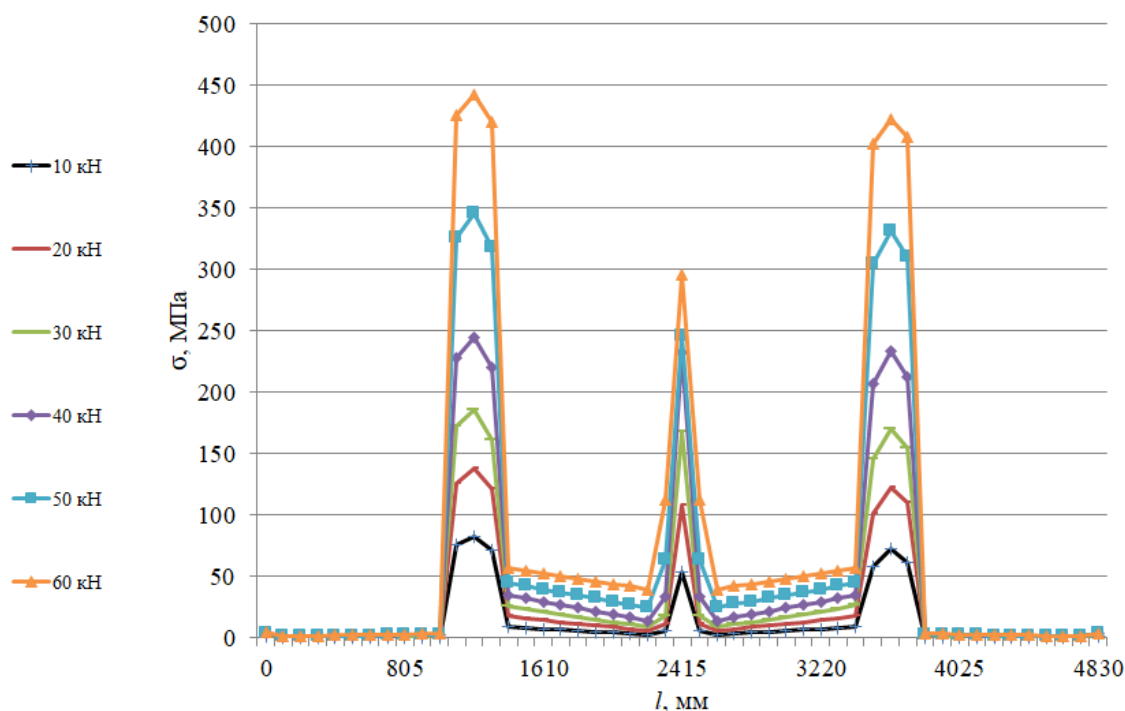


Рисунок 3.19 – Діаграма розподілу напружень по нижній стінці верхнього поясу у центральному вузлі

Для виявлення міцності і стійкості центральної стійки візуалізовано розподіл напружень в околі вершини центральної стійки (рис. 3.20), побудовано діаграму розподілу напружень по довжині центральної стійки (рис. 3.21).

B: Static Structural
 Equivalent Stress 5
 Type: Equivalent (von-Mises) Stress
 Unit: MPa
 Time: 2
 14.10.2020 15:12

287 Max
 256,68
 226,35
 196,03
 165,7
 135,38
 105,05
 74,727
 44,402
 14,078 Min

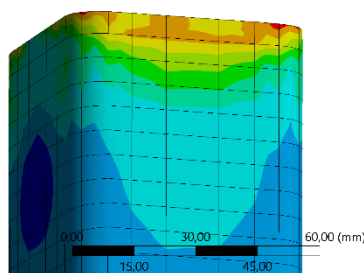


Рисунок 3.20 – Візуалізація розподілу напружень в околі вершини центральної стійки

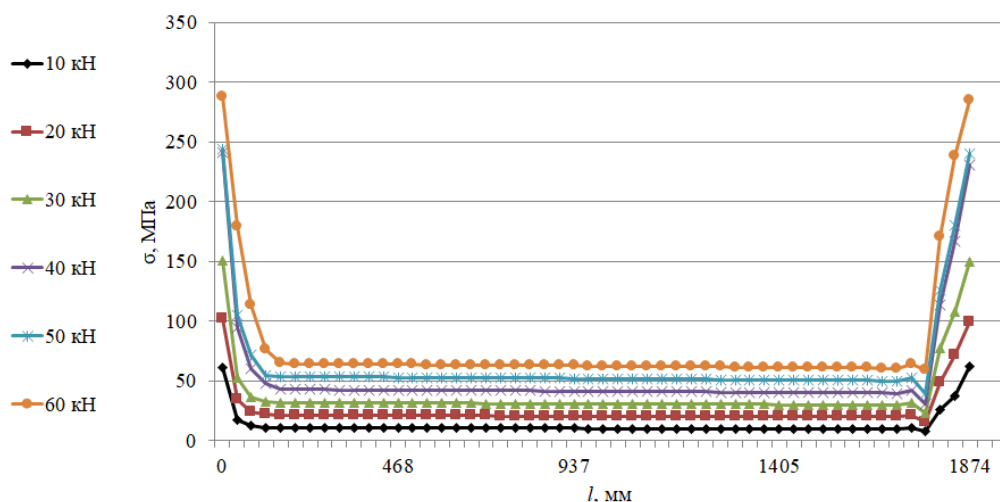


Рисунок 3.21 – Діаграма розподілу напружень по довжині центральної стійки

Факт локального деформування верхньої стінки верхнього пояса в місці прикладання навантаження виявлено і при виконанні натурального силового експерименту для повномасштабної ферми. Для порівняння результатів комп'ютерного моделюючого та натурального експериментів побудовано суміщені діаграми локального деформування верхнього поясу в місці прикладання навантаження (рис. 3.22).

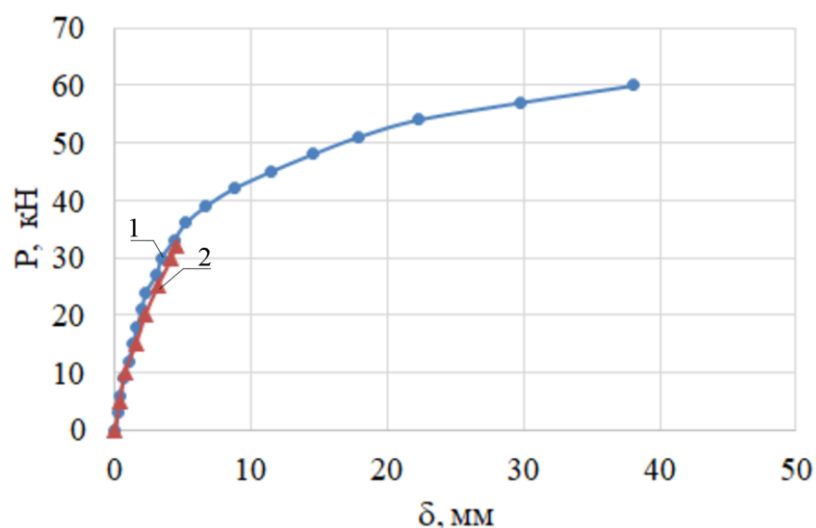


Рисунок 3.22 – Суміщені діаграми локального деформування верхнього поясу в місці прикладання навантаження за результатами комп'ютерного моделюючого (1) та натурального (2) експериментів

Розрахунок ступеня співпадання виконаний за формулою (3.2).

Отримано задовільне співпадання деформацій в діапазоні прикладених експериментальних навантажень (табл.3.6).

Таблиця 3.6

Ступінь співпадання локального деформування на верхньому поясі
натурної ферми

Навантаження, кН	Деформація, δ мм		С, %
	Натурний, $\delta_{\text{нат}}$	КМЕ, $\delta_{\text{кме}}$	
$P_1 = 10$	0,77	0,71	92,2
$P_2 = 20$	2,38	2,18	91,5
$P_3 = 30$	4,11	3,72	90,5
$P_4 = 32$	4,43	4	90,3

За результатами виконаних досліджень виявлено, що при підвищенні навантажень пошкодження ферми, в першу чергу, відбувається внаслідок локальної деформації верхньої стінки верхнього пояса в місці прикладання навантажень без пошкодження вузлів (див. рис. 3.9). Виходячи з цього, розроблено ряд конструктивних підходів, які дають можливість підвищити несучу здатність ферми.

3.4.3 Підсилення ділянки прикладання навантажень на верхньому поясі ферми

Виходячи з отриманих результатів досліджень, запропоновано підсилення місця прикладання навантаження двома спареними кутниками 45x45x5 довжиною 300 мм. (рис. 3.23). Отримано візуалізація розподілу напружень по верхньому поясі на ділянці підсилення центрального верхнього вузла (рис. 3.24), діаграму локального деформування верхнього поясу зварної ферми із підсиленням центральним верхнім вузлом (рис. 3.25).

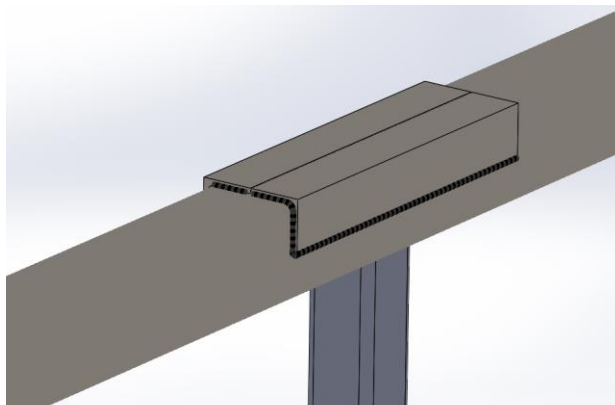


Рисунок 3.23 –Тривимірна модель вузла із підсиленням верхнім поясом

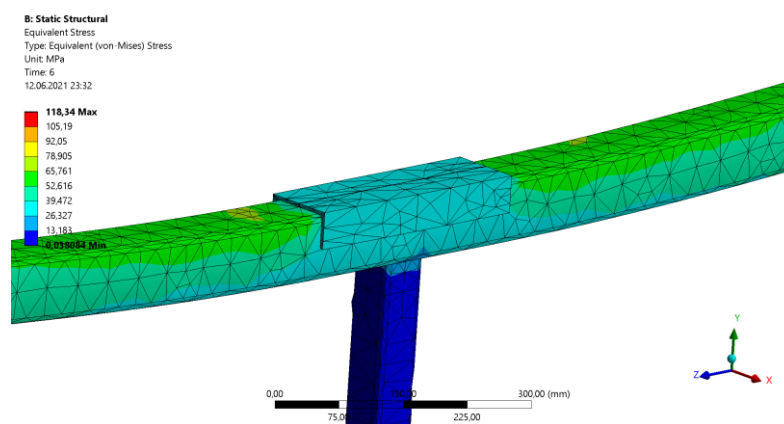


Рисунок 3.24 – Візуалізація розподілу напружень по верхньому поясі на ділянці підсилення центрального верхнього вузла

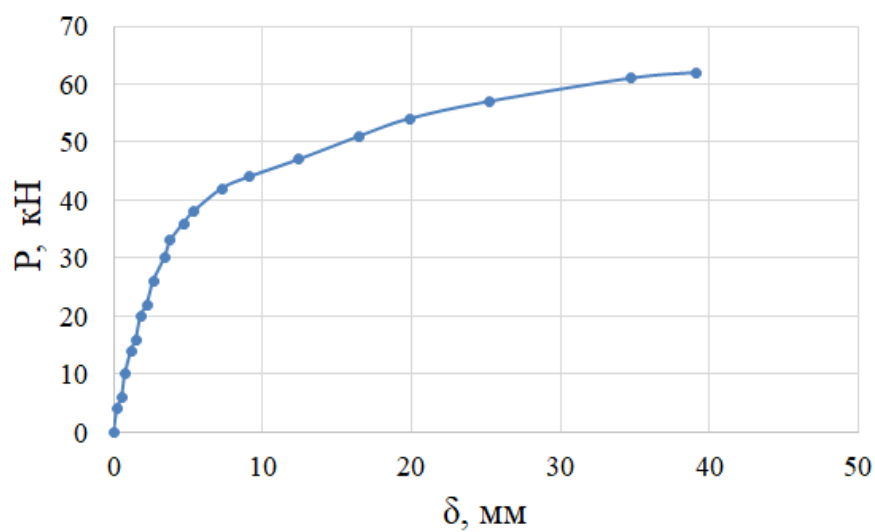


Рисунок 3.25 – Діаграма локального деформування верхнього поясу з підсиленням центральним верхнім вузлом в місці прикладання навантаження

Побудовано суміщені діаграми локального деформування верхнього поясу без підсилення та з підсиленням центральним верхнім вузлом (рис. 3.26), які свідчать про доцільність прийнятого конструктивного рішення щодо локального зміцнення контактної ділянки в місці прикладання навантаження.

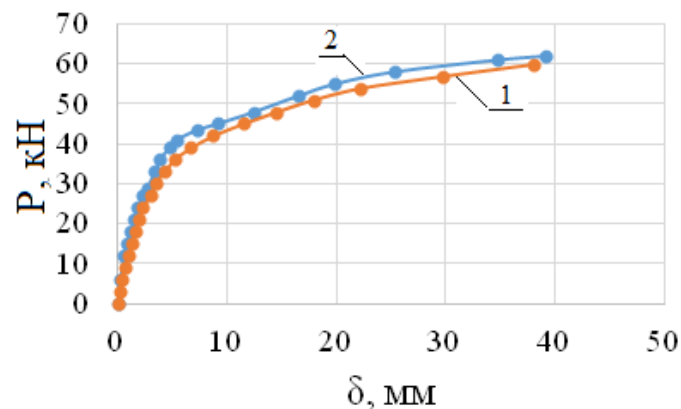


Рисунок 3.26 – Суміщені діаграми локального деформування верхнього поясу без підсилення (1) та з підсиленням центральним верхнім вузлом (2)

Виявлено, що за результатами підсилення збільшення жорсткості ферми в нижньому діапазоні навантажень (до 25 кН) мало помітне, однак вже при навантаженнях 30...40 кН вона збільшується на 7,6 %.

Проаналізувавши діаграму локального деформування верхнього поясу зварної ферми з підсиленням центральним верхнім вузлом в місці прикладання навантаження (рис. 3.25) очевидно, що навантаження на ферму 37,2 кН є граничними для пружного деформування матеріалу в місці прикладання зусиль. Навантаження понад 37,2 кН зумовлюватимуть пошкодження за рахунок пластичної деформації контактної ділянки на верхньому поясі аж до настання граничного стану.

Визначено деформації вздовж верхнього поясу зварної ферми з підсиленням центральним верхнім вузлом при різних навантаженнях (рис. 3.27).

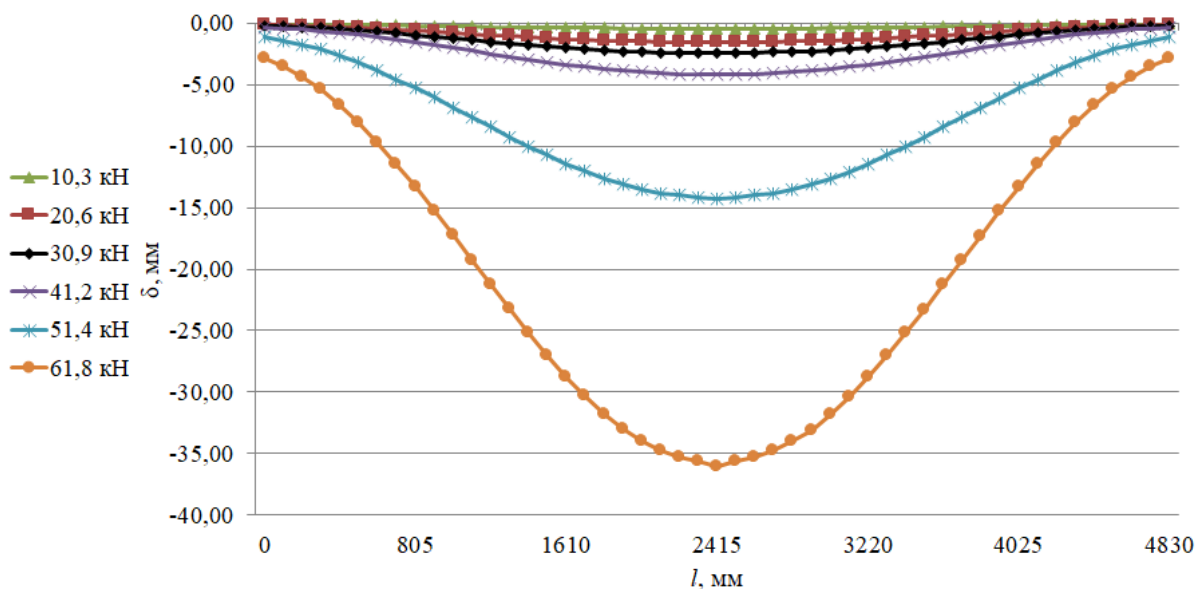


Рисунок 3.27 – Деформація вздовж верхнього поясу зварної ферми з підсиленням центральним верхнім вузлом при різних навантаженнях

Побудовано діаграму прогинів верхнього поясу (рис. 3.28).

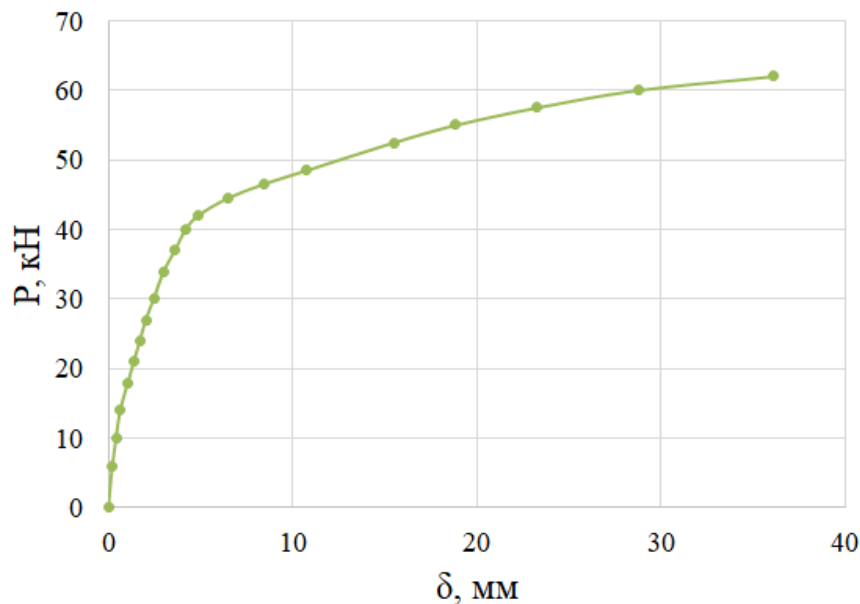


Рисунок 3.28 – Діаграма прогинів верхнього поясу

Проаналізувавши діаграму прогинів верхнього поясу (рис. 3.28) очевидно, що навантаження на ферму 40,1 кН є граничними для пружного деформування прогином матеріалу верхнього поясу. Навантаження понад 40,1 кН зумовлюватимуть пластичну деформацію верхнього поясу аж до настання граничного стану.

Визначено розподіл напружень по верхній стінці (рис. 3.29), бічній стінці (рис. 3.30) та нижній стінці (рис. 3.31) верхнього поясу із підсиленням центральним верхнім вузлом.

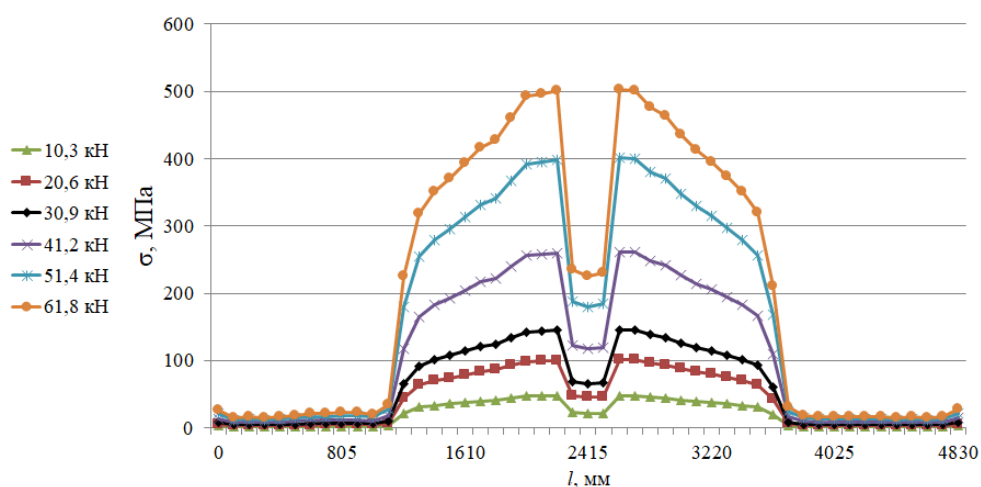


Рисунок 3.29 – Розподіл напружень по верхній стінці верхнього поясу з підсиленням центральним верхнім вузлом

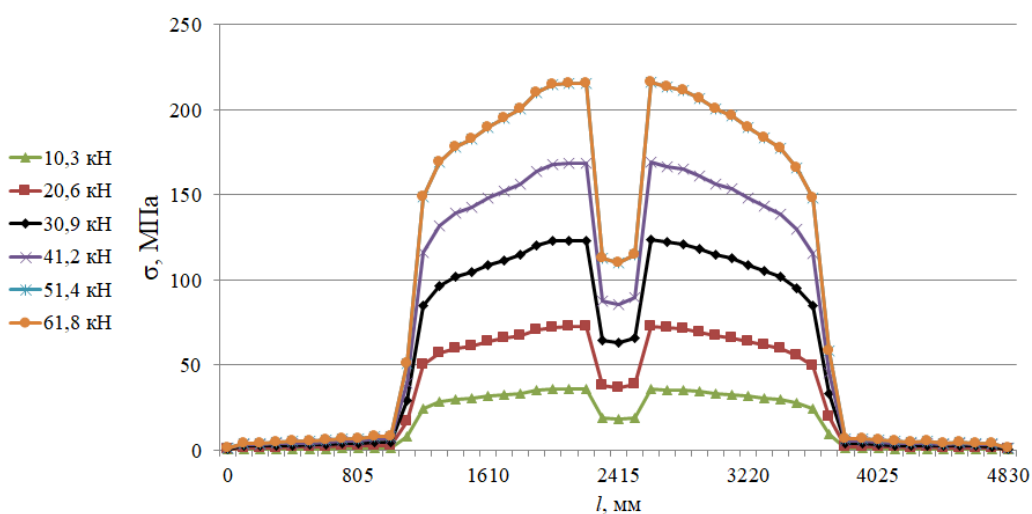


Рисунок 3.30 – Розподіл напружень по бічній стінці верхнього поясу із підсиленням центральним верхнім вузлом

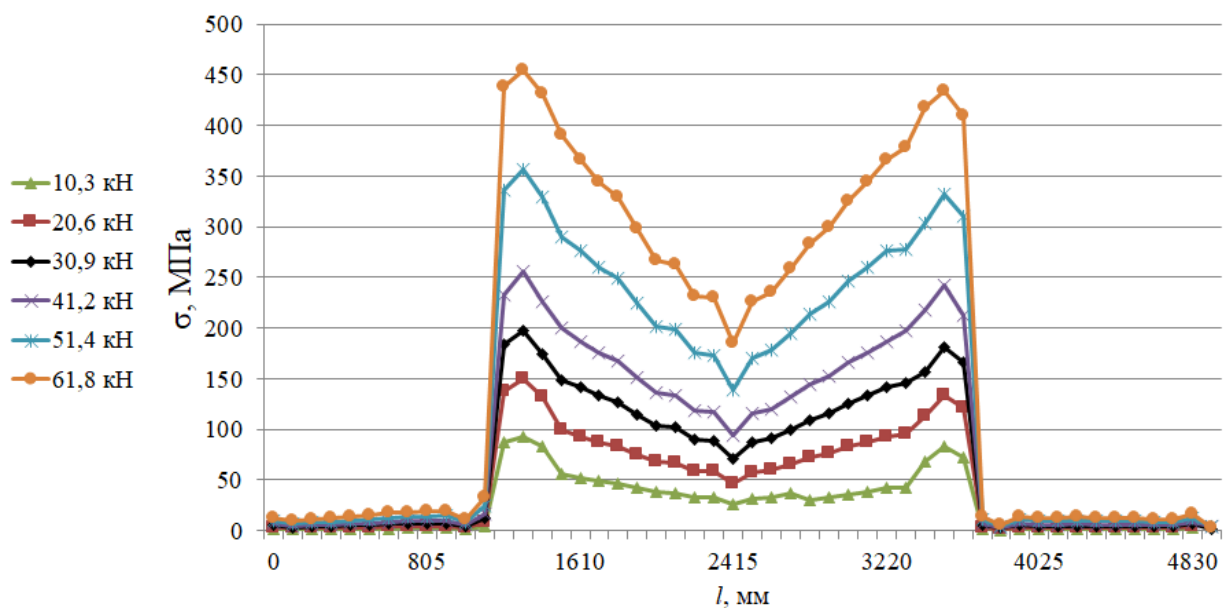


Рисунок 3.31 – Розподіл напружень по нижній стінці верхнього поясу з підсиленням центральним верхнім вузлом

Визначено розподіл напружень вздовж нижнього поясу із підсиленням центральним верхнім вузлом (рис. 3.32).

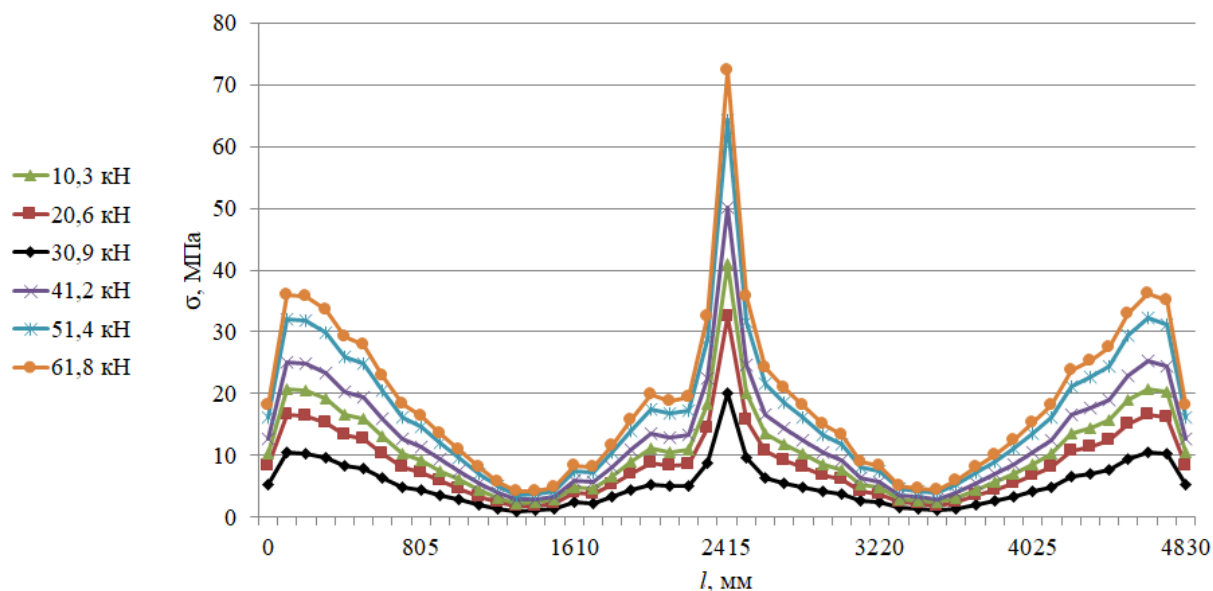


Рисунок 3.32 – Розподіл напружень вздовж нижнього поясу з підсиленням центральним верхнім вузлом

Проаналізувавши розподіли напружень в елементах ферми (рис. 3.29...3.32) очевидно, що максимальні напруження ,окрім контактної ділянки, також локалізуються в К-подібних вузлах . Для підвищення несучої здатності ферми доцільно внести конструктивні зміни, які зменшать ці напруження.

Побудовано діаграму деформування нижнього поясу із підсиленням центральним верхнім вузлом (рис. 3.33).

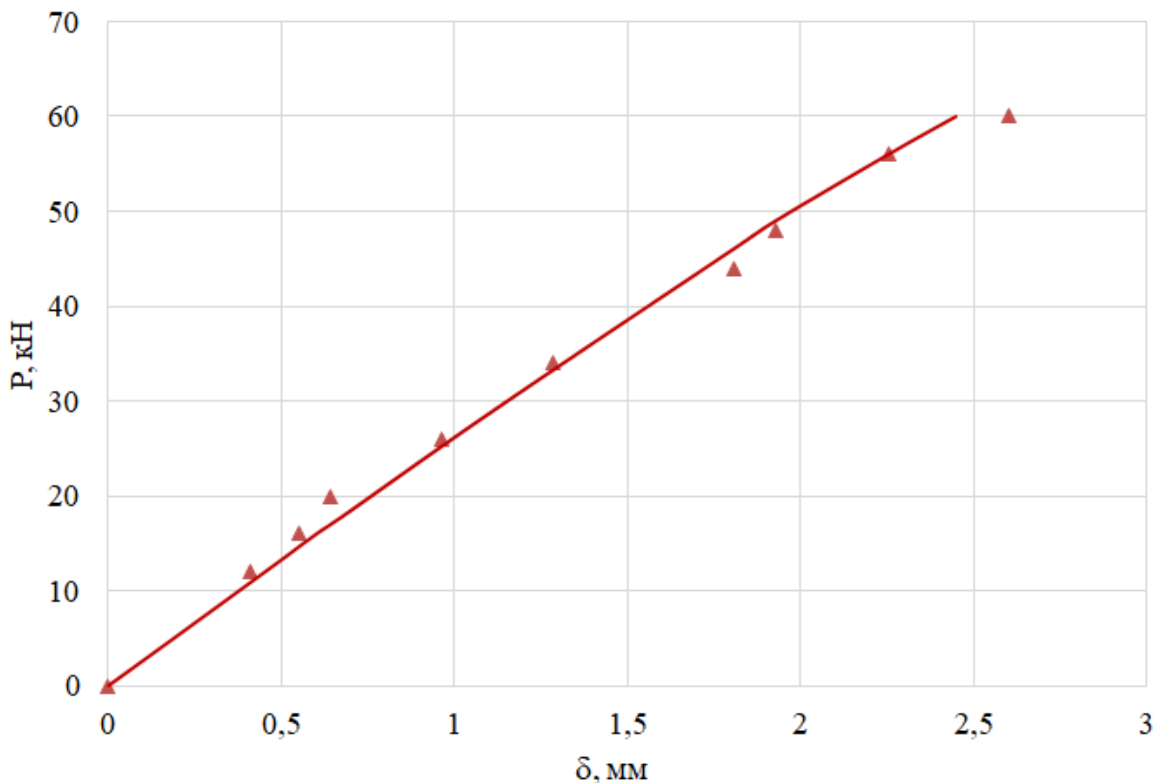


Рисунок 3.33 – Діаграма деформування нижнього поясу з підсиленням центральним верхнім вузлом

Виявлено, що по нижньому поясі зварної ферми не виникає пластичних деформацій до величини зовнішнього навантаження в 60 кН..

Побудовано суміщені діаграми деформування нижнього поясу без підсилення та з підсиленням центральним верхнім вузлом (рис. 3.33).

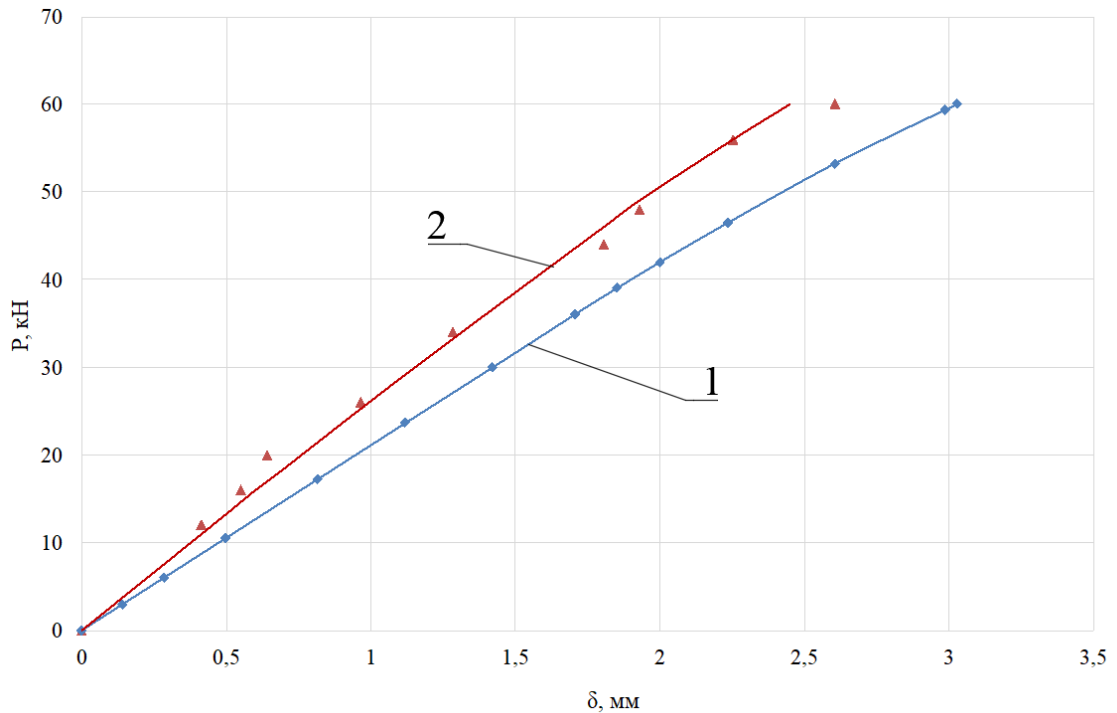


Рисунок 3.33 – Суміщені діаграми деформування нижнього поясу без підсилення (1) та з підсиленням центральним верхнім вузлом (2)

Виявлено, що за результатами підсилення жорсткість ферми в нижньому діапазоні навантажень (до 25 кН) зростає на 8,5%, а в середньому (30...40 кН) та верхньому (40...60 кН) діапазонах пружних навантажень збільшується на 13,2 %.

Співставляючи отримані результати досліджень та аналіз рис. 3.25, 3.28 і 3.33 очевидно, що визначальною для несучої здатності ферми є контактна ділянка на верхній частині верхнього поясу. Саме тут в першу чергу сформуються напруження, які будуть зумовляти пошкодження і руйнування конструкції. К-подібні вузли, які є предметом дослідження в роботі, не є тим місцем де першочергово формуються пошкодження, які зумовлюватимуть руйнування конструкції.

3.5 Пошкодження і руйнування масштабного зразка зварної ферми напівнатурним експериментом

Напівнатурні дослідження зварної ферми з К-подібними вузлами виконано на фізичній моделі (масштабному зразку) ферми згідно методики, описаної в п. 2.2 (рис. 3.34).



Рисунок 3.34 – Фізична модель зварної ферми перед прикладанням статичного навантаження (*а*) та після локального пошкодження (*б*)

Статичні навантаження задавалися від блоку керування випробувальним комплексом СТМ-100 покроково через 0,5 кН зі швидкістю 50 Н/с. Для кожного кроку фіксували поточне значення сили і деформації (прогину) нижнього пояса. В процесі навантажування і в кінці кожного кроку виконували візуальне обстеження всієї елементів ферми. За результатами обстеження виявлено, що перші пошкодження у вигляді локальної деформації верхньої стінки верхнього пояса відбуваються в місці прикладання навантаження (рис. 3.35). Чисельні значення величини локального прогину не визначені через відсутність відлікових пристроїв в місці локального деформування.



Рисунок 3.35 – Наслідок локального пошкодження фізичної моделі зварної ферми

При критичному значенні такого пошкодження внаслідок локальної деформації експеримент припинено для навантаження 27,5 кН.

Побудовано діаграму деформування нижнього поясу фізичної моделі зварної ферми (рис. 3.36) для експериментального діапазону навантажень.

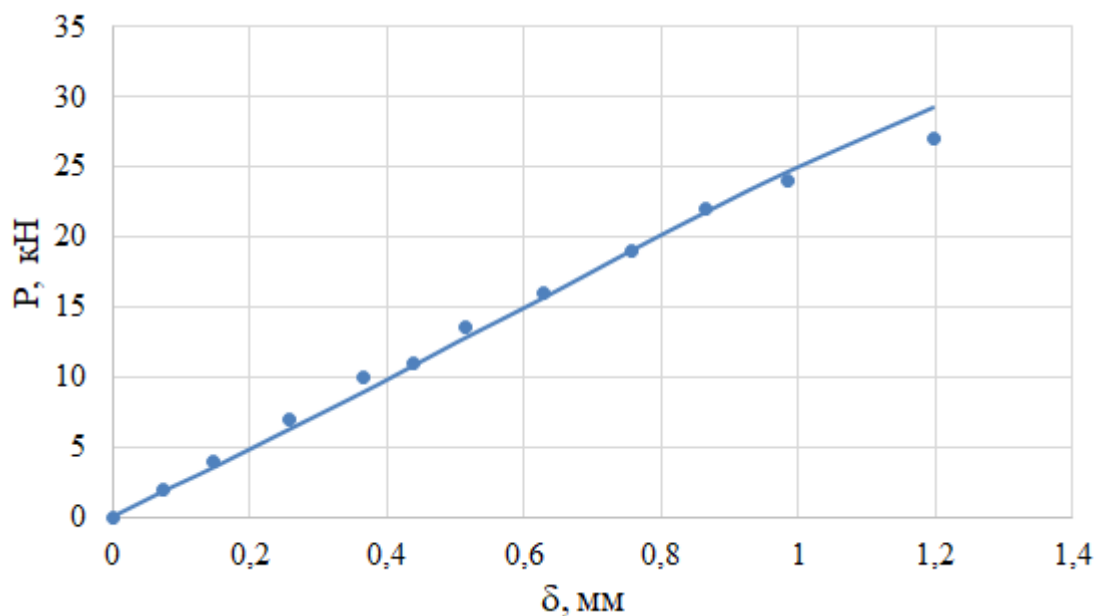


Рисунок 3.36 – Діаграма деформування нижнього поясу фізичної моделі зварної ферми

Виявлено, що нижній пояс прогинається в пружному діапазоні деформацій. Причиною настання граничного стану для досліджуваної ферми є локальне деформування верхньої стінки верхнього пояса без пошкодження інших елементів конструкції, зокрема К-подібних вузлів. Саме це й зумовлює настання граничного стану для досліджуваної конструкції.

3.6 Пошкодження масштабного зразка зварної ферми компютерним моделюючим експериментом

Для виявлення особливостей пошкодження і руйнування ферми з К-подібними вузлами виконано дослідження масштабного зразка зварної ферми компютерним моделюючим експериментом згідно методики, описаної в п. 2.2. В середовищі ПК ANSYS розроблено тривимірну модель масштабного зразка зварної ферми (рис. 3.37).

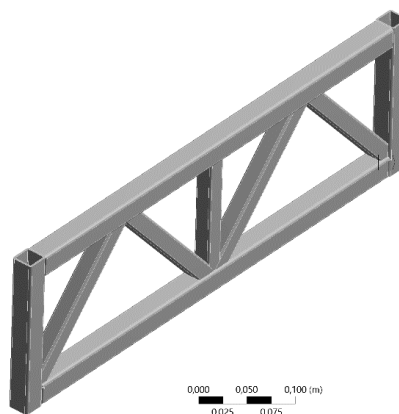


Рисунок 3.37 – Тривимірна модель масштабного зразка зварної ферми

За результатами досліджень отримано візуалізацію розподілу еквівалентних напружень (рис. 3.38) та деформацій по масштабному зразку зварної ферми (рис. 3.39).

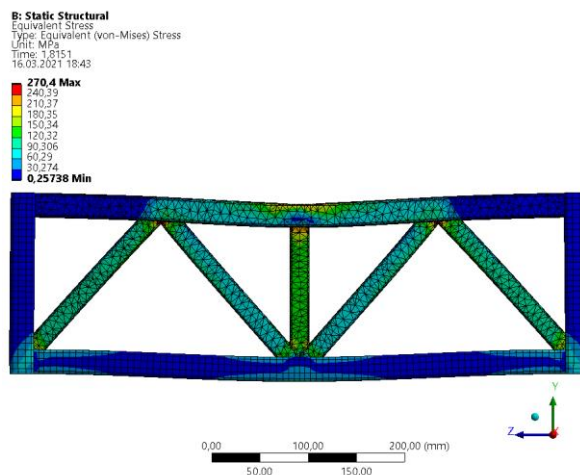


Рисунок 3.38 – Візуалізація розподілу еквівалентних напружень по масштабному зразку зварної ферми

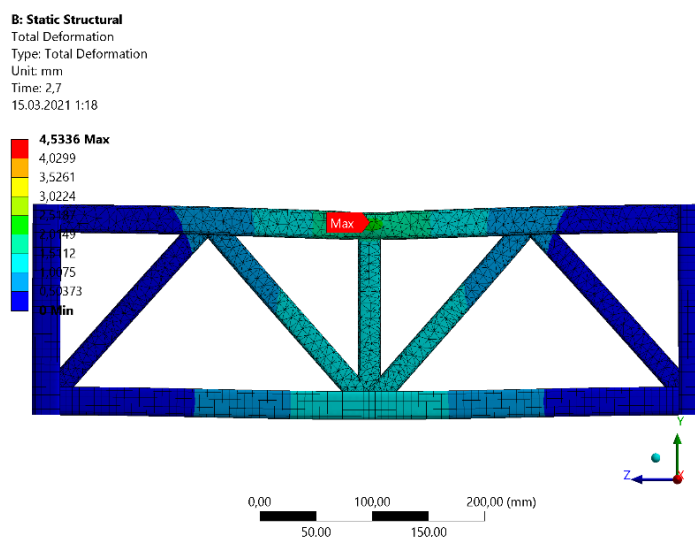


Рисунок 3.39 – Візуалізація розподілу деформацій по масштабному зразку зварної ферми

Виявлено, що максимальні напруження і деформації локалізуються на верхній стінці верхнього поясу в місці прикладання навантажень (рис. 3.40, 3.41). Цей факт був підтверджений і напівнатурним експериментом (див. рис. 3.35).

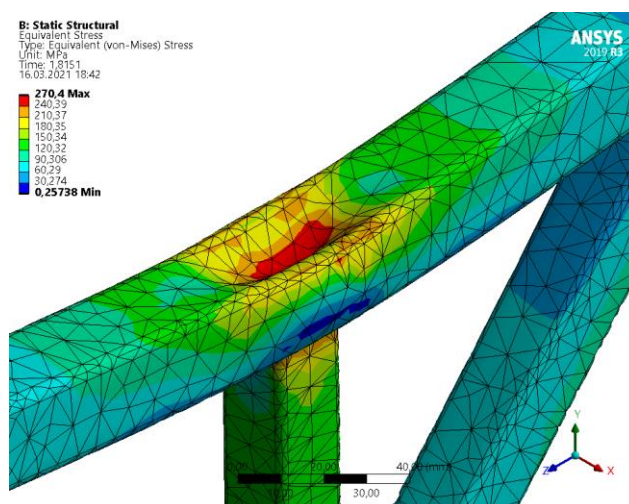


Рисунок 3.40 – Візуалізація розподілу еквівалентних напружень по верхній стінці верхнього поясу масштабного зразка зварної ферми

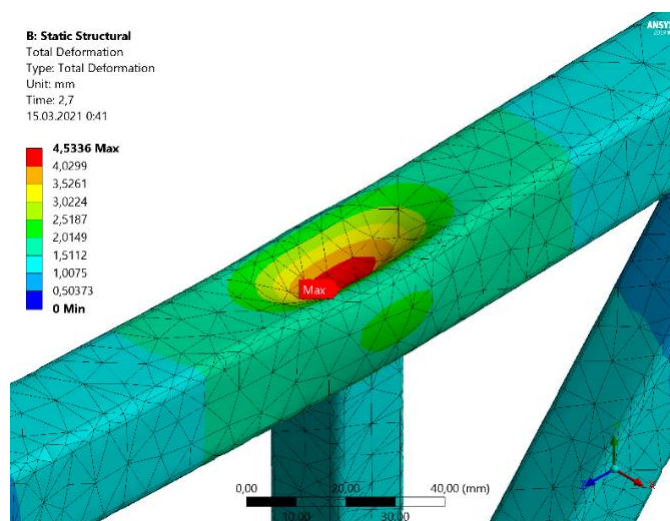


Рисунок 3.41 – Візуалізація розподілу деформацій по верхньому поясі масштабного зразка зварної ферми

За отриманими результатами моделювання побудовано діаграми розподілу максимальних еквівалентних напружень (рис. 3.42) та деформацій (рис. 3.43) по верхній стінці верхнього поясу масштабного зразка зварної ферми.

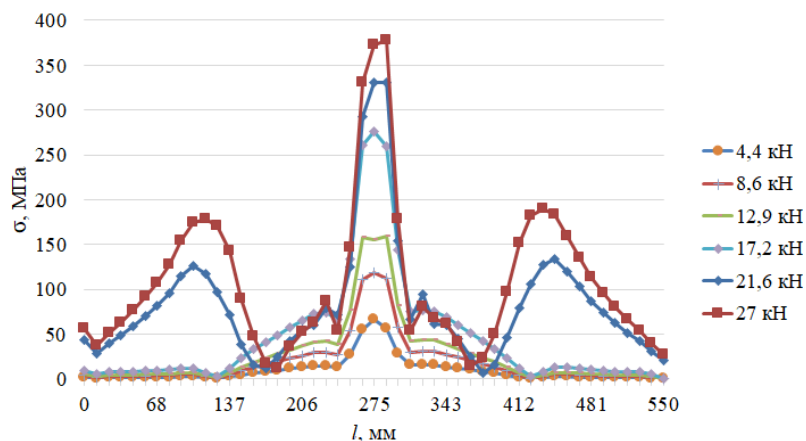


Рисунок 3.42 – Діаграма розподілу максимальних еквівалентних напружень по верхній стінці верхнього поясу масштабного зразка зварної ферми

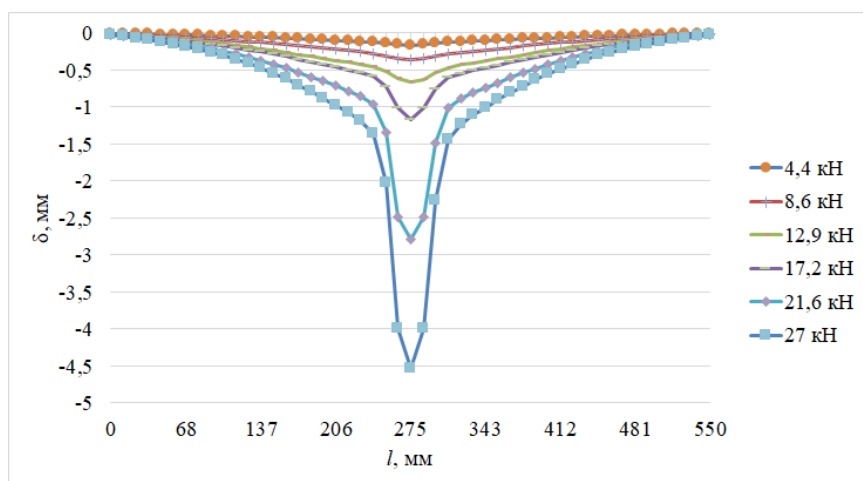


Рисунок 3.43 – Діаграма розподілу деформацій по верхньому поясу масштабного зразка зварної ферми

Для виявлення особливостей локального деформування верхньої стінки верхнього поясу в місці прикладання навантажень за результатами досліджень побудовано діаграма локального деформування цієї ділянки на масштабному зразку зварної ферми (рис. 3.44).

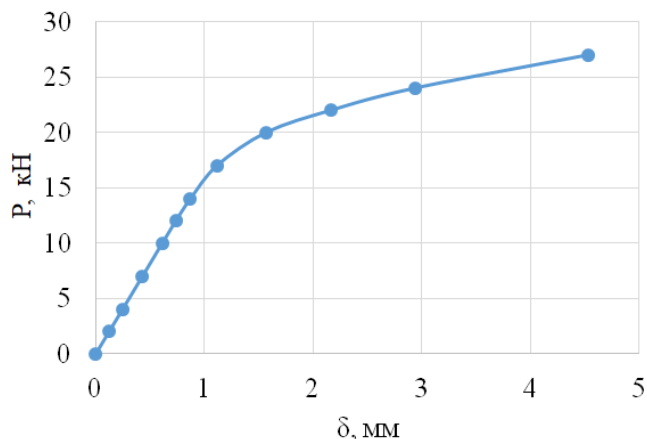


Рисунок 3.44 – Діаграма локального деформування верхньої стінки верхнього поясу масштабного зразка зварної ферми

Проаналізувавши отриману діаграму (рис. 3.44) очевидно, що при навантаженнях до 17 кН відбувається пружна деформація верхньої стінки в місці прикладання навантаження. При вищих навантаженнях наростаючими темпами формуються пластична деформація, яка й зумовлює пошкодження ферми аж до настання граничного стану.

Для виявлення особливостей прогину нижнього поясу масштабного зразка ферми побудовано діаграму його деформування (рис. 3.45). Діаграму отримано за результатами лінійної апроксимації експериментально визначених значень деформації при заданих навантаженнях на ферму.

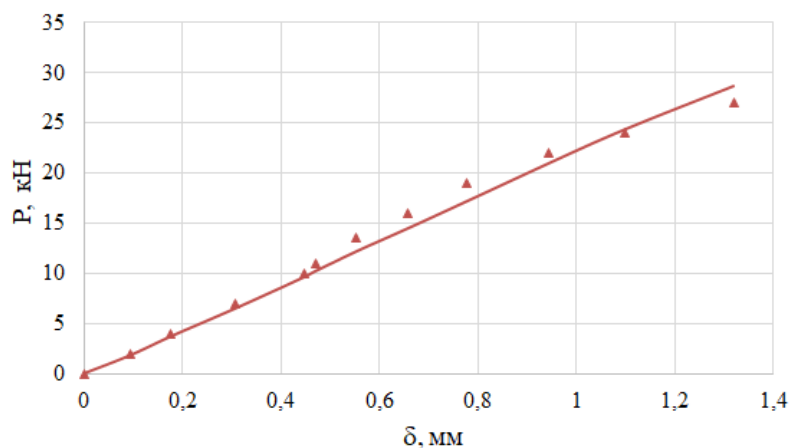


Рисунок 3.45 – Діаграма деформування нижнього поясу масштабного зразка зварної ферми

За цією діаграмою виявлено, що прогин нижнього пояса відбувається в пружному діапазоні і не може бути причиною пошкодження чи руйнування конструкції.

Для виявлення вірогідності результатів виконаного комп'ютерного моделюючого експерименту побудовано суміщені діаграми прогинів нижнього поясу масштабного зразка зварної ферми за результатами натурального і комп'ютерного моделюючого експериментів (рис. 3.46).

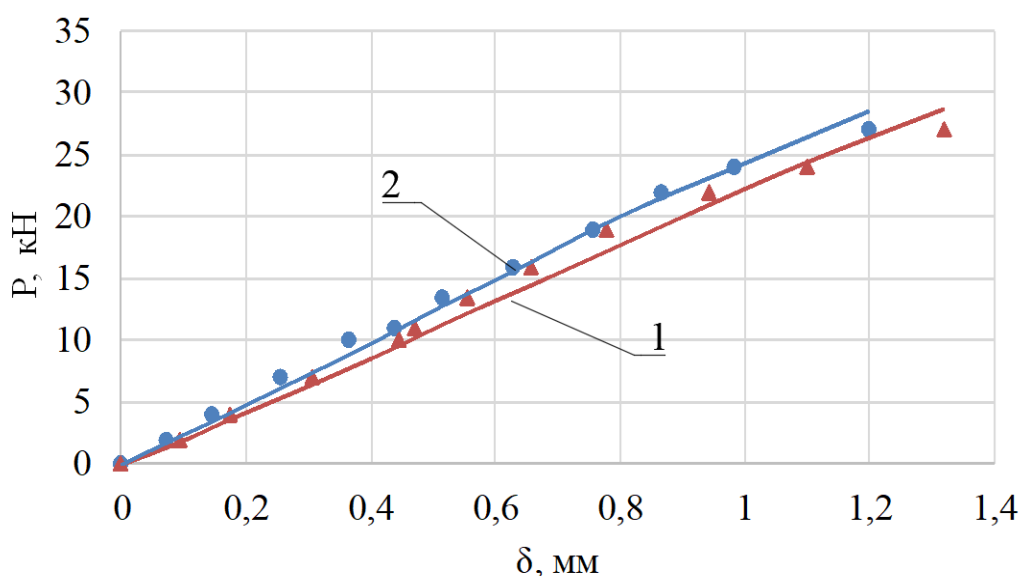


Рисунок 3.46 – Суміщені діаграми прогинів нижнього поясу масштабного зразка зварної ферми за результатами натурального (1) і комп'ютерного моделюючого (2) експериментів

Виконано верифікацію отриманих результатів за формулою (3.2) (табл. 3.7).

Таблиця 3.7

Верифікація результатів натурального і компютерного моделюючого експериментів для прогинів нижнього поясу масштабного зразка званої ферми

Навантаження, кН	Деформація, δ мм		С, %
	Натурний, $\delta_{\text{нат}}$	КМЕ, $\delta_{\text{кме}}$	
$P_1 = 5$	0,27	0,23	96,4
$P_2 = 10$	0,43	0,49	95,9
$P_3 = 15$	0,69	0,63	94,3
$P_4 = 20$	0,9	0,83	93,9
$P_5 = 25$	1,16	1,04	93,3

Виявлено, що співпадання результатів досліджень при порівнянні прогинів для однакових навантажень становить 96,4%, що свідчить про правильно вибрані параметри скінченно-елементної моделі і методику дослідження.

3.7. Висновки за розділом 3

Виконано серію досліджень, які дали можливість оцінити ступінь пошкодження і умови руйнування К-подібних вузлів зварної ферми при дії на конструкцію статичних силових впливів.

Виявлено, що за умов статичних навантажень найслабшим місцем в досліджуваних фермах є середня частина верхнього поясу в місці прикладання навантажень. Саме там відбувається локальне пошкодження у вигляді протискання верхньої стінки і випучування двох бокових стінок профільної труби, яка формує Т-подібний вузол. Саме ці пошкодження зумовлюють настання граничного стану конструкції аж до її руйнування.

В К-подібних вузлах досліджуваної ферми за умов статичних навантажень виникають напруження, які суттєво менші за межу пружності матеріалу, і не зумовлюють пошкоджень чи руйнувань конструкції.

Для підвищення несучої здатності ферми з такою конфігурацією на етапі проектування конструкції доцільно передбачити локальне зміцнення місця прикладання навантаження на верхньому поясі.

РОЗДІЛ 4

ПОШКОДЖЕННЯ ВУЗЛІВ ПРИ ДІЇ ЦИКЛІЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

4.1 Дослідження масштабного зразка зварної ферми

Для дослідження пошкоджуваності К-подібних вузлів зварних ферм при дії циклічних навантажень виконано комп'ютерний моделюючий та напівнатурний експерименти для масштабної моделі зварної ферми (див. рис. 2.5). Параметри випробувань наведено в табл. 4.1.

Таблиця 4.1

Параметри випробувань масштабної моделі зварної ферми
при дії циклічних навантажень

Навантаження, кН		Коефіцієнт асиметрії циклу, R	Частота наванта- жування циклу ν , Гц.	Керування
P_{max}	P_{min}			
15	3	0,2	50	За силою

За результатами виконання КМЕ отримано загальний розподіл еквівалентних напружень по всій моделі (рис. 4.1, *a*) і розподіл напружень у лівому проміжному верхньому вузлі (рис. 4.1, *б*), в якому зароджується втомна тріщина (рис. 4.1, *б*, I).

Проаналізувавши отримані розподіли очевидним є те, що максимальні напруження концентруються у міжроскосному просторі в нижній частині зварного шва зі сторони +X глобальної системи координат. Причиною цього є деформації розтягу (стиску) одночасно зі згином розкоса в процесі навантажування ферми, які зумовлюють найбільші напруження в місці його защемлення. Очевидно, що саме там виникне початкова втомна тріщина.

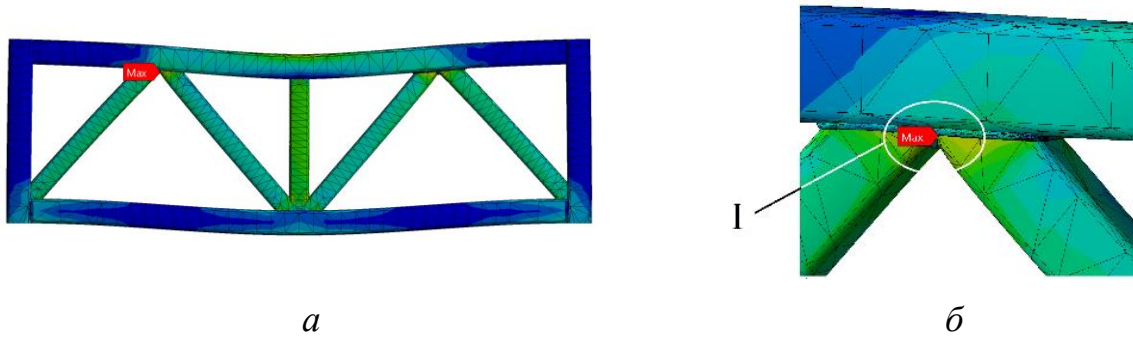


Рисунок 4.1 – Візуалізований розподіл напружень в масштабному зразку (а) та у вузлі, де виникає початкова втомна тріщина (б)

Згідно отриманого розподілу напружень і по деформації ферми очевидно, що опорний лівий розкіс сприймає напруження стиску, а лівий проміжний – напруження розтягу. В площині нижньої частини шва переважаючими напруженнями є зрізуючі, тому виникаюча тріщина буде поширюватися по другому типу зміщення берегів.

За результатами виконання КМЕ отримано діаграму втомного руйнування (рис. 4.2) для вузла, де локалізуються максимальні напруження.

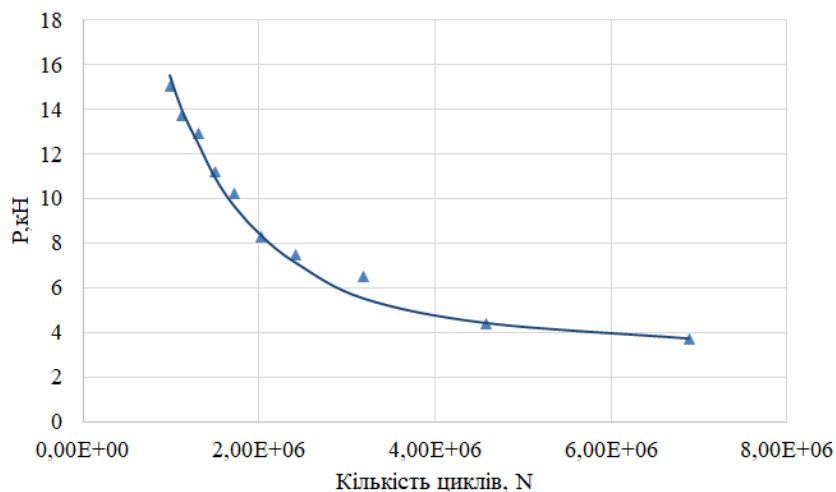


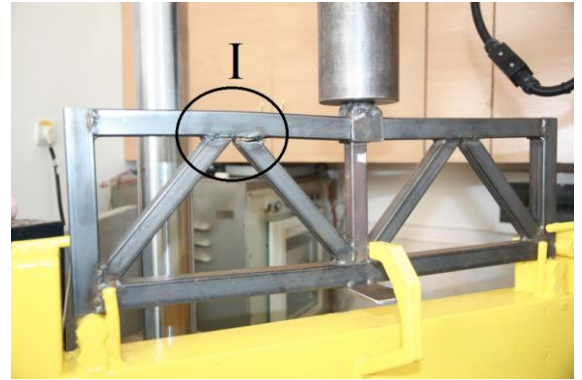
Рисунок 4.2 – Діаграма втомного руйнування за результатами КМЕ

За допомогою отриманої вище діаграми можна визначати кількість циклів до настання граничного стану вузла за різної величини навантаження.

Для виявлення достовірності отриманих результатів і виконання їх верифікації виконано напівнатурний силовий експеримент для масштабного зразка (рис. 4.3).



a



б

Рисунок 4.3 – Випробування масштабного зразка зварної ферми до навантажування (*a*) та після руйнування (*б*)

На отриманих фото помітно, що зародження тріщини також відбувається у лівому проміжному К-подібному вузлі (рис. 4.3 б, I), а саме в міжрозкосному просторі в нижній частині зварного шва (рис. 4.4).



Рисунок 4.4 – Лівий проміжний К-подібний вузол з тріщиною

За час виконання напівнатурного експерименту перше візуально помітне пошкодження було помітне при величині 0,3 мм.

За результатом виконання дослідження отримано чисельну базу (табл. 4.2). Виконано порівняння отриманих результатів за формулою (3.2).

Таблиця 4.2

Чисельні дані втомної пошкоджуваності для масштабної моделі зварної ферми при дії циклічних навантажень

Методика дослідження	Кількість циклів	
	До появи втомної тріщини	До настання граничного стану
КМЕ	658354	987543
Натурний експеримент	711681	906564
Ступінь співпадання	92,5 %	91,7 %

На основі отриманих чисельних показників втомної пошкоджуваності наведених у табл. 4.2 побудовано діаграму втомного руйнування (рис. 4.5).

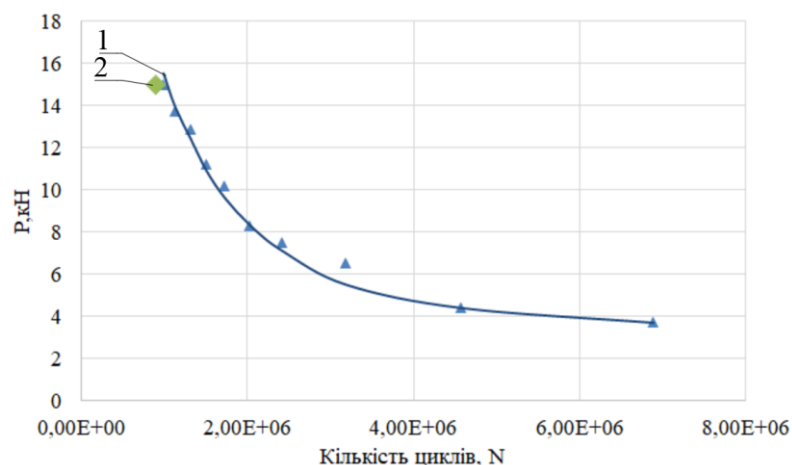


Рисунок 4.5 – Суміщення діаграми втомного руйнування за результатами КМЕ (1) та результату натурального випробування (2)

Виявлено задовільне співпадання отриманих показників. Виходячи з цього, достовірне оцінювання напрацювання ферми до зародження тріщини в К-подібному вузлі і до її руйнування впродовж експлуатації можна визначати за діаграмою втомного руйнування конструкції, отриманої комп'ютерним моделюючим експериментом.

Виходячи з задовільного співпадання показників напівнатурного і комп'ютерного моделюючого експерименту для масштабної моделі ферми, приймаємо аналогічні показники скінченно-елементної моделі для дослідження повномасштабної ферми.

4.2 Дослідження К-подібних безфасонкових вузлів повномасштабної зварної ферми

Дослідження виконано комп'ютерним моделюючим експериментом за методикою, описаною в п. 2.5. За результатами дослідження виявлено розподіл напружень по всій зварній фермі, у лівому проміжному розкосі (рис. 4.6, *a*) та правому проміжному розкосі (рис. 4.6, *б*)

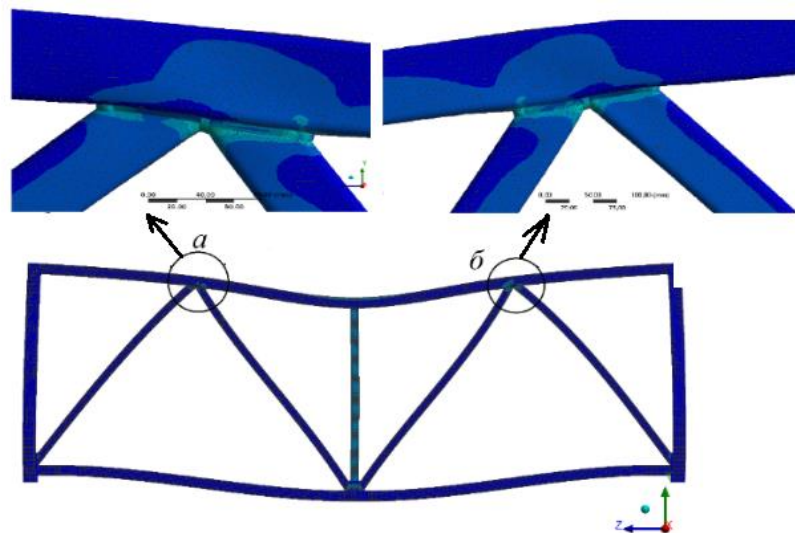


Рисунок 4.6 – Розподіл напружень по всій зварній фермі, в лівому проміжному вузлі (*a*) та правому проміжному вузлі (*б*)

Виявлено, що максимальні напруження формуються в лівому проміжному розкосі з боку міжрозкосного простору в нижній частині зварного шва. Така ж картина мала місце при дослідженні масштабної моделі ферми (див. п. 4.1). Виходячи з отриманих показників напружено-деформівного стану в елементах К-подібного вузла, очевидним є факт, що як і для масштабної моделі, так і для повномасштабної ферми саме в цьому місці буде зароджуватися початкова втомна тріщина (рис. 4.7).

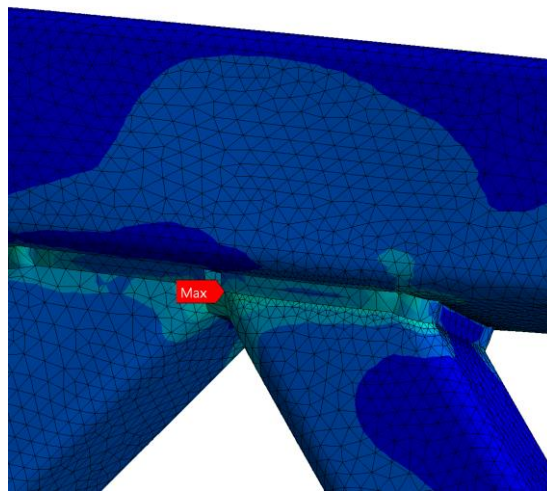


Рисунок 4.7 – Місце зародження втомної тріщини у лівому проміжному К-подібному вузлі

Дещо нижчі напруження виникають в симетричному до цього в правому проміжному К-подібному вузлі. Вважаю, що відсутність повної симетрії напружень зумовлена різними умовами роботи опорних вузлів: зліва жорстке защемлення, справа – шарнірне.

За результатами досліджень сформовано чисельну базу (табл. 4.3) і побудовано діаграму втомного руйнування безфасонкової зварної ферми (рис. 4.8).

Таблиця 4.3

Втомне пошкодження
зварної ферми з безфасонковим виконанням К- подібних вузлів

Навантаження, кН		Коефіцієнт асиметрії циклу, r	Частота навантажування циклу, ν Гц.	Кількість циклів	
P_{\max}	P_{\min}			До появи втомної тріщини	До настання граничного стану
40	8	0,2	0,03	726942	982352
30	8	0,26	0,03	918874	1392234
20	8	0,4	0,03	1354786	2026351
10	8	0,8	0,03	2635921	3876355

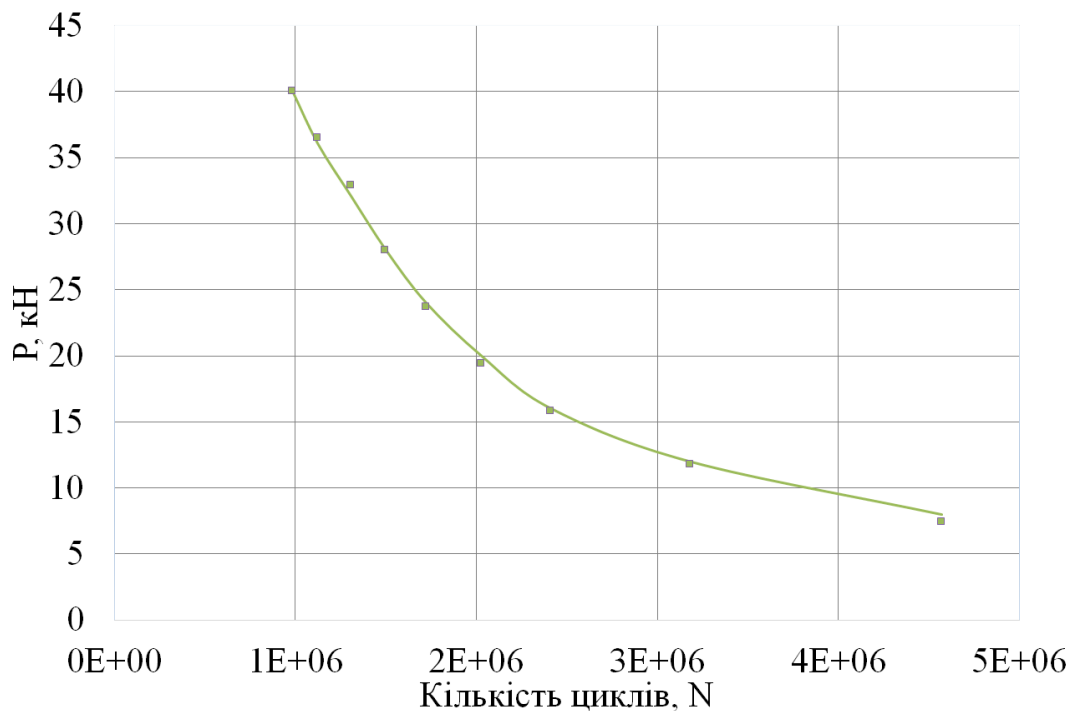


Рисунок 4.8 – Діаграма втомного руйнування безфасонкової зварної ферми за результатами КМЕ

Отримана діаграма втомного руйнування дає можливість визначити період експлуатації ферми до настання граничного стану як на етапі її проектування так і впрожовж роботи за відомими силовими чинниками.

4.3 Дослідження натурної зварної ферми з фасонками у вигляді надставок

Конструктивна схема вузлів з фасонками у вигляді надставок подана на рис. 4.9 для К-подібного вузла (а) і комбінованого вузла (б).

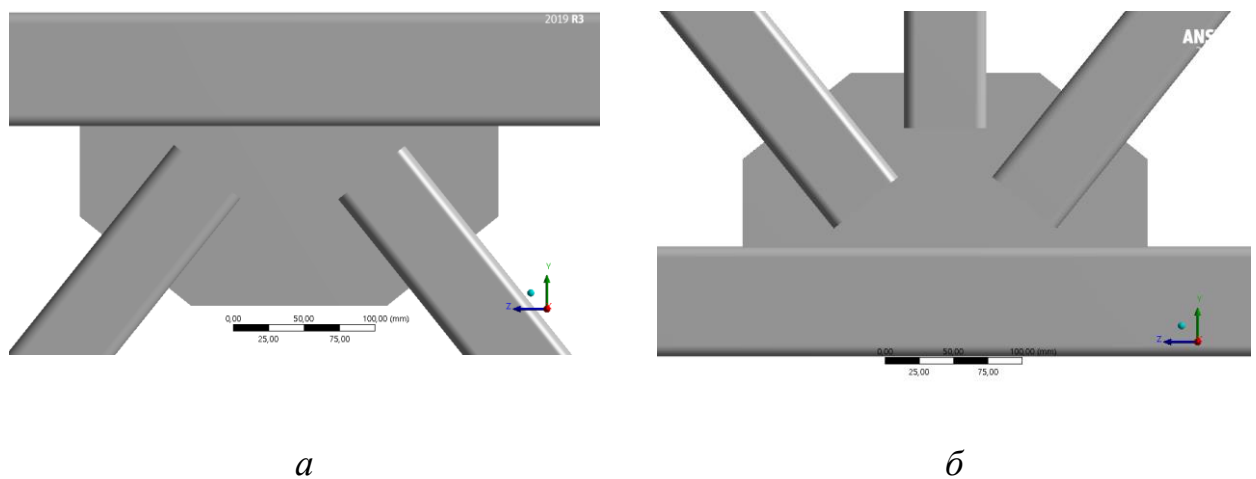


Рисунок 4.9 – Конструктивна схема вузлів з фасонками у вигляді надставок для К-подібного вузла (а) і комбінованого вузла (б)

Виконано дослідження за методикою комп'ютерного моделюючого експерименту. За результатами дослідження визначено розподіл напружень по всій фермі (рис. 4.10).

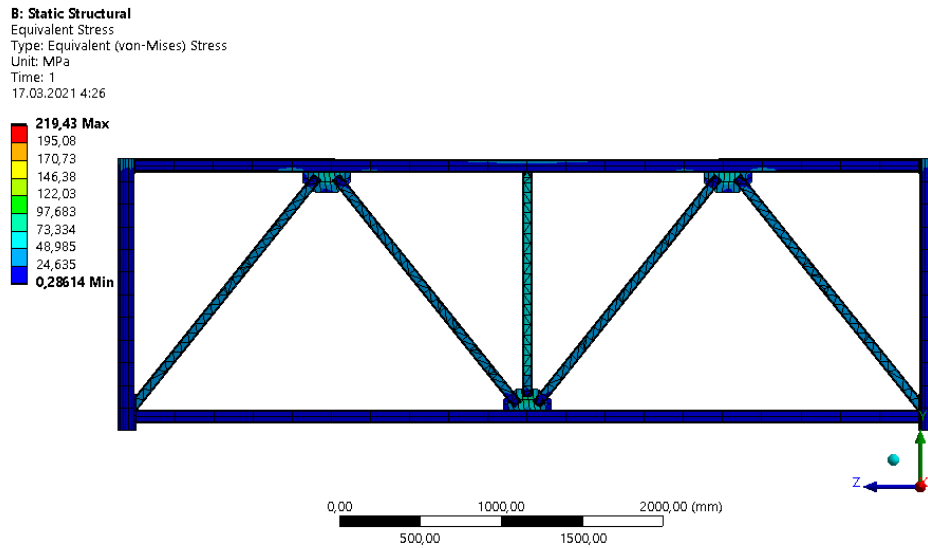


Рисунок 4.10 – Візуалізація розподілу напружень по всій фермі з фасонками у вигляді надставок

Проаналізувавши результати визначення напружень виявлено, що за таких умов максимальні напруження формуються в К-подібному вузлі, як і для безфасонкового виконання (рис. 4.11)

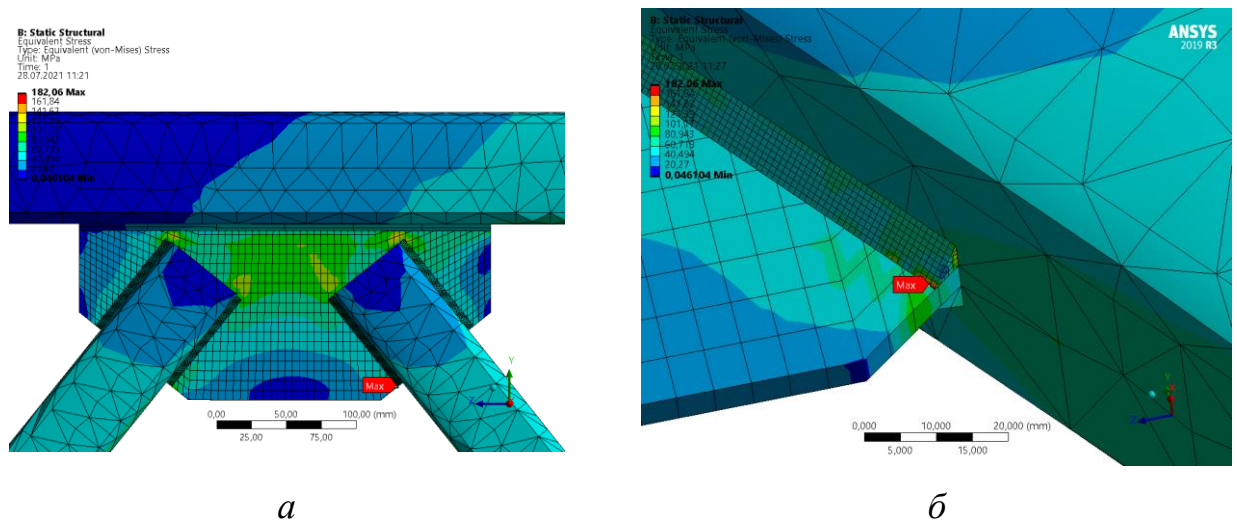


Рисунок 4.11 – Розподіл напружень у лівому проміжному вузлі (*a*) та місце зародження втомної тріщини (*б*)

За результатами досліджень сформовано чисельну базу по кількості циклів до появи втомної тріщини і до настання граничного стану конструкції (табл. 4.4).

Таблиця 4.4

Втомне пошкодження натурної моделі зварної ферми
з фасонками у вигляді надставок

Навантаження, кН		Коефіцієнт асиметрії циклу, R	Частота навантажування ν , Гц	Кількість циклів	
				До появи втомної тріщини	До настання граничного стану
P_{max}	P_{min}				
40	8	0,2	0,03	757593	1042278
30	8	0,26	0,03	990613	1477160
20	8	0,4	0,03	1427804	2151989
10	8	0,8	0,03	2953273	4180796

Побудовано діаграму втомного руйнування повномасштабної зварної ферми із фасонками у вигляді надставок (рис. 4.12).

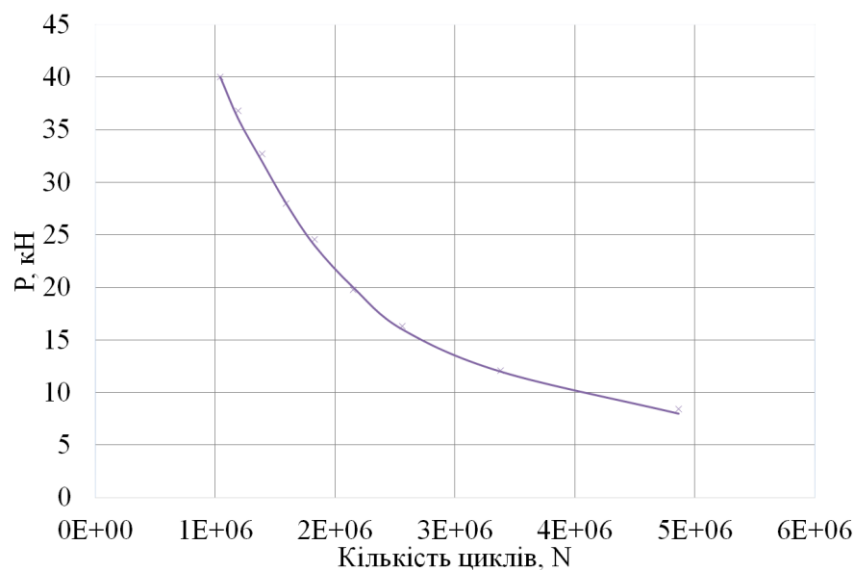


Рисунок 4.12 – Діаграма втомного руйнування повномасштабної зварної ферми із фасонками у вигляді надставок за результатами КМЕ

Отримана діаграма втомного руйнування дає можливість визначити період експлуатації ферми до настання граничного стану як на етапі її проектування, так і впродовж роботи за відомими силовими чинниками.

4.4 Дослідження повномасштабної зварної ферми з класичними фасонковими вузлами

Конструктивна схема вузлів з класичними фасонками подана на рис. 4.13 для К-подібного вузла (*a*) і комбінованого вузла (*б*).

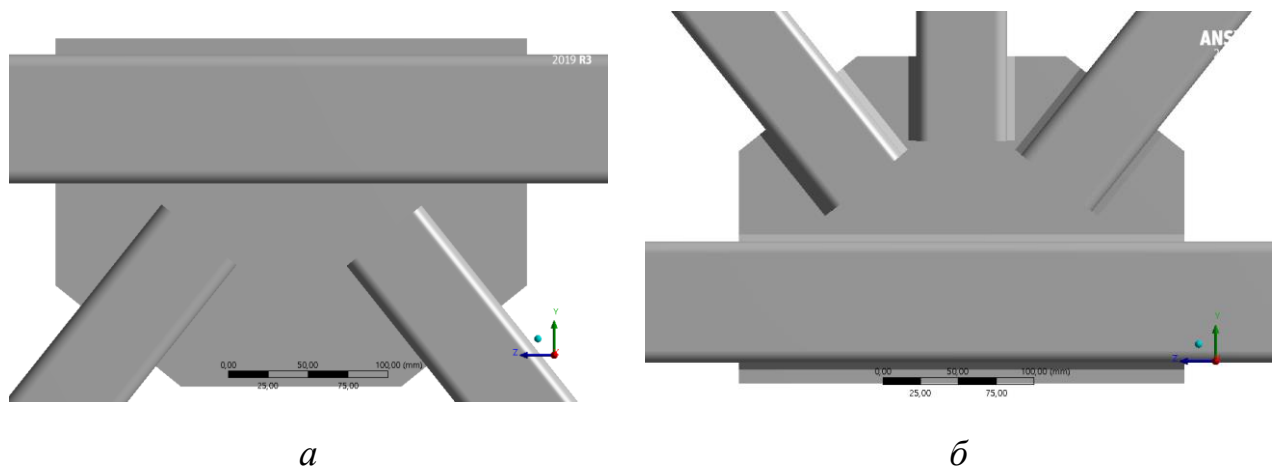


Рисунок 4.13 – Конструктивна схема вузлів з вузлів з класичними фасонками для К-подібного вузла (*a*) і комбінованого вузла (*б*)

Виконано дослідження за методикою комп'ютерного моделюючого експерименту. За результатами дослідження визначено розподіл напружень по всій фермі (рис. 4.14).

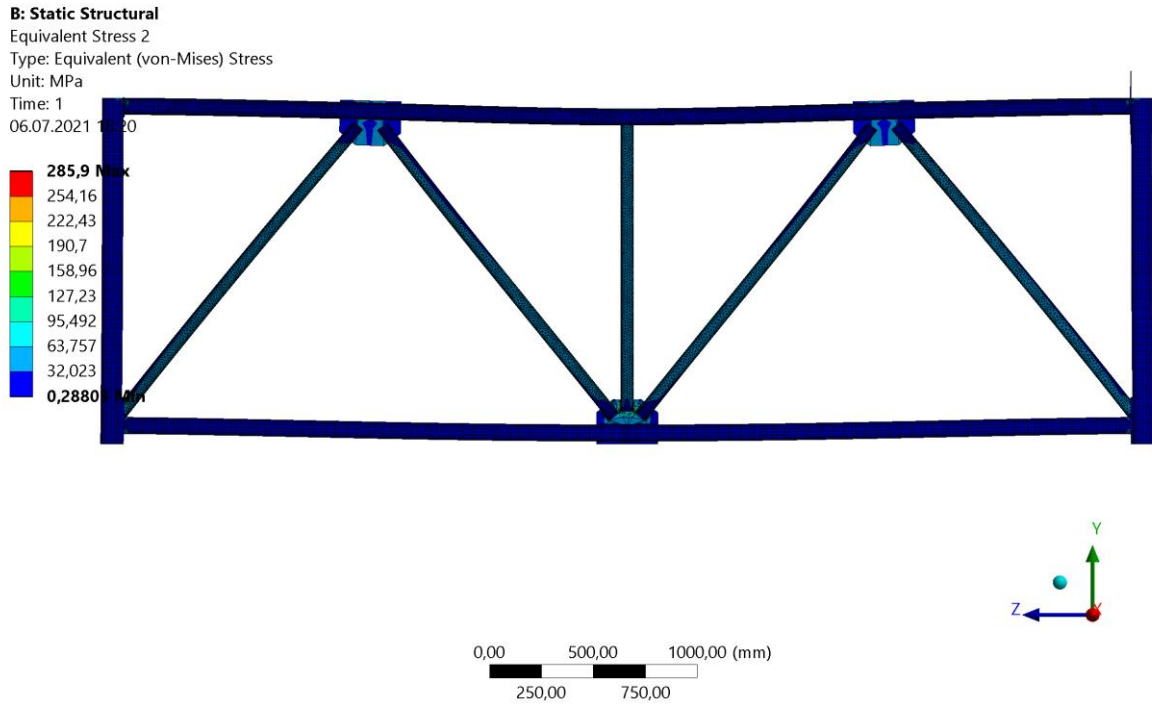


Рисунок 4.14 – Розподіл напружень по всій фермі

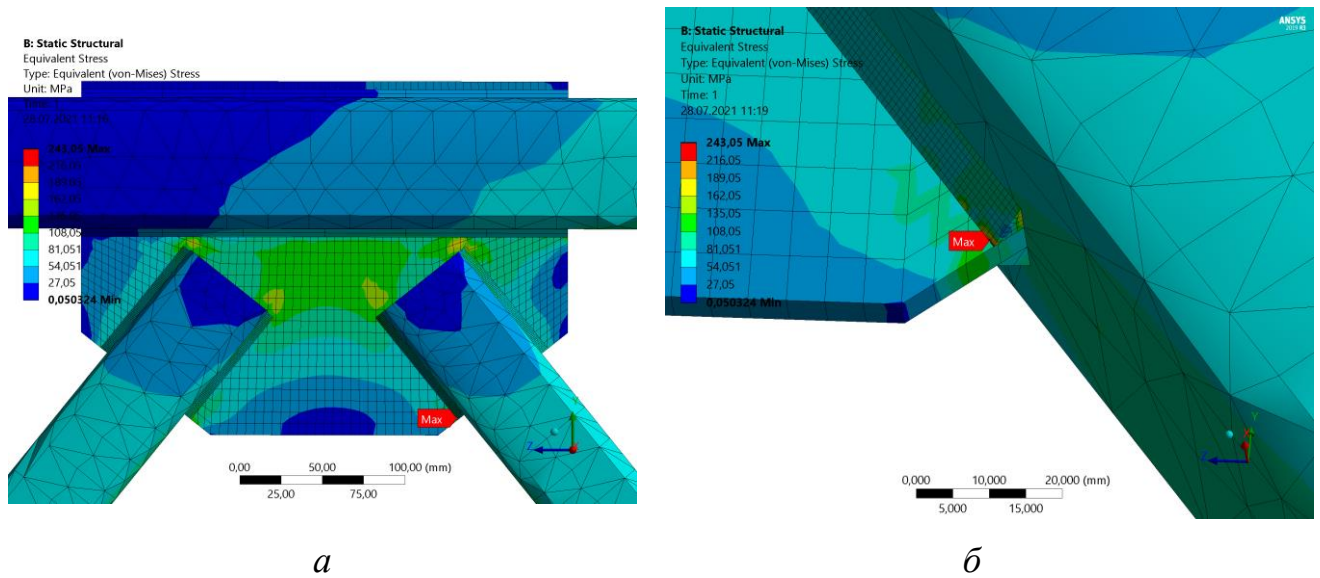


Рисунок 4.15 – Розподіл напружень у лівому проміжному вузлі (а) та місце зародження втомної тріщини для ферми з класичними фасонками (б)

Таблиця 4.5

Втомне пошкодження повномасштабної моделі
зварної ферми з класичними фасонками

Навантаження, кН		Коефіцієнт асиметрії циклу, r	Частота навантажування, ν Гц	Кількість циклів	
				До появи втомної тріщини	До настання граничного стану
P_{\max}	P_{\min}				
40	8	0,2	0,03	729339	1059961
30	8	0,26	0,03	951316	1503612
20	8	0,4	0,03	1407679	2192516
10	8	0,8	0,03	2805220	4254092

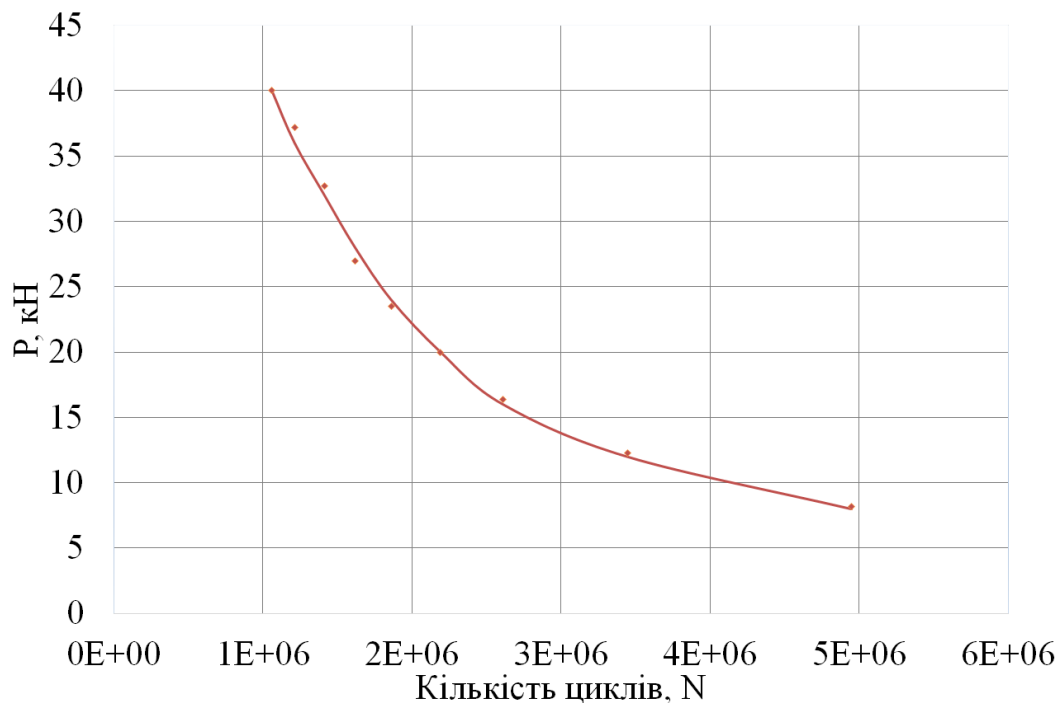


Рисунок 4.16 – Діаграма втомного руйнування повномасштабної зварної ферми з класичними фасонками за результатами КМЕ

Порівняльний аналіз для розглянутих варіантів конструктивного виконання К-подібних вузлів з точки зору їх ефективності і доцільності буде зроблено після суміщення всіх отриманих діаграм втомного руйнування.

4.5 Дослідження зварних ферм з фасонковими вузлами оригінальних конструкцій

4.5.1 Дослідження зварної ферми із фасонкою, в якій подовжена нижня частина

Конструктивні схеми вузлів з подовженою нижньою частиною фасонки для К-подібного вузла (а) і комбінованого вузла (б) подано на рис. 4.17.

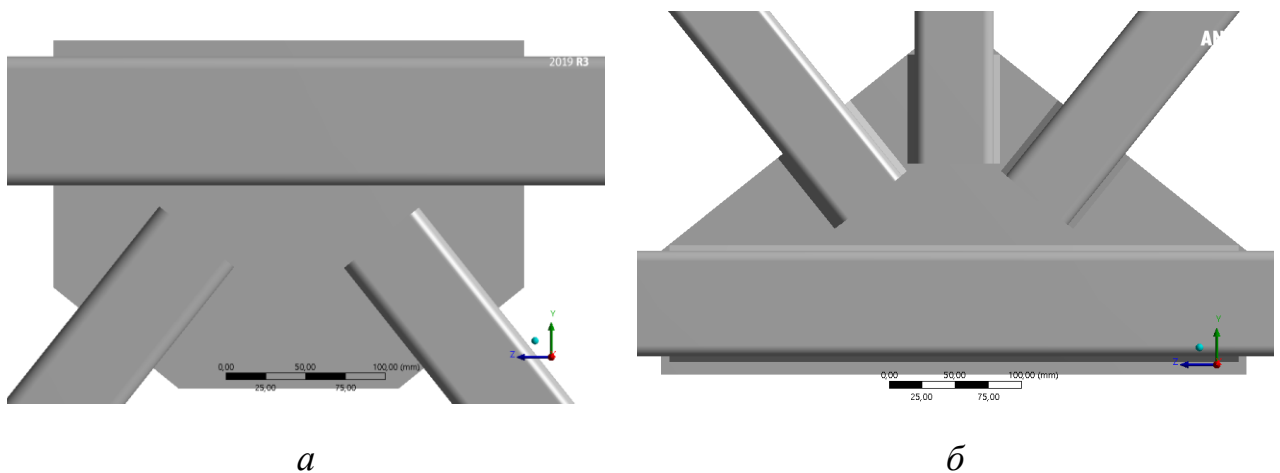


Рисунок 4.17 – Конструктивна схема вузлів з подовженою нижньою частиною фасонки для К-подібного вузла (а) і комбінованого вузла (б)

Для ферми з такими вузлами виконано комплекс досліджень за методикою комп'ютерного моделюючого експерименту. За результатами досліджень визначено розподіл напружень в елементах ферми (рис. 4.18), розподіл напружень у центральному вузлі та визначено місце зародження втомної тріщини (рис. 4.19).

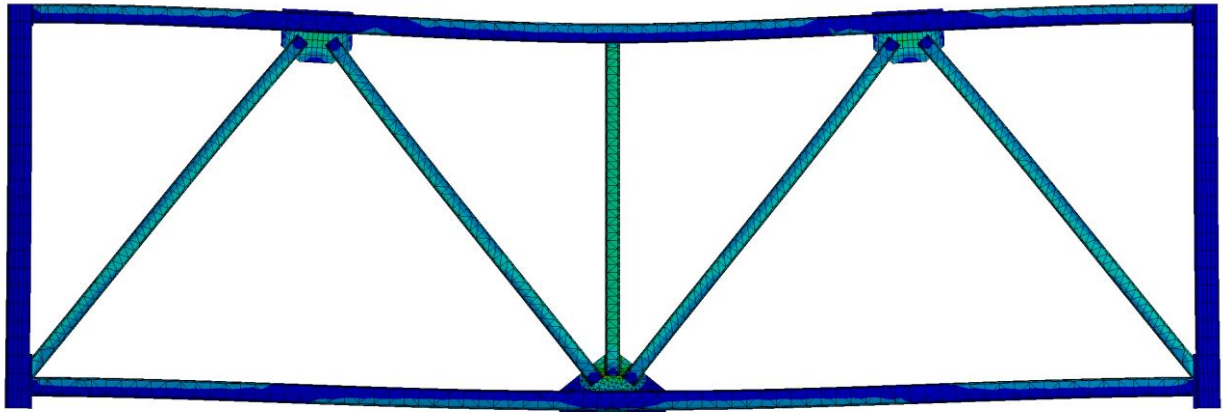


Рисунок 4.18 – Візуалізація розподілу напружень в елементах ферми при виконанні вузлів з подовженою нижньою частиною фасонки

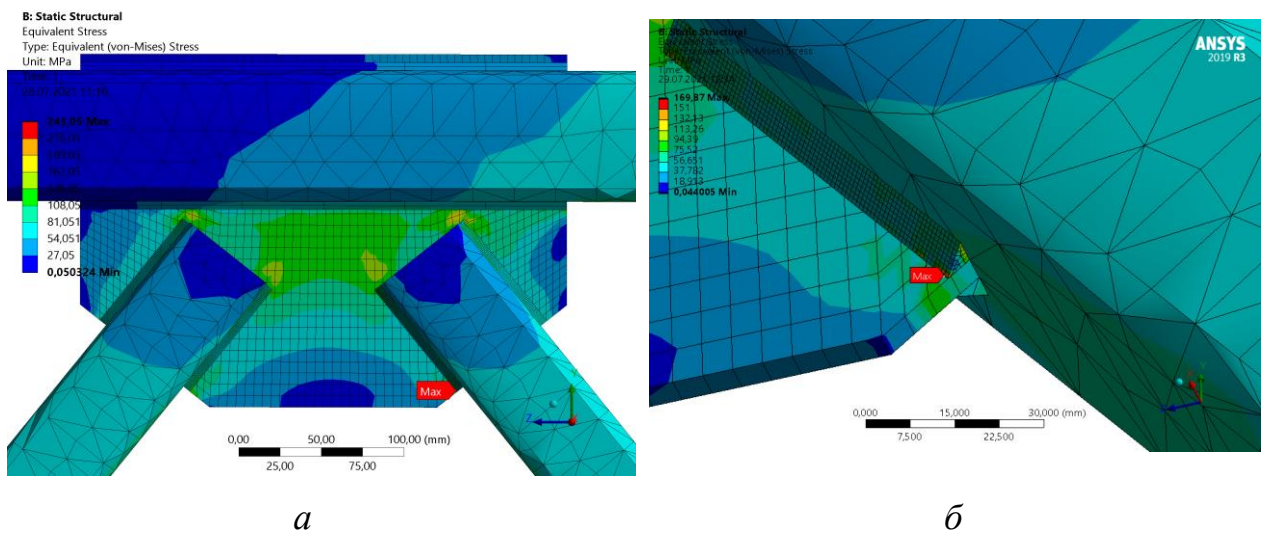


Рисунок 4.19 – Розподіл напружень у лівому проміжному вузлі (а) та місце зародження втомної тріщини (б)

Побудовано діаграму втомного руйнування (рис. 4.20).

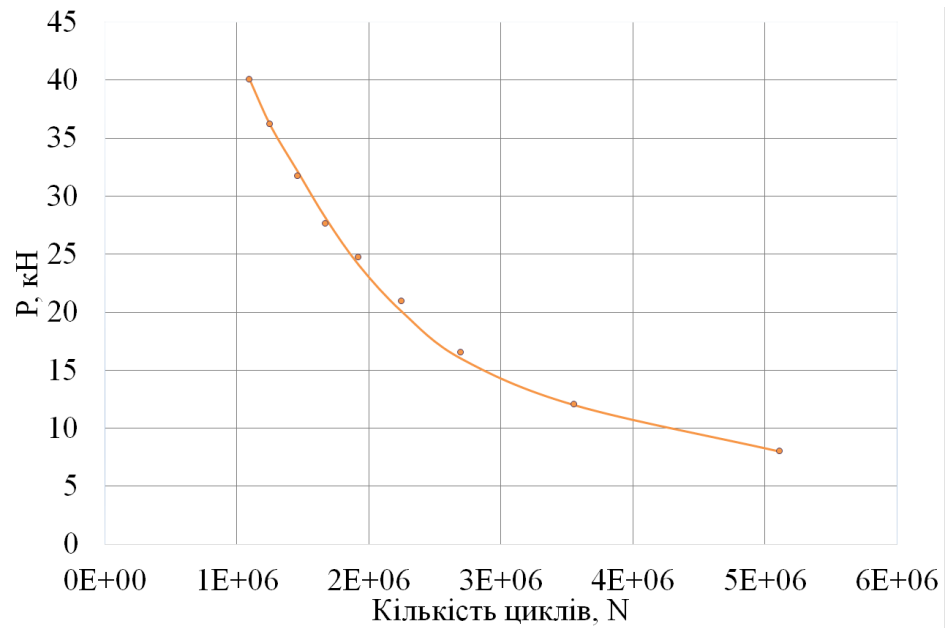


Рисунок 4.20 – Діаграма втомного руйнування повномасштабної зварної ферми з фасонкою, в якій подовжена нижня частина

Визначено кількість циклів до появи втомної тріщини і до настання граничного стану при експлуатації конструкції (табл. 4.6).

Таблиця 4.6

Втомне пошкодження повномасштабної моделі зварної ферми з фасонкою, в якій подовжена нижня частина

Навантаження, кН		Коефіцієнт асиметрії циклу, r	Частота навантажування ν , Гц	Кількість циклів	
				До появи втомної тріщини	До настання граничного стану
P_{\max}	P_{\min}				
40	8	0,2	0,03	836023	1096308
30	8	0,26	0,03	1003424	1547379
20	8	0,4	0,03	1587704	2250901
10	8	0,8	0,03	3000806	4394381

Отримані результати дадуть можливість виконати загальне порівняння розглянутих варіантів.

4.5.2 Дослідження зварної ферми з фасонковими вузлами власної конструкції [101]

Для зменшення напружень в ділянці термічного впливу, де зароджуються втомні тріщини в комбінованому вузлі (див. рис. 4.19), використано фасонки оригінальної власної конструкції, які мають прорізи, паралельні до розкосів. Прорізи закінчуються циліндричними отворами. Конструктивні схеми таких вузлів подано на рис. 4.21.

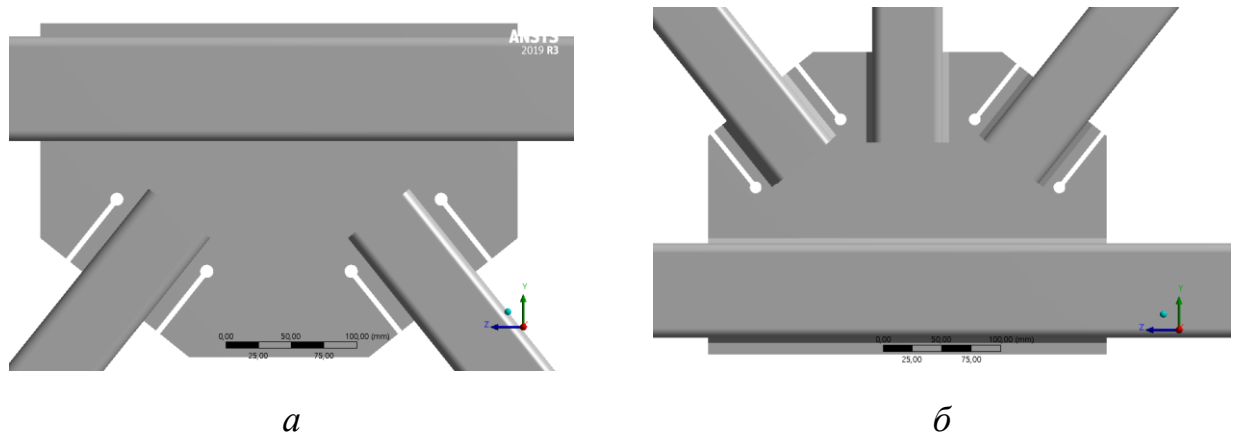


Рисунок 4.21 – Схеми фасонкових вузлів власної конструкції:
К-подібного (а) і комбінованого (б)

Визначено розподіл напружень по елементах ферми (рис. 4.22).

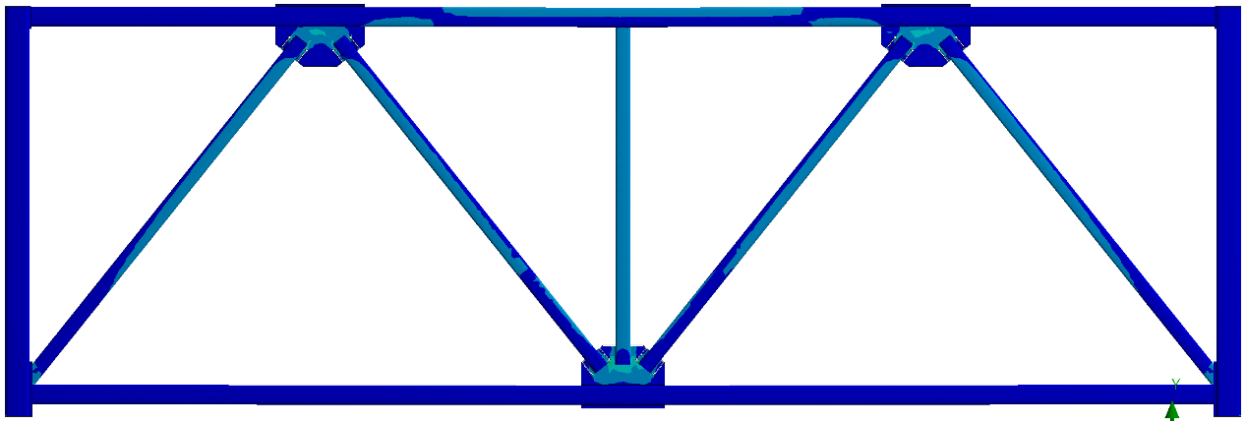
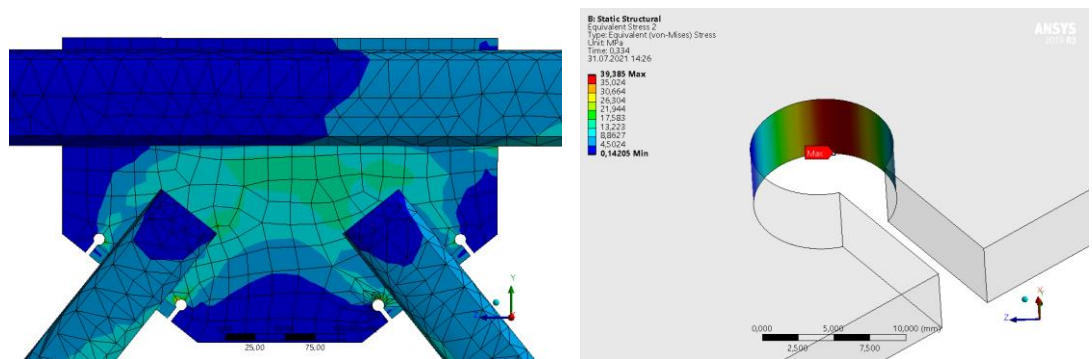
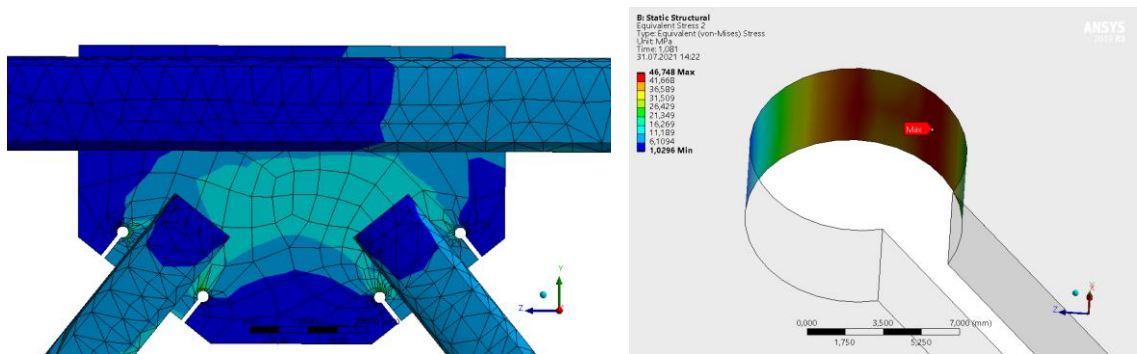


Рисунок 4.22 – Візуалізація розподілу напружень по елементах ферми з фасонками з прорізами

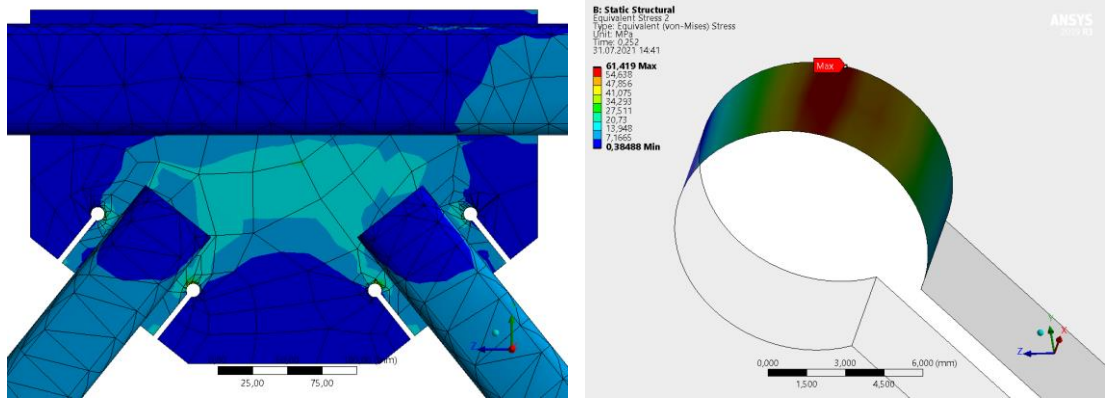
Визначено розподіл напружень у К-подібному вузлі та розподіл напружень в околі циліндричного отвору в залежності від довжини прорізу при навантаженні в 22,5 кН (рис. 4.23). Місце зародження втомної тріщини таке ж, як і у ферми із класичними фасонками (див рис. 4.15 б).



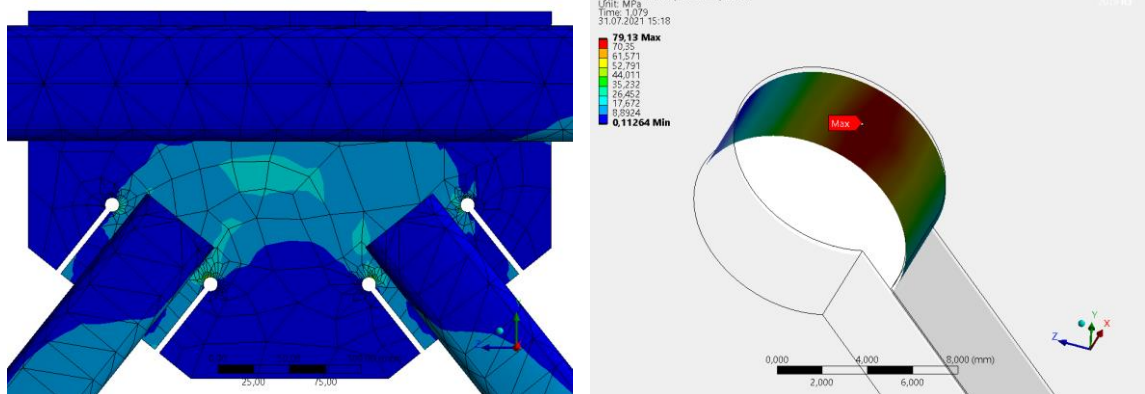
a



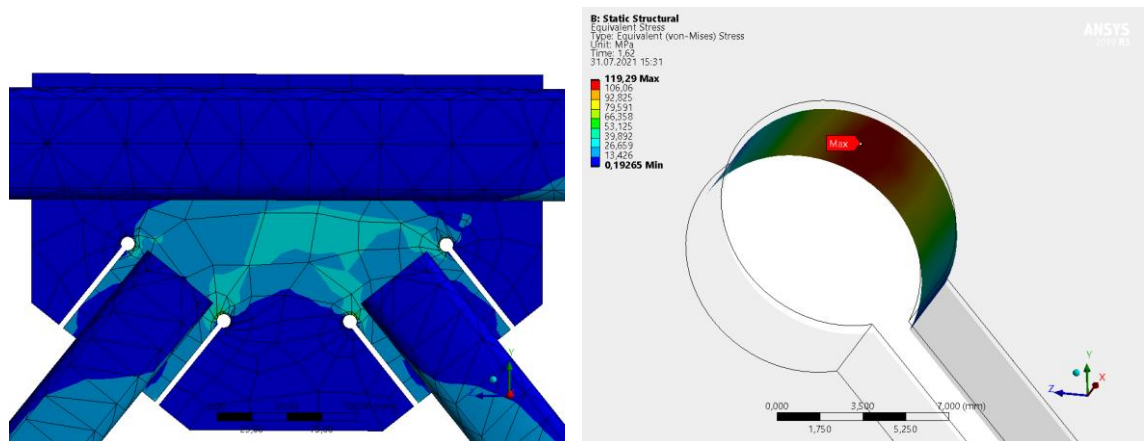
б



б



в



г

a – 20 % від загальної довжини привареної частини розкоса; *б* – 40 %; *в* – 60%; *г* – 80%; *д* – 100%

Рисунок 4.23 – Розподіл напружень по фасонці у К-подібному вузлі та розподіл напружень в околі отвору в залежності від довжини прорізу при навантаженні в 22,5 кН

- 20% - максимальне напруження в циліндричному отворі = 39,4 МПа
- 40% - максимальне напруження в циліндричному отворі = 46,7 МПа
- 60% - максимальне напруження в циліндричному отворі = 61,4 МПа
- 80% - максимальне напруження в циліндричному отворі = 79,1 МПа
- 100% - максимальне напруження в циліндричному отворі = 119,2 МПа

Побудовано діаграми розподілу напружень вздовж найближчого примикаючого до отвору зварного шва, при різній довжині прорізу по відношенню до загальної довжини привареної частини розкоса (рис. 4.24...4.29).

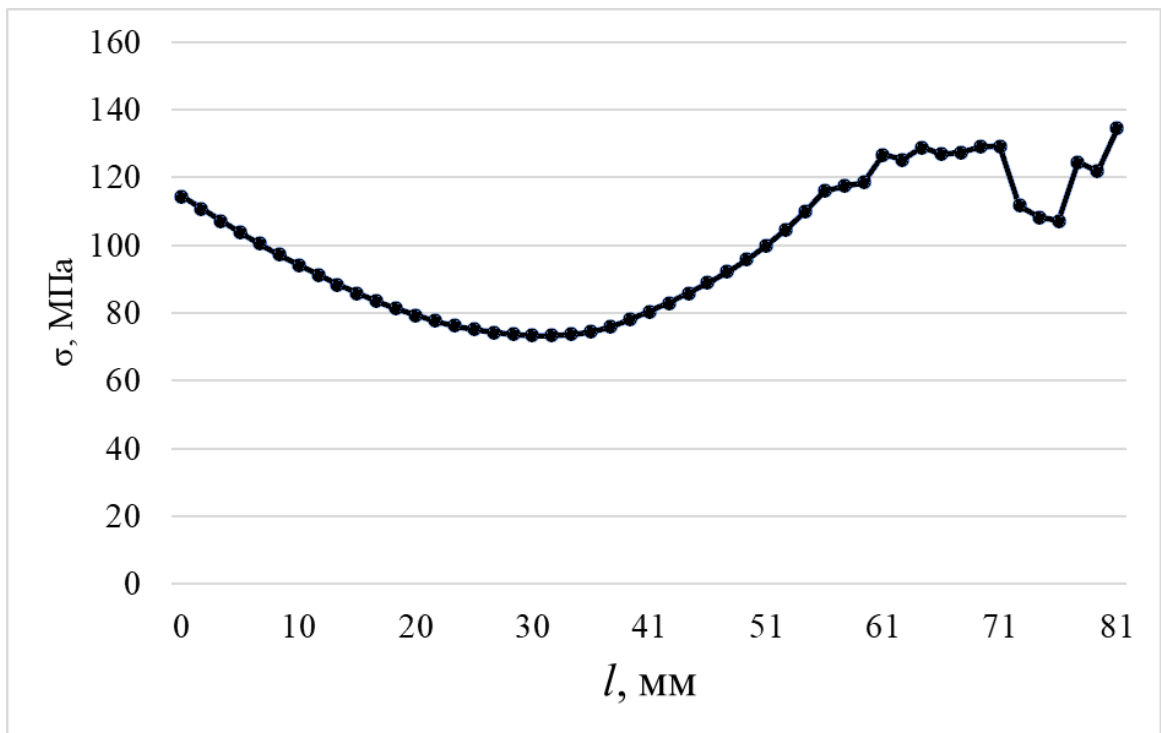


Рисунок 4.24 – Діаграма розподілу напружень вздовж найближчого примикаючого до отвору зварного шва при довжині прорізу 20 % по відношенню до загальної довжини привареної частини розкоса

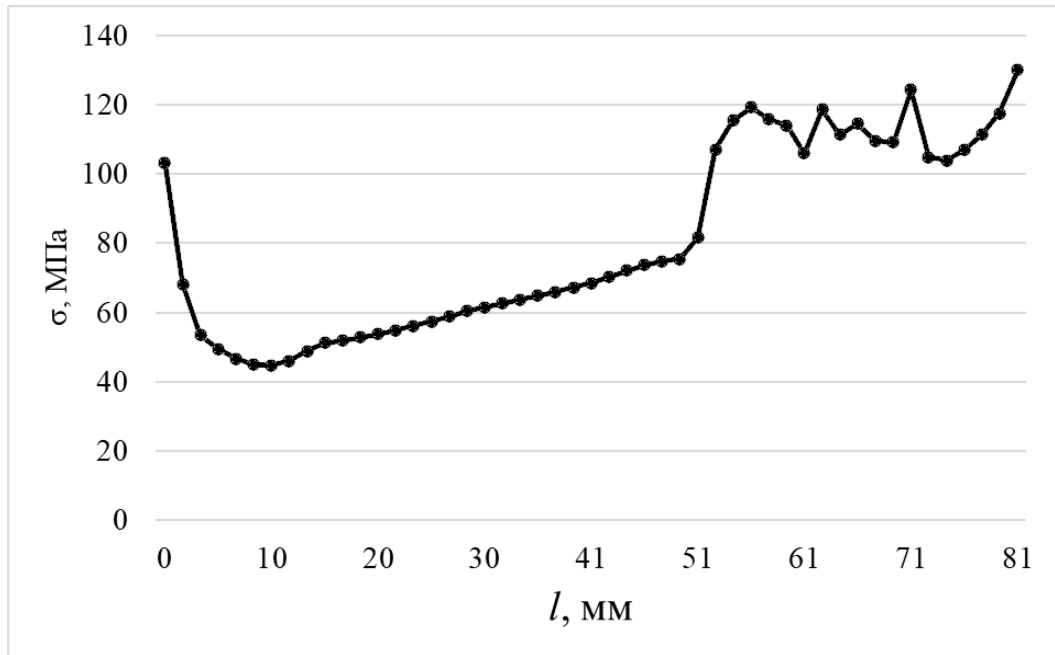


Рисунок 4.25 – Діаграма розподілу напружень вздовж найближчого примикаючого до отвору зварного шва при довжині прорізу 40 % по відношенню до загальної довжини привареної частини розкоса

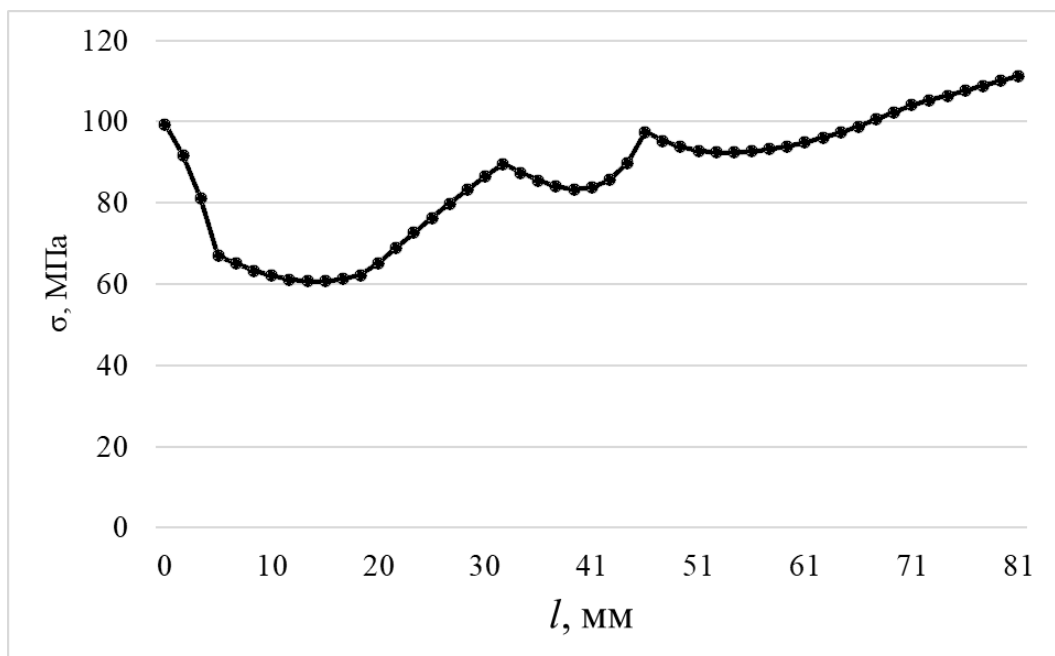


Рисунок 4.26 – Діаграма розподілу напружень вздовж найближчого примикаючого до отвору зварного шва при довжині прорізу 60 % по відношенню до загальної довжини привареної частини розкоса

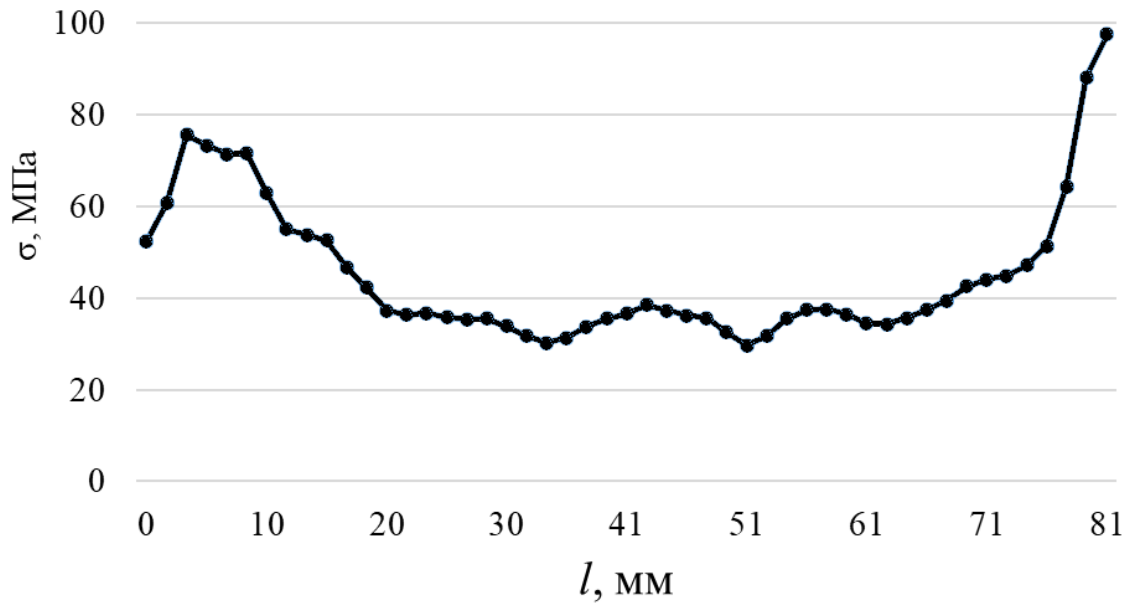


Рисунок 4.27 – Діаграма розподілу напружень вздовж найближчого примикаючого до отвору зварного шва при довжині прорізу 80 % по відношенню до загальної довжини привареної частини розкоса

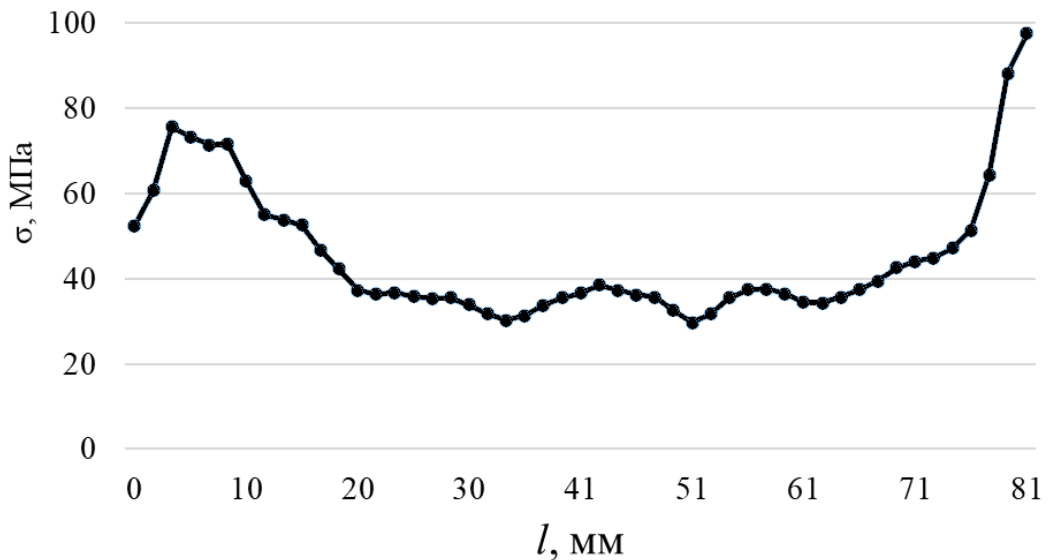


Рисунок 4.28 – Діаграма розподілу напружень вздовж найближчого примикаючого до отвору зварного шва при довжині прорізу 100 % по відношенню до загальної довжини привареної частини розкоса

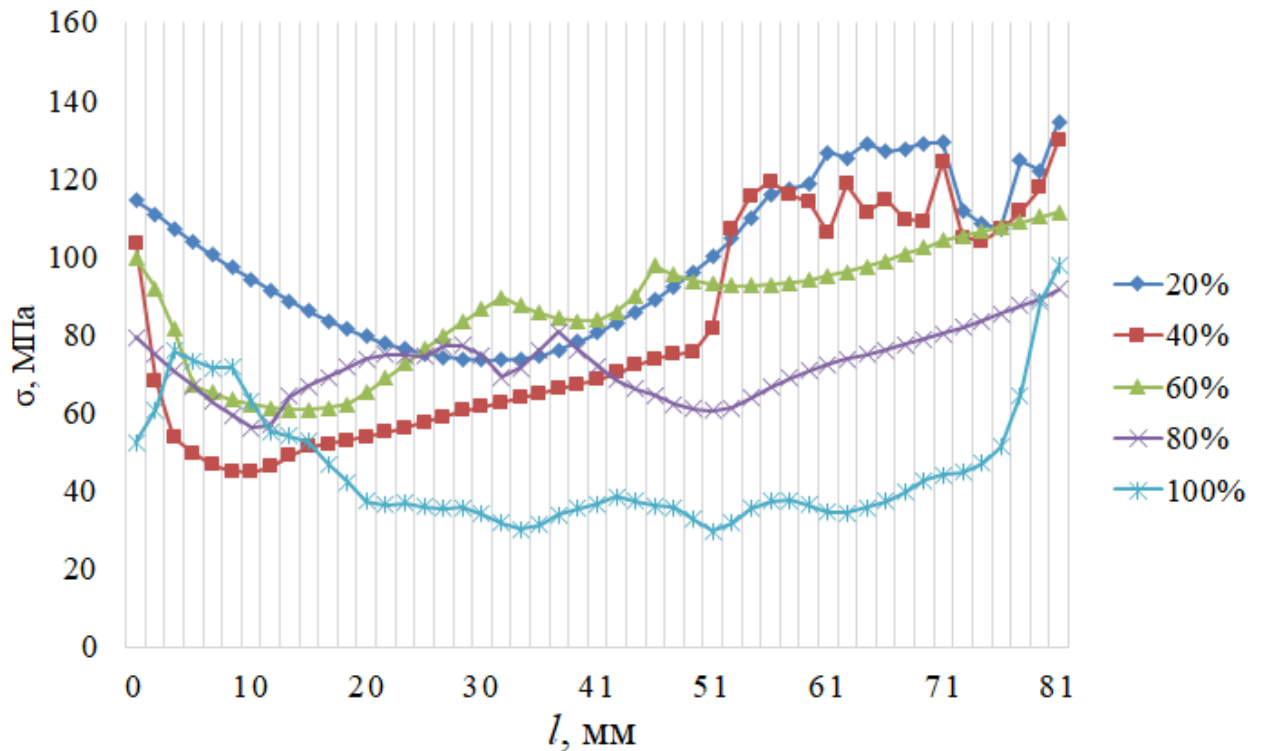


Рисунок 4.29 – Суміщена діаграма напружень вздовж зварних швів для різних довжин прорізів

Збільшення рівня напруження по довжині зварних швів виникає в результаті згину в місці циліндричних отворів. Однак для різних довжин прорізів їх вплив не є однозначним.

За отриманими діаграмами напружень (рис. 4.24...4.29) і експериментальною чисельною базою виконано оптимізацію геометричних параметрів фасонки для отримання максимального напруцювання ферми за умов циклічних навантажень.

Виявлено, що діаметр отвору в кінці прорізу d суттєво не впливає на поведінку ферми при циклічних навантаженнях і з технологічних міркувань може бути рівним $d = 10$ мм (рис. 4.30).

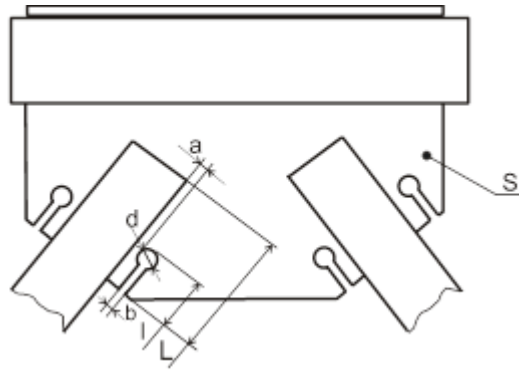


Рисунок 4.30 – Геометричні параметри фасонки власної конструкції

Виконано комп'ютерний моделюючий експеримент для визначення кількості циклів до руйнування N К-подібного вузла з оригінальною фасонкою власної конструкції, що має прорізи, паралельні до осі розкосів. Досліджено фасонки з різною довжиною прорізів l по відношенню до довжини привареної частини фасонки розкосу L . Виявлено, що при менших відносних значеннях l/L початкові пошкодження виникають в зоні термічного впливу від зварювання на краю фасонки. При більших відносних значеннях l/L початкові пошкодження зароджуються в циліндричному отворі в кінці прорізу. Ці пошкодження впродовж подальших циклічних навантажень поширюються аж до руйнування конструкції.

За результатами описаних досліджень побудовано діаграму кількості циклів до руйнування конструкції N в залежності від відносної довжини прорізу l/L для коефіцієнту асиметрії циклу навантаження $R = 0,36$ (рис. 4.31). За отриманою графічною залежністю $N = f(l/L)$ визначено оптимальну довжину прорізу, що становить 80% від загальної довжини привареної частини розкоса до фасонки.

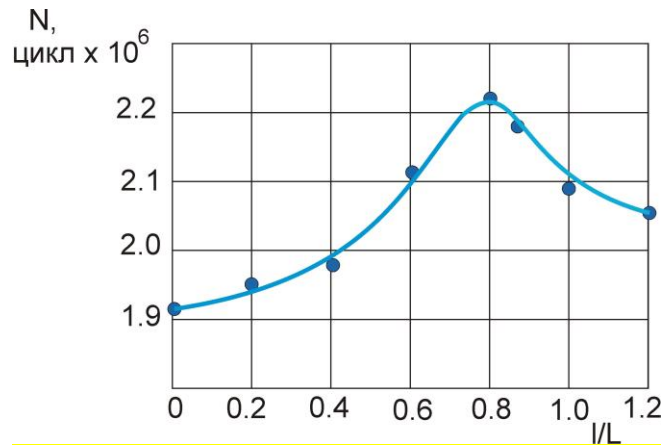


Рисунок 4.31 – Оптимізація довжини прорізу

За результатами комп'ютерного моделюючого експерименту визначено, що віддаль від краю отвору до розкоса a доцільно приймати $a=4S$, де S – товщина матеріалу фасонки. Ширина прорізу визначається виходячи з товщини фасонки і коефіцієнту асиметрії циклу навантаження (див. рис. 4.30).

Для оптимізованої довжини прорізу подано кількість циклів до появи втомної тріщини і до настання граничного стану ферми (табл. 4.7).

Таблиця 4.7

Втомне пошкодження повномасштабної зварної ферми з фасонкою з оптимізованою довжиною прорізів

Навантаження, кН		Коефіцієнт асиметрії циклу, R	Частота навантажування, ν Гц	Кількість циклів	
P_{max}	P_{min}			До появи втомної тріщини	До настання граничного стану
40	8	0,2	0,03	1036183	1168020
30	8	0,26	0,03	1199426	1644248
20	8	0,4	0,03	1887857	2397173
10	8	0,8	0,03	3349357	4655104

Побудовано діаграму втомного руйнування конструкції при оптимізованій довжині прорізів на фасонках (рис. 4.32).

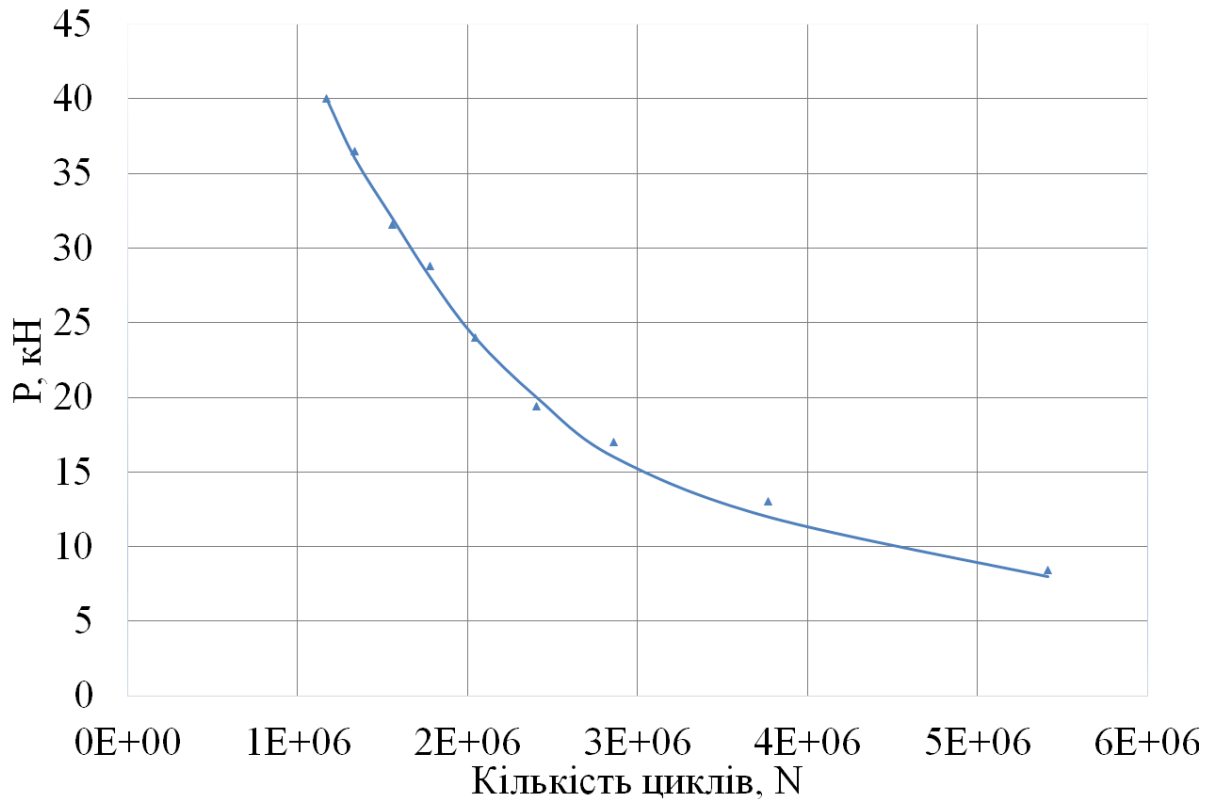


Рисунок 4.32 – Діаграма втомного руйнування повномасштабної зварної ферми з фасонкою з прорізами 80% довжини за результатами КМЕ

Отримана діаграма дає можливість визначити ресурс ферми на етапі її проектування при відомих параметрах силового впливу.

4.6 Порівняння результатів втомної довговічності вузлів зварних ферм

Для порівняння отриманих результатів досліджень ферм з різними типами виконання вузлів подано зведену діаграму втомного руйнування (рис. 4.33).

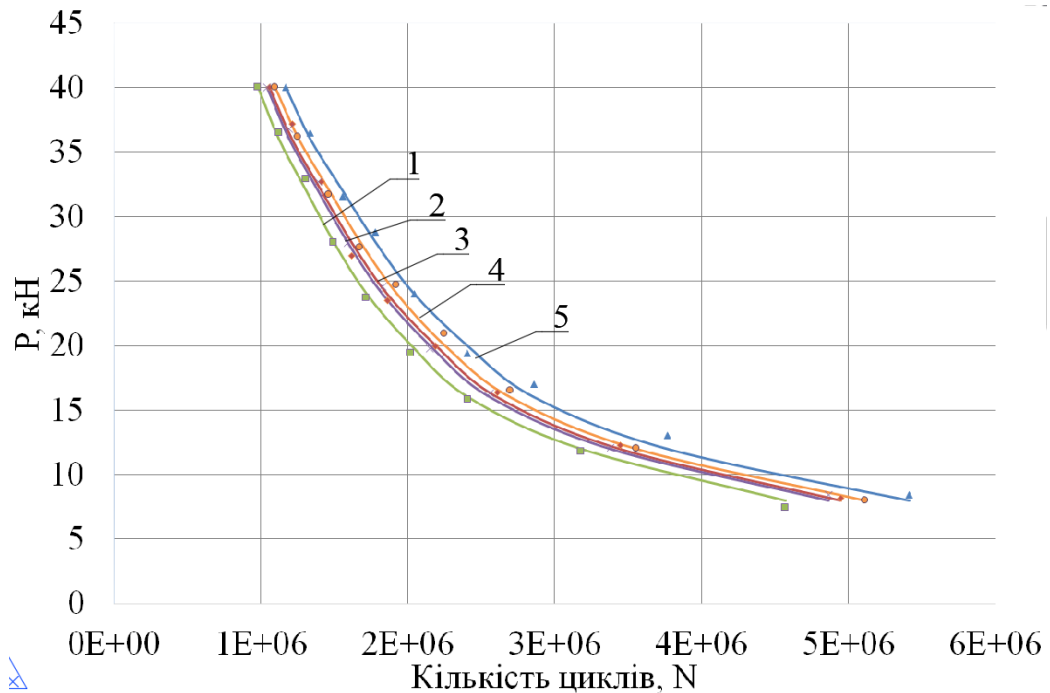


Рисунок 4.33 – Зведені діаграми втомного руйнування за результатами дослідження ферм з різним виконанням вузлів: 1 безфасонковий вузол; 2 – у вигляді надставки; 3 – класична фасонка ; 4 – з подовженою нижньою частиною 5 – з прорізами (власна конструкція)

За результатами досліджень різних виконань К-подібних вузлів зварних ферм при дії на конструкцію циклічних навантажень виявлено кількість циклів до настання граничного стану ферми при різних значеннях максимального навантаження в циклі (табл. 4.8). За порівнянням кількості циклів навантажень до настання граничного стану ферми визначено співвідношення ресурсу ферм з різним конструктивним виконанням К-подібних вузлів. За базу для порівняння прийнято безфасонкове виконання ферми. Чисельну базу результатів порівняння зведено в табл. 4.8.

Проаналізувавши отримані діаграми очевидно, що найменшу схильність до пошкодження і руйнування вузлів, а отже і найбільший ресурс при дії циклічних навантажень буде мати ферма з фасонками власної конструкції. Саме при такій конструкції і оптимізованій довжині прорізу ресурс ферми для

середнього діапазону навантажень ($P_{\max}=25$ кН) збільшиться на 18,3% в порівнянні з безфасонковим виконанням вузлів.

Таблиця 4.8

Співвідношення між напрацюванням плоских зварних ферм до моменту їх руйнування за умов циклічних навантажень для різних К-подібних вузлів

P, кН	Без фасонки		Фасонка у вигляді надставки		Фасонка класична (вставлена у пояс)		Фасонка із подовженою нижньою частиною		Фасонка із прорізами (власна конструкція)	
	N ₀	%	N ₁	+ %	N ₂	+ %	N ₃	+ %	N ₄	+ %
10	3876355	100	4125136	6,5	4198092	8,3	4337641	11,9	4601233	18,7
15	2992411	100	3180932	6,4	3237788	8,1	3342523	11,7	3546007	18,5
20	2026351	100	2151989	6,2	2192516	8,1	2250901	11,2	2397173	18,3
25	1718564	100	1825114	6,2	1856049	8,0	1909324	11,1	2033061	18,3
30	1392234	100	1477160	6,1	1503612	8,1	1547379	11,0	1644248	18,1
35	1197653	100	1269512	6	1292267	7,8	1329394	11,0	1413230	18,0

4.7 Рекомендації до використання результатів досліджень

Отримані в роботі експериментальні результати, їх аналіз і узагальнення дають можливість сформулювати ряд практичних рекомендацій щодо проектування і експлуатації плоских зварних ферм з К-подібними вузлами.

1. Для досягнення високого ступеня співпадання розрахункових і експлуатаційних показників при проектуванні зварних ферм доцільно використовувати не класичні методики розрахунку, а сучасні комп'ютерно-моделюючі методи.

2. При використанні комп'ютерно-моделюючих методів для проектування зварних ферм, зокрема для визначення параметрів К-подібних

вузлів, потрібно вибирати такі параметри скінченно-елементної моделі, які дали високі показники верифікації для аналогічної конструкції і подібних силових впливів (див. п. 3.4, 4.3, 4.4, 4.5.1, 4.5.2).

3. Доцільність використання фасонки і вибір їх конкретних конструкцій визначається за співвідношенням техніко-економічних показників безфасонкової ферми та ферми з конкретною фасонкою (див. п. 3.4, 4.3, 4.4, 4.5.1, 4.5.2).

4. При дії на ферму циклічних навантажень для забезпечення максимального ресурсу її експлуатації при мінімальній матеріаломісткості конструкції, а отже і її вартості, доцільно використати запропоновані в роботі оригінальні К-подібні вузли з оптимальними геометричними параметрами (див. п. 4.5.2, 4.5.1).

4.8 Висновки за розділом 4

Виконано комплексне дослідження плоских зварних ферм з К-подібними вузлами.

За результатами напівнатурного експерименту виявлено, що для безфасонкового виконання зварної ферми поява тріщини відбувається у лівому проміжному К-подібному вузлі. При цьому втомна тріщина зароджується у міжроскосному просторі в нижній частині зварного шва і поширюється в сторону правого проміжного розкоса. Визначено напрацювання конструкції до появи візуально помітних циклічних пошкоджень та до руйнування масштабної моделі ферми.

Виконано комп'ютерний моделюючий експеримент для масштабного зразка зварної ферми з безфасонковим виконанням вузлів. Визначено місце зародження втомної тріщини і напрацювання конструкції до появи циклічних пошкоджень і руйнування ферми.

Виконано верифікацію отриманих показників пошкоджуваності і отримано їх задовільне співпадання.

Виконано комп'ютерний моделюючий експеримент для повномасштабної ферми із різномітним виконанням вузлів. Для цього прийняті параметри скінченно-елементної моделі як для масштабного зразка.

Для ферм з різними виконаннями вузлів визначено параметри пошкоджуваності. Виявлено, що найбільше напруження за умов експлуатаційних навантажень здатна витримати ферма з фасонками оригінальної конструкції з прорізами.

Виконано оптимізацію параметрів вузлової фасонки із прорізами для досягнення максимального напруження за умов циклічних навантажень.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Згідно аналізу літературних джерел, систематизовано та обрано конструктивну схему зварної ферми і вузлів.

2. Запропоновано методикау комплексного дослідження зварних ферм, яка поєднує натурний, напівнатурний і комп'ютерний моделюючий експеримент.

3. Виконано комплексні дослідження пошкоджуваності К-подібних вузлів зварних ферм при статичному навантаженні. Зроблено верифікацію результатів досліджень і отримано їх співпадання 87,5...92,6%. Виявлено, що за таких умов граничний стан формується за межами вузлів.

4. Виконано комплексні дослідження пошкоджуваності різноманітних конструктивних виконань К-подібних вузлів зварних ферм при циклічних навантаженнях. Виявлено, що втомні пошкодження зароджуються у вузлах і довговічність ферм при однакових силових впливах визначається конструкцією вузлів.

5. Виявлено, що найбільшу довговічність при циклічних навантаженнях забезпечує ферма з оригінальними фасонками власної конструкції, які мають прорізи, паралельні до осі розкосів.

6. Виконано оптимізацію геометричних параметрів для оригінальних фасонкок власної конструкції і визначено, що максимальна довговічність ферм забезпечується при довжині прорізу, яка становить 80% від довжини привареної до фасонки частини розкосу.

7. Узагальнивши і проаналізувавши отримані результати, сформульовано рекомендації для проектування ферм в цілому та К-подібних вузлів зокрема, які працюватимуть за умов циклічних навантажень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Нілов О.О., Пермяков В.О., Шимановський О.В., Білик С.І., Лавріненко Л.І., Белов І.Д., Володимирський В.О. Металеві конструкції: Загальний курс: Підручник для вищих навчальних закладів. – Видання 2-е, перероблене і доповнене / О.О. Нілов, О.В. Шимановський. – К.: Сталь, 2010. – 869 с.
2. Tiainen, T.; Mela, K.; Jokinen, T.; Heinisuo, M. The effect of steel grade on weight and cost of warren-type welded tubular trusses. Proc. Inst. Civ. Eng. Struct. Build. 2017, 170, 855–873.
3. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ : ДБН В.1.2.-14-2009. – К.: Вид-во Держкомбуд України, 2009.
4. Металлические конструкции: общий курс: Учебник для студентов высших учебных заведений / И.Ю.Кудишин, Е.И. Беленя, В.С.Игнатъева и др. / Под ред. Ю.И.Кудишина М.: Изд. Центр «Академия», 2008.688с.
5. Будівельна механіка та металеві конструкції / [Баженов В.А., Дащенко О. Ф., Коломієць Л. В., Ухов О. В.] [підр. для студ. вищ. навч. зал.]. – Одеса : Астропринт, 2001. – 432 с.
6. Сетков В.И Строительные конструкции М.: ИНФРА-М, 2005
7. Мандриков А.П. Примеры и расчёты металлических конструкций М. Стройиздат, 1991г.
8. Шингера Н.Я. Статистична модель для визначення залишкового ресурсу типової зварної ферми при циклічних навантаженнях: дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи / Шингера Наталія Ярославівна. – Тернопіль, 2012. – 166 с.
9. Рибачок О. І. Деформування зварної підкрювняної ферми при статичних навантаженнях : 8.06010101 / – Тернопіль, 2008. – 107 с.

10. Моделирование напряженно-деформированного состояния фасоннок стропильных ферм из парных уголков / В. Сабуров, Н. Козьмин, Е. Кириллова. // *Computational Civil and Structural Engineering*. – 2008. – №2. – С. 105–105.

11. Пат. 2329361 Російська федерація, МПК⁷ Е 04 С 3/08. Вузлове стикове з'єднання елементів ферми (варіанти) / В.А. Зінькова, А.А. Соколов; заявник і власник патенту БГТУ ім. В.Г. Шухова. - № 2006140596/03, заявн. 16.11.06 ; опубл. 20.07.08, Бюл. № 20. – 3 с.

12. Huang, Q.; Xu, B.; Li, B.; Song, G.; Teng, J. Monitoring for Large Cross-Section CFSTs of a Super High-Rise Building with Piezoceramic Actuators and Sensors. *Adv. Mater. Res.* 2011, 163–167, 2553–2559.

13. Проектування металевих конструкцій : Спец. курс. Навч. посібник для вузів / В.В. Бірюльов, І.І. Кошін, И.В. Крилов, А.В. Сільвестров. – Л.: Будвид, 1990. – 432 с.

14. Wardenier, J.; Packer, J.A.; Zhao, X.L.; Vegte, G.J.V.D. *Hollow Sections in Structural Applications*; CIDECT: Geneva, Switzerland, 2010.

15. Wardenier, J.; Kurobane, Y.; Packer, J.A.; Vegte, G.J.V.D.; Zhao, X.L. *Design Guide for CIRCULAR Hollow Section (CHS) Joints under Predominantly Static Loading*; CIDECT (Ed.) and Verlag TÜV Rheinland: Cologne, Germany, 2008.

16. Козлов С.В. Повышение устойчивости сжатых элементов ферм из уголковых профилей локальными термическими воздействиями: дис... канд. тех. наук: 05.23.01. [Текст] / Козлов Сергей Васильевич.– К.: 2004. – 168с.

17. Будівельна механіка та металеві конструкції / [Баженов В.А., Дащенко О. Ф., Коломієць Л. В., Ухов О. В.] [підр. для студ. вищ. навч. зал.]. – Одеса : Астропринт, 2001. – 432 с.

18. Беляев Б.Ф. Исследование напряженно-деформированного состояния монтажных узлов высотных сооружений в связи с оценкой их несущей способности и долговечности / Б.Ф. Беляев, В.В. Евдокимов, Б.В. Остроумов // *Научные испытания, инструментальные наблюдения и контроль строительный*

металлоконструкций при возведении и эксплуатации инженерных сооружений. – М., 1990. – С. 34-47.

19. Левитанский И.В. Область применения гнutosварных замкнутых профилей в металлических конструкциях промышленных зданий / И.В. Левитанский, В.В. Севрюгин, З.Р. Джафарва // Проектирование металлических конструкций. – 1974. - № 7. – С. 42-56.

20. Левитанский И.В. Разработка и экспериментальные исследования новых типов строительных ферм из широкополочных и гнutosварных профилей / И.В. Левитанский, Ф.Ф.Куклин // Экспериментальные конструкции производственных зданий. – М., 1984. – С. 52-61.

21. Надежность эксплуатации сварных конструкций. Оценка и управление /Б.Е. Патон, Л.М. Лобанов, и др. // Автоматическая сварка, 2010. – №5. – с. 36 – 43.

22. Методы определения показателей надежности по экспериментальным данным : РД 50-690-89 Надежность в технике. – М. : Изд-во стандартов, 1990. – 95 с.

23. Обробка зварних з'єднань / Р. А. Куликовський, О. Є. Капустян. – Запоріжжя: Запорізький національний технічний університет, 2016. – 78 с. – (1).

24. Вплив конструктивних особливостей вузлів на тримкість зварних ферм : 8.06010101 / Басара М. А. – Тернопіль, 2017. – 101 с.

25. Liu, K.; Liu, B.; Wang, Z.; Wang, G.; Guedes Soares, C. An experimental and numerical study on the behaviour of tubular components and T-joints subjected to transverse impact loading. *Int. J. Impact Eng.* 2018, 120, 16–30. Qu, H.; Hu, Y.; Huo, J.; Liu, Y.; Jiang, Y. Experimental study on tubular K-joints under impact loadings. *J. Constr. Steel Res.* 2015, 112, 22–29.

26. M. R. Morgan, M. M. K. Lee, “Prediction of stress concentrations and degrees of bending in axially loaded tubular K-joints,” *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 45, pp. 67–97, 1998.

27. Зінькова В.А. Методика експериментальних досліджень вузлових з'єднань елементів ферми із труб // Вісник БГТУ ім. В.Г. Шухова. - 2012. - № 1. - С. 50-52.

28. M. P. M. Connolly, A fracture mechanics approach to the fatigue assessment of tubular welded Y and K-joints. PhD Thesis, University College London, UK; 1986.

29. E. Chang, W. D. Dover, "Prediction of degree of bending in tubular X and DT joints," International Journal of Fatigue, vol. 21, pp. 147–161, 1990.

30. Зінькова В. А. Совершенствование трубчатых ферм с бесфасоночными узловыми соединениями: дис. канд. техн. наук : 05.23.01 / Зінькова И. В. – Белгород, 2014. – 136 с.

31. 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.

32. A. K. Hellier, M. Connolly, W. D. Dover, "Stress concentration factors for tubular Y and T-joints," International Journal of Fatigue, vol. 12, pp. 13–23, 1990.

33. W. Shen, Y. S. Choo, "Stress intensity factor for a tubular T-joint with grouted chord," Engineering Structures, vol. 35, pp. 37–47, 2012.

34. 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.

35. Ding, F.X.; Luo, L.; Wang, L.; Cheng, S.; Yu, Z.W. Pseudo-static tests of terminal stirrup-confined concrete-filled rectangular steel tubular columns. J. Constr. Steel Res. 2018, 144, 135–152.

36. Xu, B.; Zhang, T.; Song, G.; Gu, H. Active interface debonding detection of a concrete-filled steel tube with piezoelectric technologies using wavelet packet analysis. Mech. Syst. Signal Process. 2013, 36, 7–17.

37. Sakai, Y.; Hosaka, T.; Isoe, A.; Ichikawa, A.; Mitsuki, K. Experiments on concrete filled and reinforced tubular K-joints of truss girder J. *Constr. Steel Res.* 2004, 60, 683–699.
38. Bruno, R. J. Identification of Nonlinear Joints in a Truss Structure / R. J. Bruno // Proceedings of the American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) / American Society of Mechanical Engineers (ASME) Adaptive Structures Forum, Hilton Head, SC. – Washington, 1994. – P. 402–410.
39. Qian, X.D.; Choo, Y.S.; Liew, J.Y.R.; Wardenier, J. Static Strength of Thick-Walled CHS X-Joints Subjected to Brace Moment Loadings. *J. Struct. Eng.* 2007, 133, 1278–1287.
40. W. Shen, Y. S. Choo, “Stress intensity factor for a tubular T-joint with grouted chord,” *Engineering Structures*, vol. 35, pp. 37–47, 2012.
41. A. C. Wordsworth, G. P. Smedley, “Stress concentrations at unstiffened tubular joints,” Proceedings of the European Offshore Steels Research Seminar, Paper 31, Cambridge, UK; 1978.
42. Qian, X.D.; Choo, Y.S.; Liew, J.Y.R.; Wardenier, J. Static Strength of Thick-Walled CHS X-Joints Subjected to Brace Moment Loadings. *J. Struct. Eng.* 2007, 133, 1278–1287.
43. Fenton, M.; McNally, C.; Byrne, J.; Hemberg, E.; McDermott, J.; O’Neill, M. Automatic innovative truss design using grammatical evolution. *Autom. Constr.* 2014, 39, 59–69.
44. Khademi, F. Load Rating of Railway Bridges by Analysis and Testing; Dissertations & Theses—Gradworks; Illinois Institute of Technology: Chicago, IL, USA, 2015.
45. Wang, X.L.; Yang, W.W.; Zou, L. Finite Element Analysis for Unstiffened Overlapped CHS K-Joints Welded in Different Ways. *Adv. Mater. Res.* 2011, 163–167, 299–306.

46. Khademi, F. Enhancing Load Rating of Railway Truss Bridges through a Hybrid Structural Analysis and Instrumentation Procedure. Ph.D. Thesis, Illinois Institute of Technology, Chicago, ON, USA, 2017.

47. Shao, Y.; He, S.; Zhang, H.; Wang, Q. Behavior of tubular T-joints after exposure to elevated temperature. *Ocean Eng.* 2017, 129, 57–67.

48. Lan, X.; Huang, Y.; Chan, T.-M.; Young, B. Static strength of stainless steel K- and N-joints at elevated temperatures. *Thin-Walled Struct.* 2018, 122, 501–509.

49. Choo, Y.S.; Qian, X.D.; Wardenier, J. Effects of boundary conditions and chord stresses on static strength of thick-walled CHS K-Joints. *J. Constr. Steel Res.* 2006, 62, 316–328.

50. H. Ahmadi, M. A. Lotfollahi-Yaghin, Y. B. Shao, “Chord-side SCF distribution of central brace in internally ring-stiffened tubular KTjoints: A geometrically parametric study,” *Thin-Walled Structures*, vol. 70, pp. 93–105, 2013.

51. Azari Dodaran, N.; Ahmadi, H.; Lotfollahi-Yaghin, M.A. Static strength of axially loaded tubular KT-joints at elevated temperatures: Study of geometrical effects and parametric formulation. *Mar. Struct.* 2018, 61, 282–308.

52. He, S.-B.; Shao, Y.-B.; Zhang, H.-Y.; Yang, D.-P.; Long, F.-L. Experimental study on circular hollow section (CHS) tubular K-joints at elevated temperature. *Eng. Fail. Anal.* 2013, 34, 204–216.

53. Diagnosis and Mitigation of Fatigue Damage in Longitudinal Diaphragms of Cable-Stayed Bridges / G.Tong, L. Zhongxiang, L. Jie, H. Dazhang // *Journal of Bridge Engineering*. – 2016. – Режим доступа до ресурсу: https://www.researchgate.net/publication/303531630_Diagnosis_and_Mitigation_of_Fatigue_Damage_in_Longitudinal_Diaphragms_of_Cable-Stayed_Bridges.

54. Хоббахер А.Ф. Расчет на усталость сварных конструкций по напряжениям // *Автомат. сварка*, 2003 – №10 – II – с.122 – 126.

55. M. M. K. Lee, D. Bowness, "Estimation of stress intensity factor solutions for weld toe cracks in offshore tubular joints," *International Journal of Fatigue*, vol. 24, pp. 861–875, 2002.
56. Hobbacher A. et al. *Fatigue design of welded joints and components* – International Inst. of Welding, Abington publ., Cambridge UK, 1996. – 103 p.
57. UK Department of Energy (DoE), *Background to new fatigue design guidance for steel joints and connections in offshore structures*, London, UK; 1995.
58. W. Shen, Y. S. Choo, "Stress intensity factor for a tubular T-joint with grouted chord," *Engineering Structures*, vol. 35, pp. 37–47, 2012.
59. A. C. Wordsworth, G. P. Smedley, "Stress concentrations at unstiffened tubular joints," *Proceedings of the European Offshore Steels Research Seminar*, Paper 31, Cambridge, UK; 1978.
60. Yang, W.; Wang, X. Experimental research on seismic behavior of unstiffened overlapped CHS K-Joints. *J. Build. Struct.* 2013, 34, 85–92.
61. A.F. Hobbacher, *Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components IIW Collection*, Springer International Publishing, 2016.
62. Gho, W.M.; Yang, Y.; Gao, F. Failure mechanisms of tubular CHS joints with complete overlap of braces. *Thin-Walled Struct.* 2006, 44, 655–666.
63. Zhao, X. L., Packer, J. A., *Fatigue design procedure for welded hollow section joints*, Doc. XIII-1804-99, XV-1035-99, IIW, Cambridge, Abington, 2000.
64. Wang, W.; Chen, Y.-Y. Hysteretic behaviour of tubular joints under cyclic loading. *J. Constr. Steel Res.* 2007, 63, 1384–1395. Suo, Y.; Yang, W.; Chen, P. Study on Hysteresis Model of Welding Material in Unstiffened Welded Joints of Steel Tubular Truss Structure. *Appl. Sci.* 2018, 8, 1701
65. Li, T.; Lie, S.T.; Shao, Y.B. Fatigue and fracture strength of circular hollow section TT-joint. *J. Constr. Steel Res.* 2017, 129, 101–110.
66. Lee, C.K.; Chiew, S.P.; Lie, S.T.; Sopha, T. Comparison of fatigue performances of gapped and partially overlapped CHS -joints. *Eng. Struct.* 2011, 33, 44–52.

67. R.J.M. Pijpers. Fatigue strength of welded connections made of very high strength cast and rolled steels : ph.d.,: MC8.06265 / . – Netherlands, 2011. – 270 с.

68. A. K. Hellier, M. Connolly, W. D. Dover, “Stress concentration factors for tubular Y and T-joints,” *International Journal of Fatigue*, vol. 12, pp. 13–23, 1990.

69. Kaveh, A.; Khayatazad, M. Ray optimization for size and shape optimization of truss structures. *Comput. Struct.* 2013, 117, 82–94.

70. M. Efthymiou, “Development of SCF formulae and generalized influence functions for use in fatigue analysis,” OTJ 88, Surrey, UK; 1988

71. Xiao, Z.-G., Yamada, K., A method of determining geometric stress for fatigue strength evaluation of steel welded joints, *International Journal of Fatigue*, 26 (2004) 1277-1293.

72. Y. B. Shao, “Analysis of stress intensity factor (SIF) for cracked tubular K-joints subjected to balanced axial load,” *Engineering Failure Analysis*, vol. 13, pp. 44–64, 2006.

73. DNV, Fatigue strength analysis of offshore steel structures. Recommended practice RP-C203. Det Norske Veritas, 2001.

74. Marshall, P.W., Design of welded tubular connections, Basis and use of AWS provisions, Elsevier Science Publishers, Amsterdam, 1992.

75. S. T. Lie, C. K. Lee, S. M. Wong, “Modeling and mesh generation of weld profile in tubular K-joint,” *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 57, pp. 547–567, 2001.

76. Планирование механических испытаний и статистическая обработка результатов. Методические указания : РД-50-398-83.– М. : Изд-во стандартов, 1984. – 199 с.

77. Y. B. Shao, “Geometrical effect on the stress distribution along weld toe for tubular K-joints under axial loading,” *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 63, pp. 1351–1360, 2007.

78. Schumacher, A. Fatigue behaviour of welded circular hollow section joints in bridges. EPFL Thesis No. 2727, Lausanne, 2003a.

79. Schumacher, A., Nussbaumer, A., Experimental study on the fatigue behaviour of welded tubular K-joints for bridges. *Engineering Structures*, Elsevier Science, 28(5), pp. 745-755.

80. R.J.M. Pijpers. Fatigue strength of welded connections made of very high strength cast and rolled steels : ph.d.,: MC8.06265 / . – Netherlands, 2011. – 270 с.

81. Fatigue damage of the heel joint of welded roof truss / Y.Kovalchuk, N. Shynhera, Y. Shved, V. Voronchak // Ternopil National Technical University. – 2020. – Режим доступу до ресурсу: http://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/lib/33367/2/TNTUSJ_2020v99n3_Kovalchuk_Y-Fatigue_damage_of_the_heel_28-33.pdf.

82. 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.

83. Yang, W.; Wang, X. Numerical analysis of hysteretic behavior of unstiffened overlapped CHS K-Joints in steel pipe structures by finite element method. *J. Harbin Eng. Univ.* 2012, 12, 9.]

84. Noh, B., Song, J., Bae, S., Fatigue Strength evaluation of the Load-Carrying Cruciform Fillet Welded Joints Using Hot-Spot Stress, *Key Engineering Materials*, Vols.324-325 (2006) pp. 1281-1284.

85. 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

86. 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.

87. Y. B. Shao, Z. F. Du, S. T. Lie, “Prediction of hot spot stress distribution for tubular K-joints under basic loadings,” *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 65, pp. 2011–2026, 2009.

88. Ковальчук Я.О, Басара М.А, Шингера Н. Я. «К-подібний вузол зварної ферми» патент №124552. Україна, МПК E04C 3/02 (2006.01); E04B 1/24 (2006.01); опубл.10.04.2018, Бюл. №7.

89. Ковальчук Я.О, Басара М.А, Шингера Н. Я. «К-подібний вузол зварної ферми» патент № 131723. Україна, МПК E04B 1/24 (2006.01); F16S 3/00; E04C 3/02 (2006.01), опубл. 25.01.2019, Бюл. №2.

90. Ковальчук Я.О, Басара М.А, Шингера Н. Я. «Вузол зварної ферми для циклічних навантажень» патент № 141363. Україна, МПК E04B 1/24 (2006.01), опубл. 10.04.2020, Бюл. №7.

91. Ковальчук Я.О, Басара М.А, Шингера Н. Я. «Конструювання вузлів з використання ПК ANSYS», Вісник ТНТУ. — Тернопіль 2017. — Том 85. — № 1. — С. 47–52.

92. 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.

93. 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.

94. H.-N. Cho, J.-K. Lim, H.-H. Choi, Reliability-based fatigue failure analysis for causes assessment of a collapsed steel truss bridge, *Eng. Fail. Anal.* 8 (2001) 311–324.

95. 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

96. Седов Л. И. Методы подобия и размерности в механике / Седов Л. И. — М. : Наука, 1987. — 432 с.
97. 104. Веников В. А. Теория подобия и моделирования / Веников В. А. — М. : Высшая школа, 1976. — 479 с.
98. Кирпичев М. В. Теория подобия / Кирпичев М. В. — М. : Изд. АН СССР, 1953. — 94 с.
99. Бруйка В.А. Инженерный анализ в Ansys Workbench: Учеб. пособ. / В.А. Бруйка, В.Г. Фокин, Е. А. Солдусова, Н.А. Глазунова, И.Е. Адеянов. — Самар. гос. тех. ун-т, 2010. — 271 с.
100. ANSYS Inc. 2016, ANSYS 17.1 Help System. Canonsburg, Pennsylvania.
101. Ковальчук Я.О, Басара М.А, Шингера Н. Я. «К-подібний фасонковий вузол зварної ферми» патент №147231 Україна, МПК E04C 3/02; E04B 1/24 (2006.01), опубл. 22.04.2021, Бюл №16.

ДОДАТОК



Україна, м. Тернопіль,
Товариство з обмеженою відповідальністю
«Смарттехбуд»

ІКЮО 42393135, р/р ІВАН UA 83380805 00000000 26005611254 в АТ «Райффайзен Банк Аваль»,
м. Київ ПІН № 39502025

Вих. № 12

10 березня 2021 р.

Д О В І Д К А
про впровадження результатів дисертаційних досліджень

Результати дисертаційних досліджень Басари Миколи Андрійовича за темою «**Пошкодження і руйнування К-подібних вузлів плоских зварних ферм**» розглянуто і схвалено на технічній раді ТОВ «Смарттехбуд».

Висвітлені в роботі матеріали щодо підвищення ресурсу експлуатації зварних ферм за умов циклічних навантажень використано при проектуванні й виготовленні комплекту підкрювляних зварних ферм для роботи з підкрановими шляхами. В цих фермах використано конструкцію фасонки згідно патенту №124552. Ферми виготовлені й успішно експлуатуються.

Патенти автора, які стосуються оригінальних конструкцій фасонки для зварних ферм, а саме № 131723 та № 141363, використано при проектуванні зварних ферм, які працюватимуть в комплексі з підвісними конвеєрами.

Технічний директор



Б.П.Каспрук