

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ШВЕД ЯРОСЛАВ ЛЕОНІДОВИЧ

УДК 624.014.078.45

ДИСЕРТАЦІЯ

**МІЦНІСТЬ І ДЕФОРМІВНІСТЬ ЗВАРНОЇ ПРЯМОКУТНОЇ ФЕРМИ
ПРИ ДІЇ СИЛОВИХ І ТЕМПЕРАТУРНИХ ВПЛИВІВ**

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

Я.Л.Швед

ініціали та прізвище дисертанта

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

Тернопіль - 2024

АНОТАЦІЯ

Швед Я.Л. «Міцність і деформівність зварної прямокутної ферми при дії силових і температурних впливів». – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії в галузі знань 13 “Механічна інженерія” за спеціальністю 131 “Прикладна механіка”. - Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Тернопіль, 2024.

Дана робота стосується актуальної науково-технічної проблеми визначення допустимих навантажень на зварні прямокутні ферми з врахуванням сумісної дії експлуатаційних температур, як кліматичного, так і технологічного діапазону. Розв’язання цієї проблеми дасть можливість максимально використати несучу здатність конструкції і не допустити її аварійного руйнування впродовж експлуатації.

Зазвичай зварні прямокутні ферми мають прямокутну конфігурацію і в найпростішому випадку їх застосовують при спорудженні виробничих, торгових чи спортивних споруд як проміжні опори для встановлення кроквяних дахових конструкцій в прогонах між несучими колонами. Однак, крім цього, такі ферми можуть тримати і технологічне устаткування (підкранові шляхи та підвісні конвеєри). Довжина ферм зазвичай 12...36 метрів. Навіть за умови впливу лише кліматичних температурних коливань при таких розмірах в елементах конструкції і місцях їх зварних з’єднань формуються внутрішні напруження, які накладаються на напруження від силового впливу і знижують розрахункову тримкість конструкції в цілому. Сучасні інженерні підходи вирішують це питання шляхом введення додаткових коефіцієнтів запасу міцності, які збільшують матеріаломісткість, а отже, і вартість ферми.

Проблема сумісного силового і теплового впливу ускладнюється при дії на ферму ще й технологічних температур. В одних випадках це виникає за умов загального впливу температури на всю будівлю (металургійний комбінат,

ливарний цех, вальцювальня, ковальський цех). В інших випадках може бути локальний вплив на ферму, коли така конструкція використовується як несуча для підвісних конвеєрів (камера порошкового фарбування металоконструкцій з температурою $+200^{\circ}\text{C}$ чи морозильна камера для швидкозаморожених продуктів з температурою -36°C).

З огляду на широке застосування зварних прямокутних ферм, їх високу матеріаломісткість та вартість, а також різні умови їх експлуатації, які неможливо комплексно врахувати за допомогою класичних інженерних методів проєктування, розв'язання наукового завдання, яке полягає у виявленні показників міцності й деформівності зварних прямокутних ферм при дії силових і температурних впливів є актуальним на сьогоднішній день.

В роботі запропоновано комплексний методичний підхід до дослідження зварних прямокутних ферм, який поєднує натурний, напівнатурний та комп'ютерний моделюючий експерименти і дає можливість верифікувати отримані результати й забезпечити високий ступінь співпадання отриманих показників з фактичними експлуатаційними результатами.

При проєктуванні зварної ферми потрібно брати до уваги аргументи, які визначають її тримальну здатність з врахуванням багатопараметричного пошкоджуючого впливу конструктивних, технологічних та експлуатаційних чинників. Важливо виявити місця концентрації напружень в конструкції, оскільки саме там відбуватиметься зародження пошкоджень, які в подальшому зумовлять руйнування конструкції.

Метою досліджень є виявлення параметрів деформування і умов руйнування зварних прямокутних ферм при сумісній дії силових і температурних чинників. Для досягнення мети дослідження вибрано конструкцію зварної прямокутної ферми та схему їх навантажування, розроблено методики комплексних експериментальних досліджень ферми, виявлено особливості деформування і руйнування ферми за різних умов,

сформульовано рекомендації для визначення міцності зварних прямокутних ферм як на етапі їх проектування, так і впродовж експлуатації.

Досліджень виконано для прямокутної зварної ферми з паралельними поясами, яку базують по двох краях знизу і навантажують зосередженою силою в двох точках навпроти вузлів на верхньому поясі. Розглянуто декілька конструктивних виконань такої ферми з різними розмірами і типами вальцьованих профілів, використаних для їх виготовлення. Виконано дослідження для повномасштабної ферми та для її фізичної моделі.

Дослідження виконано за умов статичних навантажень при врахуванні температурного впливу.

Натурний силовий експеримент виконано для маломасштабної ферми 2000x400 мм за прийнятою схемою базування і навантажування статичними зусиллями. Отримано діаграми поздовжньої й поперечної деформації нижнього пояса досліджуваної конструкції в межах пружної дефоормації при температурі 18°C.

Для цієї ж ферми виконано натурний тепловий експеримент. Побудовано діаграми поздовжніх деформації верхнього і нижнього поясів і поперечних деформацій поясів навпроти вузлів ферми в температурному діапазоні від 20 до 200 °C без силового впливу.

Досліджено фізичну модель 600x120 ферми при дії статичних навантажень на електрогідравлічній випробувальній машині СТМ-100. Діапазон випробувальних навантажень від 0 аж до руйнування конструкції. При цьому виявлено, що пошкодження ферми відбуваються за рахунок втрати стійкості ферми в площині навантажування. Внаслідок такого пластичного деформування конструкція втратила свою тримкість і зруйнувалася. Параметри деформування й руйнування ферми, виявлені при експерименті, зафіксовано й проаналізовано.

Комп'ютерний моделюючий експеримент для дослідження ферм виконано з використанням прикладного програмного пакету Ansys, який

алгоритмічно базується на скінчено-елементному аналізі. Такий підхід дав можливість оцінити поведінку досліджуваної конструкції при сумісній дії силових і температурних впливів.

При розробці комп'ютерної моделі повномасштабної зварної прямокутної ферми враховано типові рекомендації для конструкцій такого типу. Для формування адекватних параметрів скінченно-елементної моделі виконано комп'ютерний моделюючий експеримент і визначено відповідні показники деформування і руйнування ферм, раніше отриманих натурним і напівнатурним експериментом. Виконано їх верифікацію. За рахунок коректування параметрів скінченно-елементної моделі отримано співпадання відповідних показників деформування на рівні 3,4%, а руйнування 4,2%.

Для формування вхідної інформаційної бази при комп'ютерному моделюванні поведінки повномасштабної ферми виконано натурні дослідження механічних властивостей сталі ВСтЗпс в діапазоні температур від 20 до +450°C. Досліджено стандартні зразки з суцільного матеріалу і зварні зразки. Експерименти виконано на метрологічно сертифікованому устаткуванні. За результатами випробувань побудовано серію діаграм розтягу.

При виконанні комп'ютерного моделюючого експерименту для виявлення показників деформівності й міцності повномасштабної зварної прямокутної ферми використано отримані на попередньому етапі досліджень параметри скінченно-елементної моделі та діаграми розтягу сталі ВСтЗпс, отримані для різних температур. Такий методичний підхід дає можливість виявити показники деформування і руйнування досліджуваної конструкції забезпечує високу вірогідність отриманих результатів моделювання.

За результатами досліджень виявлено, що на температурний вплив є вагомим аргументом впливу на поведінку ферми при навантаженні. При дії температури відбувається двофакторний негативний вплив на ферму. Формуються додаткові внутрішні напруження як в стержневих елементах ферми, так і в місцях їх зварних з'єднань (вузлах) і змінюються механічні

властивості самого матеріалу. При незначних температурних градієнтах в 30...40°C (кліматичний діапазон) такий негативний вплив є незначним і, зазвичай, його не враховують при проектуванні ферм. Однак при вищих температурах, зокрема пожежного діапазону, ферма може втрачати понад половину своєї несучої здатності і з цим треба рахуватися.

За результатами досліджень побудовано серію таблиць, графіків, діаграм, які висвітлюють кількісну і якісну картину міцності і деформівності зварної прямокутної ферми при дії силових і температурних впливів. Запропоновано аналітичну залежність для врахування впливу температури на несучу здатність зварної прямокутної ферми.

За результатами роботи сформульовано рекомендації до їх практичного застосування при проектуванні й експлуатації зварних ферм. Зроблено загальні висновки.

Ключові слова: зварна прямокутна ферма, металеві конструкції, статичні навантаження, міцність і деформівність ферми, температурний вплив, руйнування ферми, довговічність металевих конструкцій.

SUMMARY

Shved Y.L. "Strength and deformability of a rectangular welded truss under force and temperature effects." - Qualifying scientific work in the form of a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in the field of knowledge 13 "Mechanical Engineering", specialty 131 "Applied Mechanics". - Ternopil National Technical University named after Ivan Puluj, Ternopil, 2024.

This work deals with the actual scientific and technical problem of determining the permissible loads on welded trusses, taking into account the combined effect of operating temperatures, both climatic and technological ranges. The solution to this problem will make it possible to maximize the load-bearing capacity of the structure and prevent its accidental destruction during operation.

Typically, welded trusses have a rectangular configuration and, in the simplest case, are used in the construction of industrial, commercial or sports facilities as intermediate supports for the installation of roof trusses in the spans between the load-bearing columns. However, such trusses can also support technological equipment (crane tracks and overhead conveyors). The length of the trusses is usually 12...36 meters. Even when subjected to climatic temperature fluctuations only, such dimensions generate internal stresses in the structural elements and their welded joints, which are superimposed on the stresses from the force impact and reduce the design strength of the structure as a whole. Modern engineering approaches address this issue by introducing additional safety factors that increase the material consumption and, consequently, the cost of the truss.

The problem of combined force and thermal effects is complicated when the truss is also exposed to process temperatures. In some cases, this occurs when the temperature affects the entire building (metallurgical plant, foundry, rolling mill, forging shop). In other cases, there may be a local impact on the truss when such a structure is used as a support for overhead conveyors (a powder coating chamber for

metal structures with a temperature of $+200^{\circ}\text{C}$ or a freezer for quick-frozen foods with a temperature of -36°C).

Due to the widespread use of welded trusses, their high material consumption and cost, and different operating conditions that cannot be comprehensively taken into account by classical engineering design methods, the solution of the scientific problem of determining the strength and deformability of welded trusses under force and temperature effects is relevant today.

The paper proposes a comprehensive methodological approach to the study of welded trusses, which combines full-scale, semi-full-scale, and computer modeling experiments and makes it possible to verify the results obtained and ensure a high degree of coincidence between the obtained indicators and the actual operational results.

When designing a welded truss, it is necessary to take into account the arguments that determine its load-bearing capacity, taking into account the multi-parameter damaging effects of structural, technological, and operational factors. It is important to identify the places of stress concentration in the structure, since it is there that the damage will occur, which will subsequently lead to the destruction of the structure.

The aim of the study is to determine the deformation parameters and fracture conditions of welded trusses under the combined action of force and temperature factors. To achieve the research objective, the design of the welded truss and the scheme of their loading were selected, methods for comprehensive experimental studies of the truss were developed, the peculiarities of deformation and fracture of the truss under different conditions were revealed, and recommendations for determining the strength of welded trusses both at the stage of their design and during operation were formulated.

The study was carried out for a rectangular welded truss with parallel belts, which is based on two edges from below and loaded with a concentrated force at two points opposite the nodes on the upper belt. Several structural designs of such a truss

with different sizes and types of rolled profiles used for their manufacture are considered. The study was performed for a full-scale truss and its physical model.

The study was carried out under static loads with consideration of temperature effects.

A full-scale force experiment was performed for a small-scale truss of 2000×400 mm according to the adopted scheme of basing and loading with static forces. The diagrams of longitudinal and transverse deformation of the lower belt of the studied structure within the limits of elastic deformation at a temperature of 18 °C were obtained.

A full-scale thermal experiment was performed for the same truss. The diagrams of longitudinal deformations of the upper and lower belts and transverse deformations of the belts opposite the truss nodes in the temperature range from 20 to 200 °C without force were constructed.

The physical model of the truss under the action of static loads was studied on the electrohydraulic testing machine STM-100. The range of test loads is from 0 up to the destruction of the structure. It was found that damage to the truss occurs due to the loss of stability of the truss in the loading plane. As a result of this plastic deformation, the structure lost its stability and collapsed. The parameters of deformation and collapse of the truss revealed during the experiment were recorded and analyzed.

The computer modeling experiment for the study of trusses was performed using the Ansys software package, which is algorithmically based on finite element analysis. This approach made it possible to evaluate the behavior of the studied structure under the combined action of force and temperature effects.

The development of a computer model of a full-scale welded truss was based on typical recommendations for structures of this type. To formulate adequate parameters of the finite element model, a computational modeling experiment was performed and the corresponding indicators of deformation and fracture of trusses previously obtained by full-scale and semi-full-scale experiments were determined.

Their verification was performed. By adjusting the parameters of the finite element model, the coincidence of the corresponding deformation indices was obtained at the level of 3.4% and fracture at the level of 4.2%.

To form the input information base for computer modeling the behavior of a full-scale truss, full-scale studies of the mechanical properties of VSt3ps steel in the temperature range from 20 to +450 °C were performed. Standard specimens made of solid material and welded specimens were studied. The experiments were performed on metrologically certified equipment. Based on the test results, a series of tensile diagrams were constructed.

When performing a computer modeling experiment to determine the deformability and strength of a full-scale welded truss, the parameters of the finite element model and tensile diagrams of VSt3ps steel obtained at the previous stage of research were used for different temperatures. Such a methodological approach makes it possible to identify the indicators of deformation and fracture of the studied structure and ensures high reliability of the modeling results.

According to the results of the study, it was found that the temperature effect is a significant factor influencing the behavior of the truss under load. When exposed to temperature, a two-factor negative impact on the truss occurs. Additional internal stresses are formed both in the core elements of the truss and in the places of their welded joints (nodes) and the mechanical properties of the material itself change. At low temperature gradients of 30...40°C (climatic range), this negative impact is insignificant and is usually not taken into account when designing trusses. However, at higher temperatures, in particular in the fire range, the truss can lose more than half of its load-bearing capacity and this must be taken into account.

Based on the results of the research, a series of tables, graphs, and diagrams have been constructed that show a quantitative and qualitative picture of the strength and deformability of a welded truss under the influence of force and temperature. An analytical dependence is proposed to take into account the effect of temperature on the bearing capacity of a welded truss.

Based on the results of the work, recommendations for their practical application in the design and operation of welded trusses are formulated. General conclusions are drawn.

Keywords: welded truss, welded rectangular truss, metal structures, truss strength and deformability, temperature effect, truss destruction, durability of metal structures.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковано основні результати дисертаційної роботи:

1. Shved Y. Strength and deformation analysis of a welded truss under load in fire and emergency temperature conditions / Yaroslav Shved // Scientific Journal of TNTU. — Tern. : TNTU, 2023. — Vol 112. — No 4. — P. 73–81. https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2023.04.073
2. Kovalchuk Y. Formation of input information arrays for computer simulation of welded trusses behavior under thermal force effects / Yaroslav Kovalchuk, Natalya Shynhera, Yaroslav Shved // Scientific Journal of TNTU. — Tern. : TNTU, 2023. — Vol 110. — No 2. — P. 118–124. https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2023.02.118
3. Shved Y. Welded truss deformation under thermal influence / Yaroslav Shved, Yaroslav Kovalchuk, Natalya Shynhera // Scientific Journal of TNTU. — Tern. : TNTU, 2022. — Vol 105. — No 1. — P. 13–18. https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2022.01.013
4. Shved Y., Material consumption optimization of a welded rafter truss made of angle profiles. / Kramar H., Kovalchuk Y., Shynhera N., Bodrova L. // Procedia Structural Integrity. 1st Virtual International Conference on In service Damage of Materials: Diagnostics and Prediction, VOL 36, 2022. С. 10 — 16. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2021.12.076>
5. Kovalchuk Y. Fatigue damage of the heel joint of welded roof truss / Yaroslav Kovalchuk, Natalya Shynhera, Yaroslav Shved, Vasyl Voronchak // Scientific Journal of TNTU. — Tern. : TNTU, 2020. — Vol 99. — No 3. — P. 28–33. https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2020.03.028

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертаційної роботи:

6. Ковальчук Я. О. Дослідження деформаційної поведінки зварної будівельної ферми при температурному впливі / Ковальчук Я., Шингера Н., Швед Я. // VI Міжнародна студентська науково-технічна конференція „Природничі та гуманітарні науки. Актуальні питання“, 27-28 квітня 2023. — Т. : ТНТУ, 2023. — С. 261–262.
7. Ковальчук Я. О. Локалізація напружень і втомне пошкодження зварної ферми / Ковальчук Я., Шингера Н., Швед Я. // Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції „Міцність і довговічність сучасних матеріалів та конструкцій“, 10-11 листопада 2022 року. — Т. : ФОП Паляниця В. А., 2022. — С. 109–110
8. Швед Я. Л. Моделювання поведінки двохсильної симетричної зварної ферми при дії циклічних навантажень / Ковальчук Я., Шингера Н., Швед Я. // Збірник тез доповідей X Міжнародної науково-практичної

- конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“, 24-25 листопада 2021 року. — Т. : ФОП Паляниця В. А., 2021. — Том I. — С. 13.
9. Ковальчук Я. О. Пошкодження і руйнування зварних ферм для транспортно-технологічних машин / Я. О. Ковальчук, Н. Я. Шингера, Я. Л. Швед // Збірник тез доповідей Міжнародної науково-технічної конференції присвяченої пам'яті професора Гевка Богдана Матвійовича „Проблеми теорії проектування та виготовлення транспортно-технологічних машин“, 23-24 вересня 2021. — Т. : ФОП Паляниця В. А., 2021. — С. 104.
10. Швед Я. Л. Комп'ютерне моделювання поведінки зварних ферм при дії циклічних навантажень / Я. Л. Швед, О. І. Міщук // Збірник тез доповідей ІХ Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“, 25-26 листопада 2020 року. — Т. : ТНТУ, 2020. — Том 1. — С. 34.
11. Ковальчук Я. О. Фізичне моделювання при дослідженні зварних ферм / Я. О. Ковальчук, Н. Я. Шингера, Я. Л. Швед // Матеріали міжнародної наукової конференції „Іван Пулюй: життя в ім'я науки та України“ (до 175-ліття від дня народження), 28-30 вересня 2020 року. — Т. : ФОП Паляниця В. А., 2020. — С. 72.
12. Ковальчук Я. О. Статична міцність сталі ВСтЗпс зі зварним швом / Я. О. Ковальчук, Н. Я. Шингера, Я. Л. Швед // Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції „Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій“ до 60-річчя з дня заснування Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя та 175-річчя з дня народження Івана Пулюя, 14-15 травня 2020 року. — Т. : ТНТУ, 2020. — С. 28.

ЗМІСТ

	Стор.
ВСТУП	18
РОЗДІЛ 1 ДЕФОРМУВАННЯ І РУЙНУВАННЯ ЗВАРНИХ ФЕРМ ПРИ ТЕРМОСИЛОВИХ ВПЛИВАХ	22
1.1 Температурний вплив на навантажені зварні ферми як один з факторів впливу на їх міцність і деформівність	22
1.2 Особливості деформування й руйнування зварних ферм при силових і теплових впливах	25
1.3 Розрахункові підходи при проектуванні й дослідженні зварних ферм	27
1.4 Результати дослідження температурного впливу на зварні ферми аналітично-розрахунковими методами	31
1.5 Натурні експериментальні дослідження міцності і деформівності зварних ферм	36
1.6 Фізичне моделювання як один з напрямків дослідження температурного впливу на навантажені зварні ферми	38
1.7 Математичне моделювання поведінки зварних ферм при дії силових і температурних впливів	44
1.8 Аналіз відомих наукових результатів про поведінку зварних ферм при дії силових і температурних впливів та постановка задач для власних досліджень	46
1.9 Висновки до розділу 1.....	49
РОЗДІЛ 2 МЕТОДИЧНІ АСПЕКТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ПОВЕДІНКИ ЗВАРНОЇ ФЕРМИ ПРИ ТЕРМОСИЛОВИХ ВПЛИВАХ ...	50
2.1 Структурно-методична схема досліджень зварної прямокутної ферми при дії силових і температурних впливів	50

2.2 Вибір конструкції ферми, її масштабних моделей та схеми їх навантажування для дослідження	51
2.2.1 Нормативні вимоги до проектування і виготовлення прямокутних зварних ферм	51
2.2.2 Вибір конструкції ферми та схеми її навантажування	55
2.2.3 Розробка конструкцій фізичних моделей зварної ферми для напівнатурного експерименту	57
2.2.4 Визначення констант фізичного моделювання зварної ферми	62
2.3 Методика виконання напівнатурних експериментальних досліджень зварної ферми	63
2.3.1 Методика дослідження параметрів деформування і умов руйнування фізичної моделі 600x120 мм при силових впливах	63
2.3.2 Методика дослідження параметрів деформування фізичної моделі 2000x400 мм при силових впливах	68
2.3.3 Методика дослідження параметрів деформування фізичної моделі 2000x400 мм при температурних впливах	70
2.4 Методика виконання комп'ютерного моделюючого експерименту для дослідження міцності й деформівності зварної ферми при термосилових впливах	72
2.5 Методичні особливості формування інформаційних масивів для комп'ютерного моделювання	79
2.6 Оцінювання достовірності результатів натурних досліджень	83
2.7 Висновки до розділу 2	85
РОЗДІЛ 3 МІЦНІСТЬ І ДЕФОРМІВНІСТЬ ФІЗИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ЗВАРНОЇ ФЕРМИ ПРИ ТЕРМОСИЛОВИХ ВПЛИВАХ ...	86
3.1 Фізико-механічні аспекти впливу температури на міцність і деформівність зварної ферми	86

3.2 Умови забезпечення точності результатів комп'ютерного моделюючого експерименту	88
3.3 Розробка статистичних планів для натурного дослідження механічних характеристик сталі ВСт3пс	90
3.4 Натурні дослідження характеристик міцності матеріалу для виготовлення зварних ферм	92
3.4.1 Показники міцності сталі ВСт3пс при кімнатній температурі.....	92
3.4.2 Статистичні характеристики розсіювання механічних властивостей сталі ВСт3пс	94
3.4.3 Показники міцності сталі ВСт3пс при підвищеній температурі.....	96
3.5 Міцність і деформівність фізичної моделі 600x120 зварної ферми при навантажуванні	99
3.5.1 Натурні силові дослідження фізичної моделі 600x120	99
3.5.2 Дослідження міцності й деформівності фізичної моделі 600x120 комп'ютерним моделюючим експериментом	102
3.5.3 Виявлення достовірності результатів комп'ютерного моделюючого експерименту при навантажуванні фізичної моделі 600x120 зварної ферми	105
3.6 Міцність і деформівності фізичної моделі 2000x400 зварної ферми при силовому впливі	109
3.6.1 Натурні силові дослідження фізичної моделі 2000x400	109
3.6.2 Дослідження міцності й деформівності фізичної моделі 2000x4000 зварної ферми комп'ютерним моделюючим експериментом..	113
3.6.3 Виявлення достовірності результатів комп'ютерного моделюючого експерименту при навантажуванні фізичної моделі 2000x400 зварної ферми	119

3.7 Деформівність фізичної моделі 2000x400 зварної ферми при дії температурних впливів натурним та комп'ютерним моделюючим експериментами	122
3.8 Висновки до розділу 3.....	124
РОЗДІЛ 4 ПОВЕДІНКА ПОВНОМАСШТАБНОЇ ЗВАРНОЇ ПРЯМОКУТНОЇ ФЕРМИ ПРИ ДІЇ СИЛОВИХ І ТЕМПЕРАТУРНИХ ЧИННИКІВ	130
4.1 Міцність і деформівність зварної ферми при навантажуванні без температурних впливів	130
4.2 Міцність і деформівність зварної ферми при навантажуванні з підвищеною температурою	144
4.3 Міцність і деформівність навантаженої зварної ферми при при пожежно-аварійній температурі	152
4.4 Вплив температури на міцність і деформівність зварної ферми 18000x3600	158
4.5 Аналітичний опис міцності ферми при дії силових і температурних впливів	161
4.6 Висновки до розділу 4	164
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	165
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	166
ДОДАТКИ	177

ВСТУП

Зварні прямокутні ферми відносяться до несучих будівельних конструкцій, тому їх деформівність і міцність визначає міцність і надійність будівлі в цілому. Вони мають прямокутну конфігурацію. Такі ферми застосовують при спорудженні виробничих, торгових чи спортивних споруд як проміжні опори для встановлення кроквяних дахових конструкцій в прогонах між несучими колонами. Ці ферми можуть використовуватися в якості прогонових мостових конструкцій, балкових елементів, тримати технологічне устаткування (підкранові шляхи та підвісні конвеєри). Довжина ферм зазвичай має 12...36 метрів. Навіть за умови впливу лише кліматичних температурних коливань при таких розмірах в елементах конструкції і місцях їх зварних з'єднань формуються внутрішні напруження, які накладаються на напруження від силового впливу і знижують розрахункову тримкість конструкції в цілому. Сучасні інженерні підходи вирішують це питання шляхом введення додаткових коефіцієнтів запасу міцності, які збільшують матеріаломісткість, а отже, і вартість ферми.

Проблема сумісного силового і теплового впливу ускладнюється при дії на ферму ще й технологічних температур. В одних випадках це виникає за умов загального впливу температури на всю будівлю (металургійний комбінат, ливарний цех, вальцювальня, ковальський цех). В інших випадках може бути локальний вплив на ферму, коли така конструкція використовується як несуча для підвісних конвеєрів (камера порошкового фарбування металоконструкцій з температурою $+200^{\circ}\text{C}$ чи морозильна камера для швидкозаморожених продуктів з температурою -36°C). А при такому діапазоні температур суттєвий вплив на тримкість ферм відбувається за рахунок зміни показників міцності самого конструкційного матеріалу.

З огляду на широке використання зварних прямокутних ферм, їх високу матеріаломісткість і вартість, а також різні умови експлуатації, які не можна

комплексно врахувати за допомогою класичних інженерних методів проектування, дослідження деформівності та міцності таких ферм під впливом силових і температурних навантажень є актуальним на сьогодні.

Актуальність теми полягає в тому, що температурний вплив на зварні прямокутні ферми призводить до зміни властивостей конструкційного матеріалу та появи внутрішніх напружень у елементах конструкцій, які сумісно з напруженнями від зовнішніх силових факторів, визначають тримкість ферми. Неврахування температурних впливів при проектуванні ферми може спричинити її руйнування під дією зовнішніх навантажень, які є нижчими за розрахунково-допустимі.

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

Дисертаційну роботу виконано у Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя згідно з напрямком наукових досліджень кафедри будівельної механіки 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 та узагальнення.

Мета дослідження – є виявлення параметрів деформування і умов руйнування зварних прямокутних ферм при сумісній дії силових і температурних чинників.

Для досягнення мети дослідження необхідно вирішити такі завдання:

- розроблення конструкції зварної ферми для дослідження;
- розроблення методики і проведення натурних експериментальних

досліджень для визначення поведінки зварної прямокутної ферми при сумісному силовому і температурному впливові;

- розроблення методики і виконання комп'ютерного моделюючого експерименту для виявлення кінетики деформування та умов настання граничного стану зварної прямокутної ферми при різних рівнях силових і температурних впливів з використанням програмного пакету Ansys;

- верифікація результатів комп'ютерного моделюючого експерименту;

- виявлення залежності від температури міцності і деформівності зварної ферми.

Об'єкт дослідження – процес втрати тримкості зварною прямокутною фермою під сумісним впливом зовнішніх силових і внутрішніх температурних напружень.

Предмет дослідження – зварна прямокутна ферма при дії силових і температурних чинників.

Методи дослідження: фізичне моделювання для розроблення дослідного зразка ферми, напівнатурний експеримент для дослідження фізичної моделі температурним і силовим впливом, метод скінчених елементів для комп'ютерного моделюючого експерименту в програмному комплексі Ansys.

Наукова новизна одержаних результатів:

- вперше розроблено аналітичну залежність для розрахунку тримкості зварної прямокутної ферми 18000x3600 при нагріванні її до 450^o C за відомою тримкістю конструкції при 20^oC;

- вперше експериментально отримано інформаційні масиви, які характеризують деформаційну поведінку вузлових точок фізичної моделі зварної прямокутної ферми 2000x400 в температурному діапазоні від 20 до 170^oC без силових впливів на конструкцію;

- удосконалено методику комп'ютерного розрахунку параметрів напружено-деформівного стану зварних ферм, яка передбачає використання в якості вхідної інформації експериментально визначених показників міцності

конструкційного матеріалу і забезпечує співпадання результатів моделювання з фактичними показниками на рівні 0,92.

- дістала подальший розвиток методика комплексних досліджень міцності й деформівності зварних ферм, які поєднують натурний експеримент, фізичне і комп'ютерне моделювання.

Практичне значення одержаних результатів. Використання результатів роботи є доцільним для зварних прямокутних ферм, що проєктуються, а також перебувають на стадії експлуатації під впливом силових та температурних факторів. Запропоновано підвищити стійкість зварної прямокутної ферми за допомогою підсилювальних накладок.

Апробація результатів роботи. Результати дисертаційних досліджень опубліковано у 12 працях, зокрема: 4 статті у наукових фахових періодичних виданнях України, 1 стаття у науковому періодичному виданні проіндексованому у базі даних Scopus. 7 публікацій у матеріалах міжнародних та всеукраїнських наукових та науково-технічних конференціях.

РОЗДІЛ 1

ДЕФОРМУВАННЯ І РУЙНУВАННЯ ЗВАРНИХ ФЕРМ ПРИ ТЕРМОСИЛОВИХ ВПЛИВАХ

1.1 Температурний вплив на навантажені зварні ферми як один з факторів впливу на їх міцність і деформівність

Зварні фермові конструкції набули широко використовують у будівництві завдяки високій тримкості й надійності, зумовленими однорідністю металу і його анізотропністю, легкістю в порівнянні з залізобетонними, індустріальністю (виготовляють у виробничих умовах).

Одночасно металеві ферми мають і значні недоліки: недостатню корозійну стійкість через високу хімічну активність металу, низьку вогнестійкість через швидке нагрівання елементів до температури переходу в пластичний стан внаслідок високої теплопровідності та малих розмірів перерізів. У сталі при температурах вище 200°C зменшується модуль пружності, що призводить до збільшення деформації конструкцій, а при 600°C сталь повністю переходить у пластичний стан, що спричиняє руйнування конструкцій (рис.1.1, 1.2).



Рисунок 1.1 – Силевий і температурний вплив на ферму при пожежі



Рисунок 1.2 – Руйнування фермової конструкції внаслідок пожежі

Основні вимоги, які необхідно враховувати при проектуванні металоконструкцій сформульовано в нормативно-технічній документації.

У багатьох будівлях та спорудах використовуються металеві конструкції, які експлуатуються в умовах підвищеного виділення тепла [1-4]. Одними з найбільш складних за температурними умовами є атомні, теплові електростанції, заводи, які працюють в умовах високих температур та багато інших об'єктів.

Розвитку науки про металеві конструкції у вигляді зварних прямокутних ферм сприяли чисельні досліді та наукові праці [12-22]. Ряд зарубіжних та вітчизняних наукових діячів провели дослідження при вивченні температурного впливу на тримку здатність зварних прямокутних ферм. Проблеми в області експлуатації зварних прямокутних ферм приділялася велика увага в монографіях Л.М. Лобанова [5], В.Н. Шимановського [6], А. Nussbaumer [7], С. Chuang [8], С. Shunyao [9], Kattis M.A. [10], F. Hart [11], M.A Kattis [12], D.D. Özberk [13]. З досліджень найбільш відомі роботи Adelman H.M [14], Ф.Є.

Клименка [15], О.В. Семка [16], Schumacher, A [17], А.М. Югова [18], Н. Remes [19], Т. Lin [20], L.-W. Chen [21], О. Rand [22], С. W. Huang, та Y. B. Yang.

Основна увага в них приділена роботі напружених елементів: впливу на їх несучу здатність величини навантаження, схем з'єднання напружених елементів тощо. В окремих дослідженнях розглядається вплив зварювання.

Зварні прямокутні ферми впродовж експлуатації перебувають під дією різних факторів впливу (робочі навантаження, вітер, сніг, температура, сейсмічні впливи, аварійні ситуації тощо). Внаслідок негативного впливу цих факторів, відбувається їх пошкодження аж до руйнування.

Дослідження та вивчення факторів впливу на металеві конструкції тривають, вдосконалюються і поповнюються новою інформацією. Однак існуючі підходи не дають можливості швидко та достовірно прогнозувати результат температурного впливу на металеві конструкції в цілому і на ферми зокрема.

Світові тенденції розв'язання поставлених задач полягають у дослідженні температурного впливу на зварні прямокутні ферми різними методиками, основними з яких є:

- натурний експеримент;
- фізичне моделювання;
- теоретичний розрахунок;
- математичне моделювання.

Теоретичний розрахунок базується на використанні стандартів по проектуванню металевих конструкцій. За основу частіше всього беруться конструкції, які експлуатуються тривалий термін. Досліджуючи їх можна отримати певні висновки про їх міцнісні характеристики.

Фізичне моделювання полягає у натурних експериментальних випробуваннях масштабних моделей зварних фермових конструкцій. У світовій практиці, такий метод не надто поширений, через складність ідентифікації отриманих результатів для повномасштабних конструкцій.

На сьогоднішній день широко застосовується метод математичного моделювання. Виконання досліджень за цим методом виконують, як комп'ютерний моделюючий експеримент з використанням пакетних програм скінчено-елементного моделювання. Зручність такого методу зумовлена тим, що при правильному моделюванні, можна врахувати багато факторів впливу, включаючи їх одночасну дію на конструкцію.

1.2 Особливості деформування й руйнування зварних ферм при силових і теплових впливах

Однією із поширених причин руйнування ферм є втрата стійкості стиснутими елементами як без температурного впливу (рис 1.3,а), так і при підвищених температурах (рис. 1.3,б).

*a**б*

Рисунок 1.3 – Втрата стійкості опорного розкоса:

a – без впливу температури; *б* – внаслідок пожежі

Досвід свідчить, що втрата стійкості значною мірою залежить від геометричних і фізичних недосконалостей стержнів [35...39].

Серед причин, які викликають викривлення елементів під час експлуатації, важливо відзначити наступні:

- Початкові недосконалості, такі як викривлення та місцеві прогини, що виникають під час виготовлення та монтажу [40];

- Недотримання правил технічної експлуатації, таке як використання ферм для підвіски блоків під час ремонту обладнання, закріплення комунікацій між вузлами та інші подібні випадки. [41...42].

- Невідповідність фактичної розрахункової схеми, що була прийнята під час проектування, може включати такі аспекти, як збільшення жорсткості опорних вузлів ферм у разі шарнірної розрахункової схеми, позацентрове обпирання прогонів і плит, пропуск в'язей, які закріплюють стиснуті пояси відносно площини ферми, та інші подібні фактори [43].

- перенавантаження ферм;

- температурні впливи.

Частіше ці недоліки виявляються у більш гнучких стержнях, зокрема в елементах решітки. Для таких елементів, де вплив початкових ексцентриситетів і можливих кривин потрібно враховувати згідно з вимогами, вводиться коефіцієнт умовної працездатності $y_c = 0,8$ (для стиснутих елементів решітки, крім опорних, коли гнучкість $\lambda > 60$) [44...46].

Можливий сценарій руйнування ферми полягає у виникненні тріщин у зварних швах, які кріплять елементи решітки до вузлових фасонки (рис. 1.4). Цей вид руйнування особливо ймовірний при циклічних навантаженнях. Розширення зони пружної роботи (явище наклепу) зменшує пластичність та сприяє крихкому руйнуванню в місцях концентрації напружень, таких як зварні шви. Аналогічний ефект спостерігається із концентраторами при циклічних впливах, що призводить до зниження вібраційної міцності до 100 МПа і може призвести до виснаження протягом невеликої кількості циклів. [44, 45].

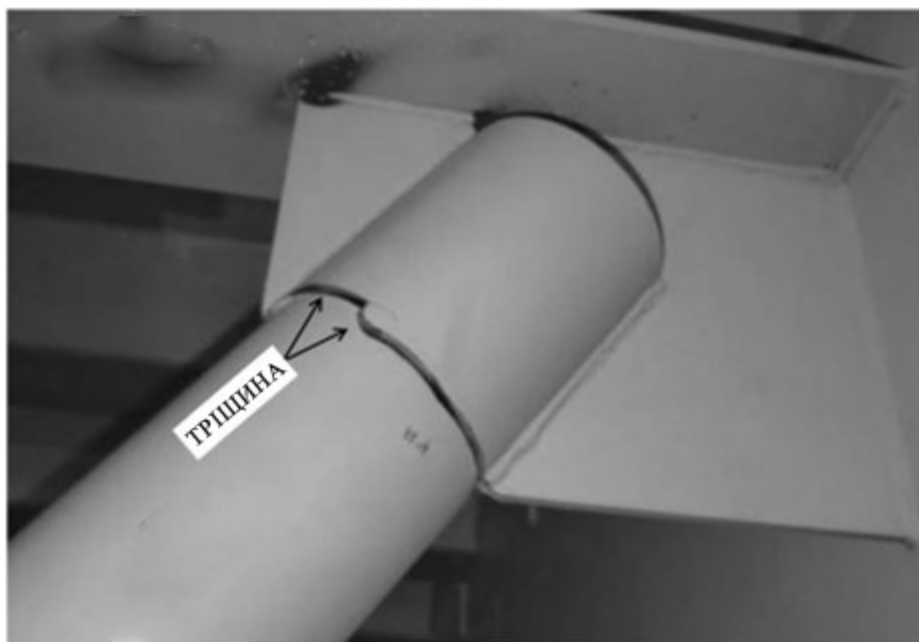


Рисунок 1.4 – Поперечна тріщина у верхньому вузлі

Для зменшення впливу концентрації напружень можна застосовувати пологі шви, відмовлятися від флангових швів, плавно примикати стержні до косинок. Однак ці заходи ускладнюють виготовлення ферм.

Крім того, крихке руйнування може відбуватися при експлуатації ферм при температурах нижчих за $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$. У цьому випадку також необхідно зменшувати вплив концентраторів напружень і враховувати наявність додаткових напружень від жорсткості вузлів. Тобто, важливо виконувати розрахунок, не використовуючи спрощену (шарнірну) розрахункову схему.

1.3 Розрахункові підходи при проектуванні й дослідженні зварних ферм

Для фермових конструкцій стандартизованою є методика розрахунку тримкості за методом граничних станів [46].

Метод граничних станів застосовується в системі Європейських норм [47], в стандарті ISO [48], в нормах США, Канади, де він отримав назву «Метод

окремих коефіцієнтів надійності», оскільки тільки в цьому методі відбулась заміна загального коефіцієнта запасу на добуток окремих коефіцієнтів.

Граничний стан – це такий стан об'єкта, при якому його подальша експлуатація недопустима чи недоцільна, або відновлення його працездатного стану неможливе чи недоцільне [66].

Граничний стан об'єкта виникає при наступних умовах [63]:

- втрата тримкості внаслідок одноразового навантаження (руйнування, втрата стійкості, поява неприпустимих залишкових деформацій);
- втрата тримкості внаслідок багаторазового впливу силових факторів (втомне руйнування);
- ушкодження внаслідок зношування або корозії.

На жаль, сучасна вимірювальна техніка не здатна безпосередньо фіксувати сигнали про наближення конструкції до граничного стану.

подальша експлуатація пошкоджених конструкцій на рівні граничного стану може призвести до аварій, які характеризуються повним або частковим руйнуванням конструкцій. Це може призвести до значних матеріальних збитків та, в окремих випадках, людських жертв. [64].

Умова настання граничного стану за одноразової дії навантаження [65] має вигляд

$$F \leq K, \quad (1.1)$$

де F – максимальне навантаження в екстремальних умовах;

K – розрахункова тримкість.

На даний час існує багато праць, де описано методи та результати досліджень напружено-деформівного стану (НДС) зварних тримких конструкцій в цілому [10, 15, 19, 50, 39, 42-44] і ферм зокрема [40, 45].

Виділено два основних підходи для оцінки НДС – прямі, які ґрунтуються на безпосередній оцінці за результатами експлуатації чи дослідних випробувань натурних зразків під дією експлуатаційних навантажень, і опосередковані

(розрахункові) [65]. Для зварних ферм виконання натурального експерименту відтворення всього періоду експлуатації об'єкту є технічно ускладненим. Тому для визначення їх НДС найбільше використання знаходять розрахункові методи як в лінійній, так і в нелінійній постановці питання.

Значну складність в дослідженні НДС ферм створюють зварні з'єднання. Зварювання є ключовим технологічним процесом у будівництві, і виготовлення конструкцій різного призначення шляхом зварювання стає все більш поширеним у всіх промислово розвинених країнах. Економічність виготовлення зварних конструкцій є важливим фактором, що сприяє їх пріоритетному застосуванню порівняно з литими, кованими та штампованими конструкціями.

Характерними особливостями зварних з'єднань з позицій міцності та ресурсу є [68-70]:

- поява після зварювання залишкових зварних напружень;
- наявність високої концентрації напружень, зумовлених конструктивними особливостями або технологічними дефектами (підрізами, не проварами, холодними і гарячими тріщинами та ін.);
- неоднорідність фізико-механічних властивостей матеріалу в зоні зварного з'єднання, яка зумовлена різницею хімічного складу (основний метал (ОМ), метал шва (МШ), зона термічного впливу (ЗТВ)), що вимагає спеціальних підходів при діагностуванні й виборі розрахункових значень.

Перелічені особливості зварних з'єднань суттєво ускладнюють оцінювання міцності зварних ферм, застосовуючи методики на основі детермінованих підходів .

На рис. 1.5 показано розподіл напружень на поверхні елемента та їх зміну по товщині зразка.

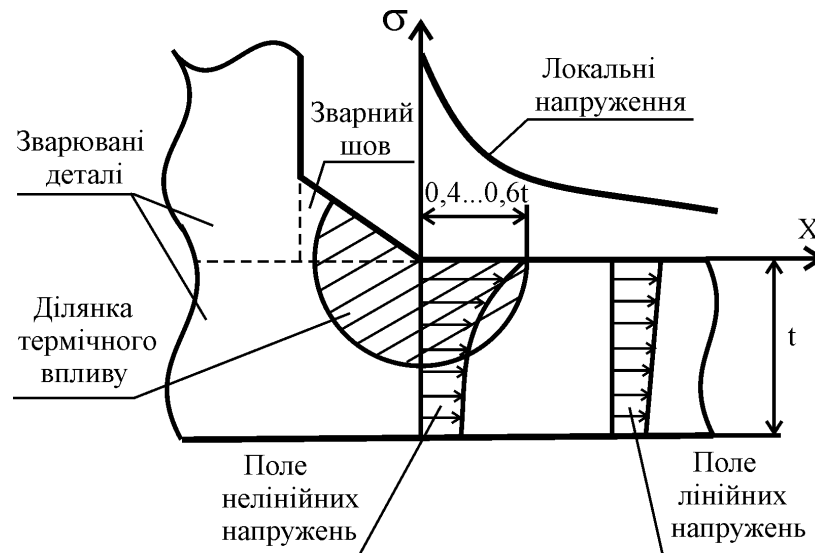


Рисунок 1.5 – Розподіл локальних напружень в зоні зварного шва

Загальні розрахункові напруження визначаються конструктивною формою елемента, залишковими зварними напруженнями та дефектами в зоні зварного шва. Максимальні напруження концентруються в області сплавлення шва з основним металом. Саме в цій області найчастіше спостерігається зародження пошкоджень та їх подальший розвиток аж до руйнування елемента конструкції [69].

Сучасні аналітичні методи розрахунку НДС та ресурсу металоконструкцій конструкцій використовують теорію графів, теорію дослідження операцій, теорії масового обслуговування, теорію марковських і напівмарковських процесів [17, 26, 32, 36, 46-52].

Перевагою аналітичних методів є можливість розв'язку задачі з врахуванням багатомірності вектора станів системи при значній кількості станів елемента.

Головним недоліком аналітичних методів розрахунку ресурсу є необхідність побудови складних математичних моделей, реалізація яких потребує розробки громіздких алгоритмів.

1.4 Результати дослідження температурного впливу на зварні ферми аналітично-розрахунковими методами

У роботах Ф.Є. Клименка [39] вказано на залежність механічних властивостей металевих конструкцій, що використовуються у будівництві, від температури. На рис. 1.6 [39] подано графіки зміни міцності найпоширеніших в будівництві сталей при дії на них високих температур.

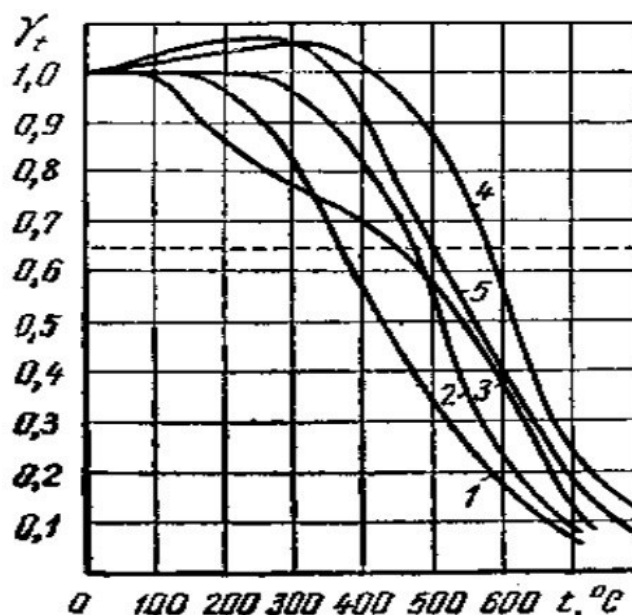


Рисунок 1.6 – Зміна міцності сталей при нагріванні: 1 – високоміцний холоднотягнутий дріт; 2 – звичайний холоднотягнутий низьковуглецевий дріт; 3 – гарячекатана сталь Ст3, Ст5; 4 – низьколегована сталь 25Г2С; 5 – низьколегована сталь 30ХГ2С

На графіках для легкості порівняння різних видів сталі використовуються залежності відносних значень меж міцності. Відношення межі міцності або межі текучості матеріалів при певній температурі до межі міцності або межі текучості в нормальних умовах називається температурним коефіцієнтом зміни міцності і позначається як γ_t .

Оскільки температура конструкції при пожежі змінюється з часом, також змінюється значення коефіцієнта γ_t . Значення температурного коефіцієнта зміни міцності, при якому межа міцності матеріалу в нагрітому стані знижується до величини робочих напружень в конструкції, називається критичним, оскільки у цьому випадку відбудеться руйнування конструкції. Температура, яка відповідає втраті міцності та несучої здатності сталі, називається критичною температурою.

Зрозуміло, що при нагріванні в сталі Ст3 буде зменшуватися межа пружності й підвищуватися відносне видовження як показник пластичності матеріалу. Однак чисельної інформації у вигляді таблиць чи графіків для цієї сталі не виявлено.

При впливі на зварну ферму підвищеної температури змінюється межа пружності сталі ВСт3пс (рис. 1.7) [39].

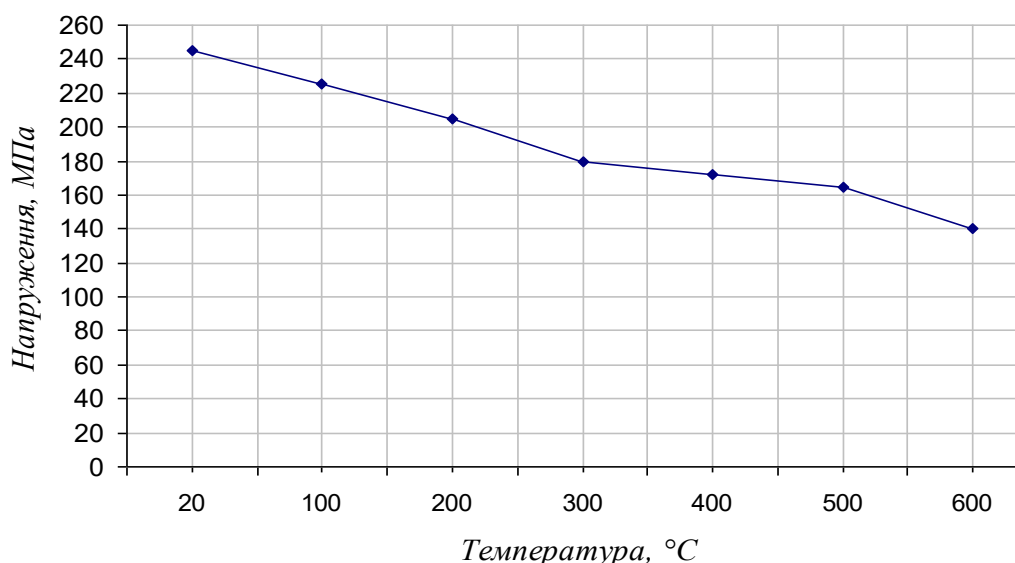


Рисунок 1.7 – Графік зміни межі пружності сталі в залежності від температури

При підвищенні температури значення модуля пружності, границі текучості і міцності сталі зменшується, а також підвищується її крихкість при низьких температурах. Ці закономірності характеризуються нелінійними

залежностями. Приблизно при 150 °С в сталі виникає явище штучного старіння протягом кількох годин [30]. Нагрівання вуглецевої сталі до 200...250 °С майже не впливає на її механічні властивості. Однак при 300...350 °С сталь стає крихкою через утворення грубозернистої структури. У цей період не рекомендується піддавати сталь пластичному деформуванню та ударним навантаженням. Подальше нагрівання покращує пластичність сталі, але межі текучості та міцності швидко зменшуються. Наприклад, при 500 °С ці показники зменшуються приблизно в 1,5 рази, а при 600...650 °С настає температурна пластичність, коли межа текучості та модуль пружності наближаються до нуля. [31].

При охолодженні нижче -10 °С спостерігається значне зменшення пластичних властивостей цих сталей [32]. При температурі нижче -45 °С сталь стає крихкою [33].

У низьколегованих сталях температурний діапазон, в якому механічні характеристики можна вважати сталими, ширший, ніж у маловуглецевих сталях, і залежить від складу.

Висока міцність матеріалу призводить до використання відносно малих перерізів елементів конструкцій. Водночас метал володіє високою теплопровідністю, тому при пожежі несучі конструкції зі сталі швидко нагріваються до температури переходу металу в пластичний стан, що призводить до руйнування [20, 21, 34]. Вогнестійкість металевих конструкцій є незначною, що є одним з їх недоліків.

В інструкції по розрахунку фактичних границь вогнестійкості сталевих конструкцій наводяться основні принципи їх визначення для зварних прямокутних ферм. Границя вогнестійкості металевих ферм виникає внаслідок втрати несучої здатності найслабшого з елементів з погляду вогнестійкості. Для визначення цього елемента проводиться аналіз границь вогнестійкості всіх зовнішніх стійок, розкосів і поясів ферми. [35].

Критична температура конструкцій, які знаходяться під дією навантаження, розраховується в залежності від схеми їх обпирання, марки металу і величини навантаження.

Границя центрально-стиснутих стержнів настає в результаті прогрівання їх перерізу до критичної температури [36, 37].

Границя вогнестійкості згинальних і позацентрово-навантажених елементів настає в результаті підвищення температури їх найбільш напруженої грані до критичної величини.

У випадку незахищених елементів і захищених елементів суцільного перерізу температура найбільш напруженої грані приймається рівною температури всього перерізу. У випадках елементів, виготовлених з прокатних профілів, температура найбільш напруженої грані приймається рівною температурі відповідної полиці (стілки) поперечного перерізу [38-45].

Автори більшості робіт дають рекомендації по призначенню гранично допустимих зусиль в стержнях в момент їх напруження [8, 12, 18, 19, 23, 24]. Діапазон розкиду рекомендованих величин великий: від 0,4 до 0,8 в залежності від розрахунку несучої здатності напружених елементів. Watkinson F. робить пропозицію щодо врахування зварювальних деформацій, навіть при роботі конструкцій без навантажень [29]. Проте більш значущими вони є, коли враховують напруження від температури і навантаження. Поява зон термопластичності при зварюванні пов'язана з виключенням частини перерізу з роботи конструкції, що може в окремих випадках спричинити втрату несучої здатності елемента. Початкове навантаження викликає зростання зварювальних деформацій, як за початкових напружень в зоні швів, так і в результаті появи додаткових моментів при згині стержня. Все це обумовлює необхідність врахування зварювальних напружень і деформацій при оцінюванні несучої здатності і деформативності системи і її елементів. В звичайних конструкціях пластичні деформації з'являються лише у стані близькому до граничного. Якщо рівень навантажень не перевищує нормативний, то конструкції (в результаті

використання певних коефіцієнтів запасу при проектуванні) працюють пружньо, що і визначає використання в багатьох випадках традиційних методів розрахунку. Для напружених від навантаження конструкцій у вигляді особливостей, зв'язаних з порушенням їх «природнього» процесу деформування, складного розподілу напружень і деформацій в перерізах, підвищеної деформативності, робота в значному діапазоні навантажень (частіше всього набагато нижчим нормативного їх рівня) в пружньопластичній стадій і т.д., традиційні методи розрахунку в загальному випадку є не прийнятними. Розрахунок таких конструкцій варто виконувати як для єдиних фізичних і геометричних нелінійних систем, простежуючи історію їх навантажень, з врахуванням на кожному етапі роботи напружень, деформацій і переміщень елементів системи. Це відноситься не тільки до статично невизначених систем, але і до статично визначуваних, оскільки оцінювання їх стійкості і деформативності також неможливе без врахування історії їх попередньої роботи.

Питання призначення гранично допустимих напружень в значній мірі залежить від технології зварювання та температурного режиму експлуатованої конструкції.

Під час зварювання температура в області шва дорівнює температурі плавлення металу [46]. Тому метал навколошовної зони, званої також зоною термічного впливу, проходить весь інтервал температур від нормальної робочої температури до температури плавлення. Відповідно до цього, метал в різних областях зони термічного впливу отримує при нагріванні різні структури залежно від нагрівання. Охолодження невеликої області нагрітого металу в навколо шовній зоні, оточеного великими масами холодного, добре теплопровідного металу, відбувається досить швидко, тому досить часто в навколошовній зоні зберігається структура, що відповідає температурі нагріву. Це призводить до розвитку внутрішніх напружень, підвищення крихкості (зниження ударної в'язкості) і утворення тріщин.

Гарячі тріщини, спочатку часто непомітні, мають здатність збільшуватися, особливо при дії динамічного навантаження, і можуть повністю зруйнувати з'єднання. Саме тому вони є дуже небезпечними. Поява гарячих тріщин залежить від хімічного складу сталі (у цьому відношенні особливо несприятлива велика кількість сірки і фосфору), від структури (грубозерниста і взагалі неоднорідна структура менш сприятлива), від швидкості відводу тепла, а тому і від форми виробу. Небезпека появи гарячих тріщин зменшується при легуванні і, отже, залежить від марки покриттів електродів; в цьому відношенні корисні марганець (зв'язуючий сірку), ванадій, титан. Низьколеговані сталі взагалі менш страждають від гарячих тріщин; достатньо сприятлива сталь Ст3 спокійна. Зате в сталі Ст3 киплячій тріщини з'являються досить часто, причому з підвищенням кількості вуглецю небезпека появи гарячих тріщин збільшується. Всякі концентратори напружень, як наприклад, непровар в корені шва або зварювання при низьких температурах сприяють появі гарячих тріщин. Можливість появи гарячих тріщин є основною причиною, що вимагає застосування у відповідальних зварних конструкціях спокійної сталі .

1.5 Натурні експериментальні дослідження міцності й деформівності зварних ферм

Натурні і напівнатурні експериментальні дослідження прямокутних конструкцій в цілому і ферм зокрема є досить витратною методикою як за матеріалами для виготовлення зразів, так і за високо потужним випробувальним обладнанням. Такими дослідженнями займалися Шингера Н.Я. [23], Басара М.А. [24], Bruno, R. J. [28], Watkinson F. [29], Blom A. [32] та інші.

В роботі [23] напівнатурним експериментом досліджено фізичну модель прямокутної зварної ферми при дії статичних і циклічних навантажень при

кімнатній температурі. Для цієї ж конструкції виконано дослідження комп'ютерним моделюючим експериментом. За результатами верифікації отриманих показників міцності і деформівності ферми отримано високий рівень їх співпадання.

У роботі [23] систематизовано методи моделювання для оцінювання поведінки зварних ферм (рис. 1.8).

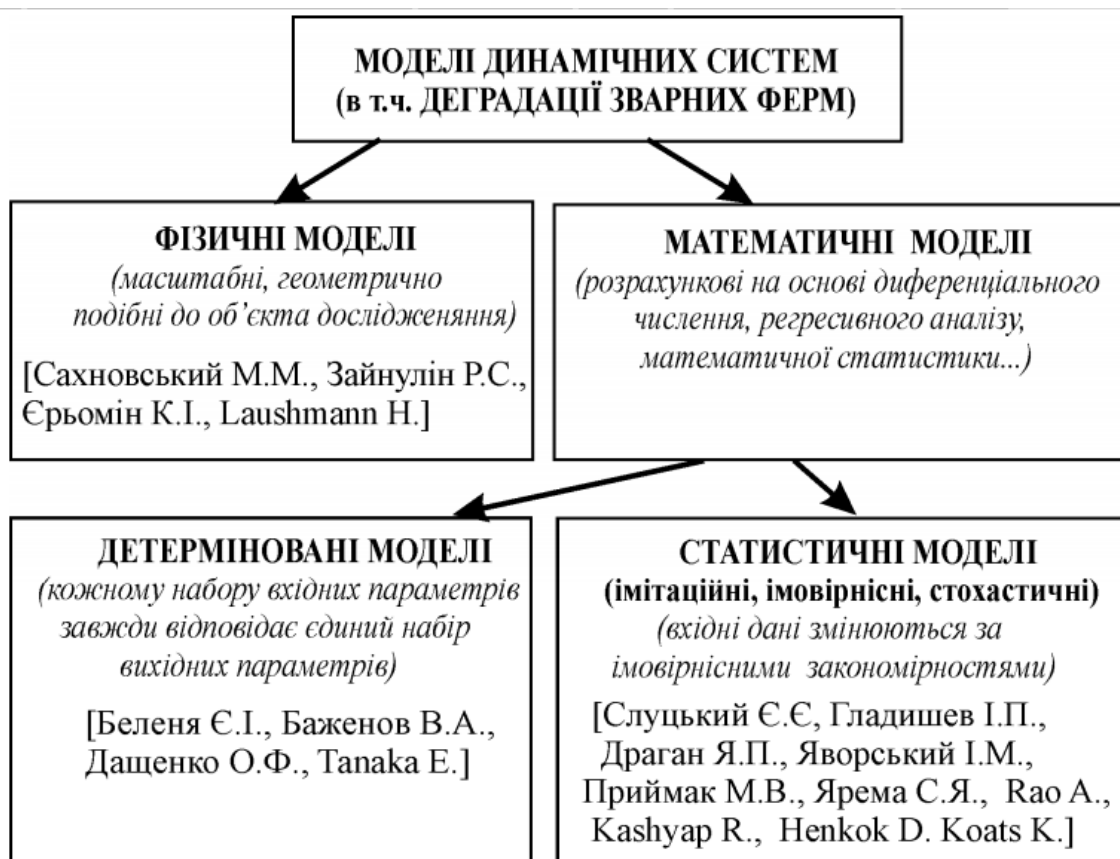


Рисунок 1.8 – Класифікація моделей для оцінювання поведінки зварних ферм

Для вивчення поведінки зварних ферм широко використовуються теорії подібності, які базуються на встановленні умов, що визначають відношення між параметрами моделі та реальних конструкцій. Які також включають правила перерахунку досліджуваних величин з моделі на реальну конструкцію і навпаки.

1.6 Фізичне моделювання як один з напрямків дослідження температурного впливу на навантажені зварні ферми

Дослідження НДС методами фізичного моделювання передбачає розробку конструкції масштабної моделі ферми з дотриманням принципів подібності, виготовлення дослідних зразків та виконання натурних силових випробувань для цих зразків (напівнатурний експеримент).

І.А.Одінг створив методика для випробувань на тривалу міцність [24]. Головною метою випробувань на тривалу міцність є визначення довговічності (часу до руйнування) зразка при заданому навантаженні й температурі. Крива зміни деформації зразка в часі може не реєструватись.

Розрахунковими графіками для оцінювання тривалої міцності є криві залежності довговічності від напруження для ряду температур, які будують за результатами випробувань серії зразків при різних напруженнях в логарифмічній чи напівлогарифмічній системі координат виходячи із степеневі (1.2) чи експоненціальної (1.3) залежності між напруженнями σ і довговічністю τ_p :

$$\tau_p = C\sigma^{-m}; \quad (1.2)$$

$$\tau_p = Ce^{-\beta\sigma}. \quad (1.3)$$

де C, m, β - параметри (константи) матеріалу.

Основним методом визначення тривалої міцності є випробування при розтягуючому навантаженні. За ним проводяться випробування промислових сплавів на жароміцність.

Характеристикою матеріалу є межа тривалої міцності, яка є навантаженням, яке викликає руйнування зразка за заданий час при заданій

температурі. Вона позначається буквою σ з верхнім і нижнім числовими індексами. Верхній індекс показує температуру випробувань в $^{\circ}\text{C}$, нижній – задану тривалість випробування до руйнування в годинах. Наприклад, σ_{1000}^{800} - границя тривалої міцності за 1000 год при температурі 800 $^{\circ}\text{C}$.

Для оцінювання пластичності матеріалу визначають відносне видовження і відносне звуження зразка після руйнування по загальноприйнятій методиці.

Тривалі випробування вибираються згідно умов роботи конструкції. Межу тривалої міцності рекомендується визначати на основі випробувань тривалістю 50, 100, 1000, 1500, 3000, 5000, 10000 год.

Працездатність матеріалу в умовах тривалого статичного навантаження при високій температурі визначається не тільки його опором руйнуванню, але і запасом пластичності. Останній оцінюють за величиною видовження чи звуження зруйнованих зразків.

При випробуваннях зразків різних розмірів варто враховувати вплив масштабного фактора. Цей вплив залежить не тільки від дефектів в об'ємі металу, а й від особливостей появи і розвитку тріщин, які можуть виникнути ще у другій стадії повзучості в поверхневому шарі. В зв'язку з тим, що зразки малого діаметру мають відносно більш розвинутий поверхневий шар, їх довговічність при однакових умовах випробувань може бути нижчою, чим у зразків більшого діаметру [47].

Для визначення чутливості матеріалу до концентрації напружень в умовах тривало діючого навантаження застосовують зразки з надрізом.

Найбільш розповсюджені при оцінюванні чутливості до надрізу отримали зразки з V-подібним кільцевим надрізом і кутом розкриття надрізу 45 чи 60 $^{\circ}$. Радіус у вершині надрізу зазвичай рівний 0,15... 0,2 мм. Діаметр найменшого перерізу зразків в надрізі найчастіше вибирають рівним діаметру гладких зразків, випробовуваних паралельно для співставлення результатів.

Чутливість до надрізу оцінюють за відношенням границі тривалої міцності надрізаних і гладких зразків чи за відношенням, їх довговічності при рівних напруженнях.

Специфічні особливості, установок для випробування на тривалу міцність обумовлені масовим характером випробувань, які вимагають значних затрат часу.

О.В. Семко та В.В. Пашинський [15] запропонували методику експериментальних досліджень впливу температури атмосферного повітря на елементи металевих конструкцій неопалювальних будівель та споруд, яка забезпечує можливість дослідження залежностей температури та деформацій металевих конструкцій від температури атмосферного повітря з урахуванням додаткових факторів впливу.

Проведені експериментальні дослідження були використані для визначення факторів впливу сонячної радіації та швидкості передачі тепла від повітря до конструкції.

Для вимірювання температурних деформацій в елементах металевих конструкцій, ці вчені розробили випробувальну установку (рис. 1.9).

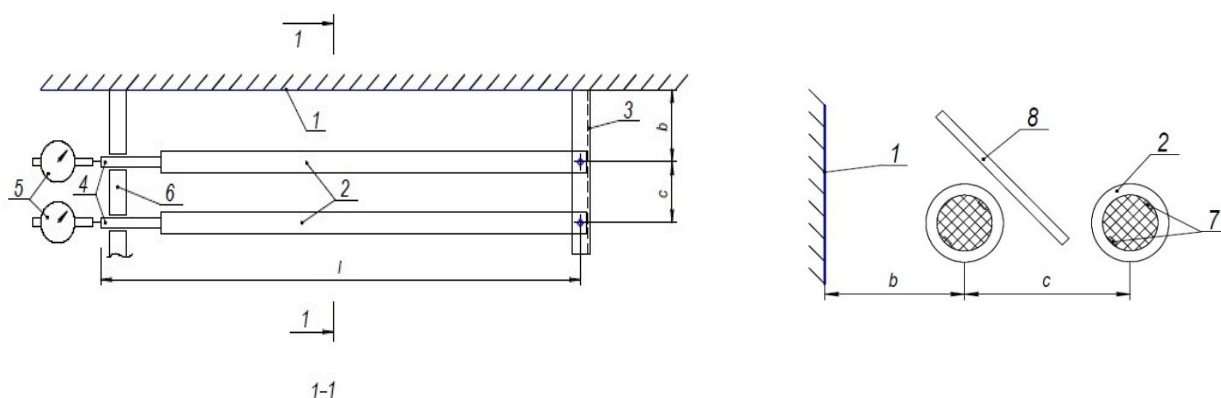


Рисунок 1.9 – Схема установки для вимірювання температурних деформацій в моделях елементів металоконструкцій

Суцільні сталеві стержні 2, виконані з труби довжиною $l = 1,7$ м, кріпляться до зовнішньої стіни будинку 1.

Один з кінців стержня закріплено за допомогою шарнірно нерухомої опори (болтового з'єднання) до кронштейна 3, виконаного з металевого кутика. Протилежний кінець труби закінчується стержнем діаметром близько 10 мм, який через отвори в стінці 6 заходить всередину приміщення 4. На цьому кінці встановлено індикатор годинникового типу 5 з ціною поділки 0,01 мм. Виготовлені два стержні-близнюки із сталі покриті чорним матовим покриттям. Один з них знаходиться в штучно створеній екраном 8 тіні, інший – на відкритому сонці.

Враховуючи коефіцієнт температурного розширення сталі $\alpha = 1,2 \cdot 10^{-4}$ $1/^\circ\text{C}$, прийнята довжина стержня $l = 1,7$ м забезпечує його видовження при зміні температури на 1°C на 0,02 мм. Одна поділка індикатора відповідає зміні температури стержня на $0,5^\circ\text{C}$, тобто точність вимірювання деформації відповідає точності вимірювального термометра, яким заміряється температура атмосферного повітря.

Для дослідження впливу сонячної радіації на зразки з поверхнею різного кольору та фактури додатково встановлювали короткі відрізки труби довжиною 100 мм (рис. 1.10), які вертикально закріплюються до стіни за допомогою болтового з'єднання. Між стіною і зразком закріплено дерев'яну планку, щоб обумовити його вільне звисання без контакту зі стіною. Кілька пар таких стержнів пофарбовано в різні кольори – чорний, білий і декілька «нейтральних» («проміжних») кольорів. Один з пари зразків-близнюків залишається відкритим, а інший захищається екраном від прямої дії сонячної радіації.

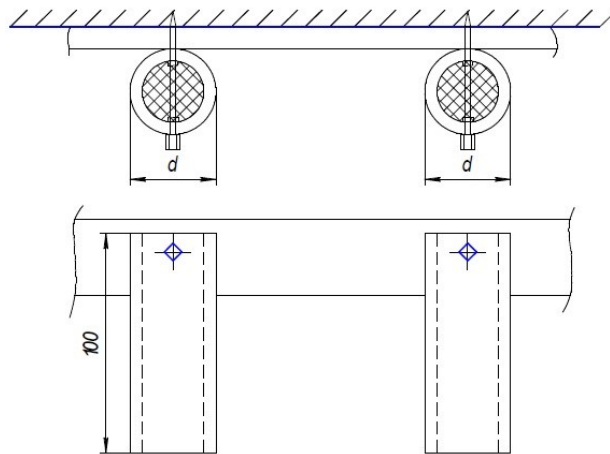


Рисунок 1.10 – Схема установки для аналізу залежності температури зразків від їх кольору та фактури

Температуру конструкції і повітря вимірювали хромель-копелевими термопарами 7, встановленими на внутрішній стороні труб. Після встановлення термопар торці труб 2 заповнюються монтажною піною з метою їх герметизації та ізоляції термопар від контакту з повітрям.

З внутрішньої сторони зразків (рис. 1.10), також встановлювали по дві хромель-копелеві термопари (з боку стіни та на освітленій стороні). Як і в попередній конструкції, внутрішня порожнина труб заповнюється монтажною піною. Встановлення термопар з внутрішньої сторони труби дозволяє безпосередньо вимірювати температуру самої конструкції, а не атмосферного повітря.

Вимірювання проводили три рази на добу: під час найнижчої і найвищої температури повітря (близько 7 і 15 год.), а також при повній відсутності сонячної радіації (в темний період доби). З метою дослідження швидкоплинних добових змін температури та деформацій конструкцій періодично протягом однієї-двох діб проводили вимірювання через кожні півгодини. Такий порядок вимірювань забезпечить можливість аналізу сезонного і добового ходу температури, випадкову міждобову мінливість температур повітря та зразків, а також відповідні температурні деформації металевих конструкцій.

О.В.Семко та В.В.Пашинський характеризують свої установки як такі, що забезпечують достатню точність вимірювання та отримання синхронних у часі реалізацій випадкових процесів зміни температури атмосферного повітря, температури й температурних деформацій елементів металевих конструкцій.

Jozef Kul'ka, Martin Mantič, Vierošlav Molnar [48] досліджували вплив температурних факторів на напружений стан металевих конструкцій підйимального крану в ливарному цеху. Їхнє дослідження базувалось на врахуванні температурного фактору, як впливає нерівномірність нагрівання окремих вузлів металевих конструкцій підйимального крану при розливанні металу на їх міцність, і чи є припустимі температурні деформації причиною появи в несучих конструкціях крану непередбачуваних тріщин.

Для визначення фактичних напружень в елементах металоконструкції проведені тензометричні досліди напруженого стану моста ливарного крану вантажопідйомністю 450/100/16 т в умовах виробництва.

В результаті досліду було, що нерівномірність нагрівання окремих елементів моста підйимального крана зумовлює появу температурних деформацій. Виникаюча при цьому сила пружності (1.4) рівна:

$$P = EF\Delta l \cdot 10^6 / l = EF\alpha(t_1 - t_2) \cdot 10^6 (H), \quad (1.4)$$

де $E = 2 \cdot 10^5$ МПа – модуль пружності сталі;

F – площа поперечного перерізу елемента що розраховується, m^2 ;

$(t_1 - t_2)$ – температурний перепад, приймається в середньому ± 0 C;

$\alpha = 0,0000118$ 1/°C – коефіцієнт лінійного розширення сталі.

Найбільшу увагу варто приділяти напруженням в верхньому і нижньому поясах прогонної балки головного підйому в місцях, де найбільший температурний вплив. По мірі нагрівання верхнього поясу напруження розтягу в ньому збільшувалися, а в нижньому зменшувалися напруження стиснення.

Напруження у верхньому поясі досягали максимального значення в кінці нагріву. Нагрів і температурні напруження розподілялися нерівномірно, як по висоті, так і по довжині прогонної балки.

T. J. Lin, C. W. Huang, та Y. B. Yang [19], проводячи температурний аналіз поведінки зварних прямокутних ферм, при нагріванні і охолодженні, роблять висновки, про те що метал розм'якшується під час випробувань реверсивних деформацій, і це потрібно враховувати при подальших розрахунках.

L.-W Chen, L.-Y Chen [20], проводили механічний аналіз зварних прямокутних ферм, та оцінювали збитки завдані під час пожежі. Досліди проводилися на спеціальному програмному забезпеченні (FDS), яке базується на методі скінчених елементів. Результати аналізу автори пропонують як рекомендації для визначення ремонтпридатності конструкцій.

1.7 Математичне моделювання поведінки зварних ферм при дії силових і температурних впливів

Широкі можливості для розробки універсальних методів розрахунку дає метод скінчених елементів (МСЕ) [66], який базується на детермінованих підходах до моделювання. Він включений в рекомендації Міжнародного інституту зварювання, у норми Німецької асоціації машинобудівних компаній [68].

МСЕ передбачають розроблення скінченно-елементної математичної моделі конструкції та її дослідження з використанням відомих прикладних програмних пакетів комп'ютерним моделюючим експериментом. Використання сучасної обчислювальної техніки дає можливість виконати такий експеримент інженеру-проектувальнику. Багаторазова прогонка комп'ютерного моделюючого експерименту при різних вхідних параметрах

моделі дає можливість виявити вплив цих параметрів на тримкість і матеріаломісткість зварних ферм і оптимізувати їх.

А.М. Югов, В.І. Москаленко, Г.В. Іхно, А.Н. Миронов [17] провели дослідження параметрів напружено-деформованого стану металевого каркасу ванної скловарної печі під час впливу підвищених температур. Моделювання і розрахунок каркасу печі (рис. 1.11) виконано на основі методу скінчених елементів з використання програми SCAD Office, при пружній роботі матеріалу.

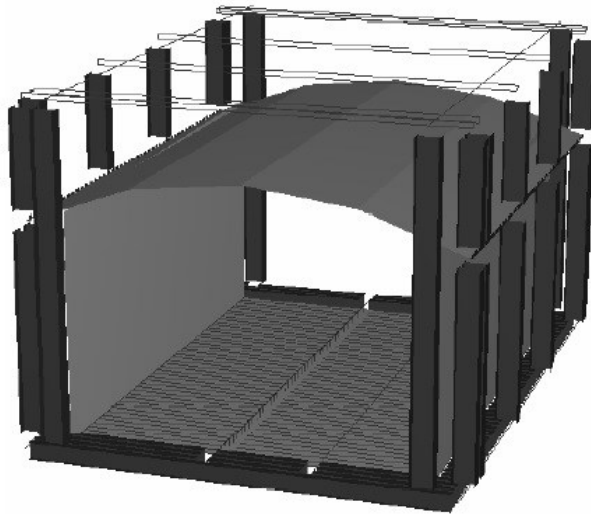


Рисунок 1.11 – Просторова схема конструкції скловарної печі

Визначення розрахункових зусиль для моделі каркасу проведено у дві стадії. На першій стадії проведено статичний розрахунок рами з навантаженнями від власної ваги і ваги скломаси. Метою даного розрахунку є виявлення внутрішніх силових факторів. Розрахунки показали, що поперечна сила Q в елементах вузлів – незначна, а основними є згинальний момент M і поперечна сила N .

На другому етапі визначено додаткові напруження від температури стінок, днища, склепінь. Специфіка оцінювання цих напружень, полягала в її нерівномірній дії по довжині печі. Розглянуто те, що в скловарній печі безпосередній контакт металевого каркасу і футерування існує тільки в зоні

спирання склепіння через кутник до колони. Температурні напруження, А.М. Югов, В.І. Москаленко, Г.В. Іхно, А.Н. Миронов, запропонували оцінювати двома способами:

- як градієнт на всю товщину склепіння;
- як зусилля від розширення кладки при середній температурі, діючій на склепіння.

Після визначення зусиль в елементах конструкцій, науковці зробили висновки, в яких йшлося про те, що отримані в результаті розрахунку перерізи колон, балок і тяжів не сильно відрізняються від прийнятих в будівництві. На цей фактор значно вплинуло температурне напруження, яке в 4-5 разів збільшувало загальне напруження в металевому каркасі.

О. Rand, D. Givoli [21] досліджували тривимірний температурний ефект для просторової зварної ферми на основі методу скінчених елементів. Вплив температури на стержні розглядали, так ніби він діє по осьовій координаті для кожного багат шарового елемента. Результати порівнювали з результатами з одно- та двовимірною розрахунку.

1.8 Аналіз відомих наукових результатів про поведінку зварних ферм при дії силових і температурних впливів та постановка задач для власних досліджень

Основою для врахування температурних впливів при проектуванні зварних металевих ферм є схема технологічного нагріву конструкцій з вказаною кількістю циклів за час експлуатації, отримана на підставі теплового моделювання або досвіду експлуатації аналогічних конструкцій.

Моделюючи температурний вплив необхідно враховувати всі умови експлуатації конструкції: район будівництва, температуру середовища, вид

діяльності підприємства, теплопровідність та вогнестійкість конструкцій, а також навантаження, які необхідно сприймати [49...53, 30, 54...60].

Для конструкцій, розташованих на великій висоті або в зоні дії високих температур, дослідження температурних впливів традиційними методами є неможливе, тому в таких випадках використовують безконтактні методи визначення температури [61], що базуються на використанні теплового випромінювання. При такому методі вимірювальний прилад не нагрівається разом з об'єктом дослідження. Застосування даного методу є зручним для випробовувань на вогнестійкість, оскільки виміри можна здійснювати на відстані 10...100 м.

Дослідження температурного впливу на зварні ферми існуючих будівельних конструкцій вибирають враховуючи, що ферма експлуатується впродовж визначеного, достатньо великого періоду часу.

Для визначення температурних деформацій існуючої конструкції до елементів ферми під'єднують термо- та тензодатчики й знімають покази з подальшим їх опрацюванням.

Основними методами, якими користуються для дослідження поведінки зварних ферм при дії силових і температурних впливів, є натурний експеримент, фізичне і математичне моделювання.

Існуючі випробувальні методи не дають можливості дешево і оперативно визначати вогнестійкість конструкцій, а традиційні розрахункові методи не дають достовірних результатів при розрахунку великогабаритних конструкцій, так як не враховують вплив деформації температурної повзучості сталі на втрату міцності й стійкості конструкції при підвищених температурах.

Враховуючи різноманітність стандартних методик розрахунку температурних напружень, а також широкий спектр реальних температур, необхідний диференційований підхід при заданні граничних умов для розрахунку зварних ферм при сумісному впливі навантаження і температури.

Виходячи з аналізу відомих наукових результатів про поведінку зварних

ферм при дії силових і температурних впливів сформульовано задачі для власних досліджень:

- розробити конструкцію зварної прямокутної ферми та її фізичних моделей;

- запропонувати методики виконання напівнатурних експериментальних досліджень для визначення особливостей деформування й руйнування зварної прямокутної ферми;

- запропонувати прикладний програмний пакет для виконання комп'ютерного моделюючого експерименту і методику його застосування;

- сформулювати експериментально отриманий вхідний інформаційний масив механічних властивостей конструкційного матеріалу зварної ферми як для кімнатних умов, так і для підвищених температур;

- напівнатурним і комп'ютерним моделюючим експериментами дослідити поведінку фізичних моделей зварної ферми при навантажуванні без нагрівання і з нагріванням та виконати верифікацію отриманих результатів;

- дослідити міцність і деформівність повномасштабної зварної прямокутної ферми при різних рівнях силових і температурних впливів комп'ютерним моделюючим експериментом з використанням програмного пакету Ansys;

- розробити аналітичну залежність для визначення граничного навантажування на повномасштабну зварну ферму при різних температурах;

- сформулювати пропозиції щодо практичного використання отриманих в роботі результатів при проектуванні, виготовленні, експлуатації і реконструкції зварних прямокутних ферм.

1.9 Висновки до розділу 1

1. Виконано огляд, систематизацію і аналіз наукових досягнень вітчизняних і зарубіжних вчених щодо міцності і деформівності зварних ферм при сумісному впливові силових і температурних чинників.

2. Виявлено, що класичні аналітичні розрахунки не можуть враховувати багатопараметричний вплив на поведінку зварних ферм, а найдостовірніша інформація за згаданих умов може бути отримана натурним, напівнатурним або комп'ютерним моделюючим експериментом.

3. Через велику матеріаломісткість і вартість натурних зразків та енергозатратність випробувального устаткування результатів натурних досліджень зварних ферм відомо дуже мало.

4. Для досягнення високого ступеня достовірності результатів комп'ютерного моделюючого експерименту з експлуатаційними показниками зварної ферми необхідно правильно вибрати прикладний програмний пакет для дослідження і запропонувати методику його використання.

5. Використовуючи запропоновані методичні підходи, доцільно виконати дослідження фізичної моделі зварної ферми напівнатурним силовим і комп'ютерним моделюючим експериментами та провести верифікацію отриманих показників для виявлення достовірності результатів комп'ютерного моделювання.

6. На підставі огляду, систематизації і аналізу відомих наукових результатів інших вчених сформульовано задачі для власних досліджень.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИЧНІ АСПЕКТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ПОВЕДІНКИ ЗВАРНОЇ ФЕРМИ ПРИ ТЕРМОСИЛОВИХ ВПЛИВАХ

2.1 Структурно-методична схема досліджень зварної прямокутної ферми при дії силових і температурних впливів

Для розв'язання сформульованих в роботі завдань для власних досліджень і досягнення поставленої мети прийнято таку методичну послідовність:

1. Розроблення конструкції зварної ферми для дослідження, схеми її базування, схеми та режимів її навантажування.

2. Розроблення конструкцій масштабних моделей ферми зі збереженням прийнятих схем базування та режимів навантажування.

3. Формування інформаційної бази про властивості конструкційного матеріалу, з якого виготовлено ферми, за умов статичного навантажування при кімнатній і підвищених температурах.

4. Виконання напівнатурного експерименту з силового та термосилового впливу на масштабні моделі ферми

5. Виконання комп'ютерного моделюючого експерименту для масштабних моделей ферми при тих режимів силового та термосилового впливу, які були використані при напівнатурному експерименті.

6. Верифікація результатів комп'ютерного моделюючого експерименту порівнянням їх з результатами напівнатурного експерименту. При досягненні співпадання показників деформівності і міцності на рівні 90% і вище вважати результати комп'ютерного моделювання задовільними. В іншому випадку слід змінювати параметри скінченно-елементної моделі і повторювати комп'ютерний моделюючий експеримент аж до досягнення співпадання відповідних показників на рівні 90% і вище.

7. Виконати комп'ютерний моделюючий експеримент для

повномасштабної зварної прямокутної ферми при дії термосилових впливів з використанням параметрів скінченно-елементної моделі, отриманих в попередньому кроці досліджень.

8. Проаналізувати отримані результати досліджень і зробити загальні висновки про вплив температури на параметри міцності і деформівності зварної прямокутної ферми, сформулювати рекомендації щодо використання результатів досліджень при проектуванні і експлуатації ферм такого типу за умов сумісної дії навантаження і температури.

2.2 Вибір конструкції ферми, її масштабних моделей та схеми їх навантажування для дослідження

2.2.1 Нормативні вимоги до проектування і виготовлення прямокутних зварних ферм

Згідно з чинними Державними будівельними нормами ДБН В 2.6-163:2010 "Конструкції будівель і споруд. Сталеві конструкції. Норми проектування, виготовлення і монтажу", при проектуванні ферм необхідно забезпечити їх експлуатаційну придатність і безпеку на протязі усього терміну експлуатації. Надійність конструкцій також повинна відповідати вимогам ДБН В.1.2-14.

Під час проектування сталевих зварних ферм важливо зменшувати негативний вплив залишкових деформацій і напружень, зокрема зварних, а також концентрації напружень. Для цього передбачаються відповідні рішення, які включають розробку конструкцій з найбільш рівномірним розподілом напружень в елементах і деталях, уникнення вхідних кутів, різких перепадів перерізу та інших концентраторів напружень. Крім того, передбачаються впровадження технологічних заходів, таких як встановлення правильного порядку складання і зварювання, застосування попереднього вигину,

механічна обробка відповідних зон за допомогою фрезерування, зачистки абразивним кругом тощо.

Рекомендується:

- Вибирати оптимальні за техніко-економічними показниками конструктивні схеми ферм та перерізи елементів конструкцій, з урахуванням їх призначення та умов експлуатації.
- Застосовувати економічні профілі прокату та ефективні сталі.
- Дотримуватися однотипності конструктивних елементів та вузлів за допомогою застосування уніфікованих рішень.
 - Застосовувати прогресивні конструкції, такі як просторові системи із стандартних елементів, конструкції, які поєднують несучі та огорожувальні функції, попередньо напружені, вантові, тонколистові та комбіновані конструкції зі сталей різної міцності.
 - Передбачати технологічність і мінімальну трудомісткість виготовлення конструкцій, враховуючи виробничі можливості та потужність технологічного та кранового обладнання підприємств-виробників, передбачаючи заводські з'єднання прогресивних типів, таких як механізоване зварювання і т. д.
 - Виконувати розділення конструкцій на відправні елементи з урахуванням виду транспорту та габаритів транспортних засобів, підіймально-транспортного та іншого обладнання монтажних організацій, для забезпечення раціонального та економічного транспортування конструкцій та виконання максимального обсягу робіт на підприємстві-виробнику.
 - Застосовувати конструкції, що забезпечують технологічність і мінімальну трудомісткість монтажу; використовувати монтажні з'єднання на болтах, включаючи фланцеві та фрикційні, з фрезерованими торцями (зварні монтажні з'єднання допускаються лише за відповідного обґрунтування); передбачати монтажні кріплення елементів, такі як монтажні столики і т. д.
 - Встановлювати показники довговічності з урахуванням конструктивних, технологічних та експлуатаційних обмежень паспортних характеристик

режиму експлуатації будівель і споруд.

Навантаження та впливи на сталеві конструкції потрібно приймати з урахуванням нормативних вимог, таких як ДБН В.1.2-2, ДБН В.1.1-12, а також інших нормативних документів та завдань на проектування. Граничні значення прогинів і переміщень елементів конструкцій слід визначати відповідно до вимог ДСТУ Б В.1.2-3:2006 "Прогини і переміщення. Вимоги проектування".

Розрахункові схеми та передумови розрахунку мають відображати реальні умови роботи сталевих конструкцій. Зазвичай сталеві конструкції розраховуються як єдині просторові системи з урахуванням чинників, що визначають напружений і деформований стан, а в деяких випадках - з урахуванням нелінійних властивостей розрахункової схеми. При розрахунку конструкції на різних етапах монтажу або експлуатації важливо враховувати вплив чинників, які визначають її напружено-деформований стан на кожному з етапів.

Вибір розрахункових схем та методів рекомендується проводити з урахуванням ефективного використання обчислювальної техніки. При поділі системи на окремі елементи розрахункові зусилля в статично невизначених конструкціях можна визначати за недеформованою схемою з припущенням пружної роботи сталі.

Передбачено такі розрахункові моделі для несучих конструкцій ферм:

- окремі конструктивні елементи: Ця модель враховує окремі елементи конструкції, такі як розтягнуті і стиснуті стрижні, балки, стояки і колони суцільного перерізу. Розрахунки здійснюються для кожного елемента окремо, враховуючи його власні характеристики та навантаження.

- плоскі або просторові системи, закріплені від перекосу: Ця модель передбачає, що конструкція має певну жорсткість у напрямку перекосу. Вона враховує взаємодію між елементами конструкції та їх реакції на зовнішні навантаження, які враховують зсувну силу.

- плоскі або просторові системи, не закріплені від перекосу: Ця модель

враховує конструкції, які не мають жорсткого закріплення від перекосу. При розрахунку таких конструкцій важливо не тільки перевіряти окремі елементи, але і враховувати можливість досягнення граничного стану системи в цілому.

Для зварних ферм рекомендується використовувати сталевий прокат загального призначення і спеціальний прокат для зварних конструкцій, а також гнуті профілі і труби з низьковуглецевої і низьколегованої сталі. Основні фізичні характеристики матеріалів для конструкцій слід визначати згідно з встановленими стандартами та сертифікатами якості. При виборі сталі для конструкцій слід враховувати:

- призначення конструкцій та елементів;
- можливі наслідки досягнення граничних станів;
- ступінь агресивності впливів;
- рівень залишкових напружень від зварних з'єднань, ступінь концентрації напружень, властивості сталі в зоні зварювання;
- характер діючих напружень (статичне, динамічне) та їх рівень;
- вид напруженого стану (одноосьовий, плоский чи об'ємний, розтяг або стиск);
- потрібно враховувати особливості конструктивної форми і технології виготовлення, такі як концентратори напружень, гільйотинне різання, наклеп тощо.
- треба враховувати кліматичний район будівництва і розрахункову температуру експлуатації.

Під час проектування необхідно враховувати специфіку монтажу елементів та складання вузлів, а також допустимі монтажні навантаження, якщо ці чинники були враховані при визначенні розрахункових зусиль.

2.2.2 Вибір конструкції ферми та схеми її навантажування

Для розкриття теми дисертаційної роботи і поставлених задач необхідно вибрати ферму для дослідження. Для вибору конструкції зварної прямокутної ферми, технології її виготовлення, схеми її базування, схеми і режимів навантажування враховано ряд чинників:

- нормативні вимоги до конструкцій такого типу (див. п. 2.2.1);
- типовість конструкції для можливості її використання в різних будівлях і спорудах та узагальнення результатів досліджень;
- можливість виконання комп'ютерних моделюючих експериментів для повномасштабної ферми при сумісній дії силових і температурних чинників;
- можливість виготовлення і дослідження фізичних моделей на наявному випробувальному устаткуванні для верифікації результатів комп'ютерних моделюючих експериментів;

Виходячи з цього переліку, запропоновано конструктивну схему ферми для дослідження (рис. 2.1).

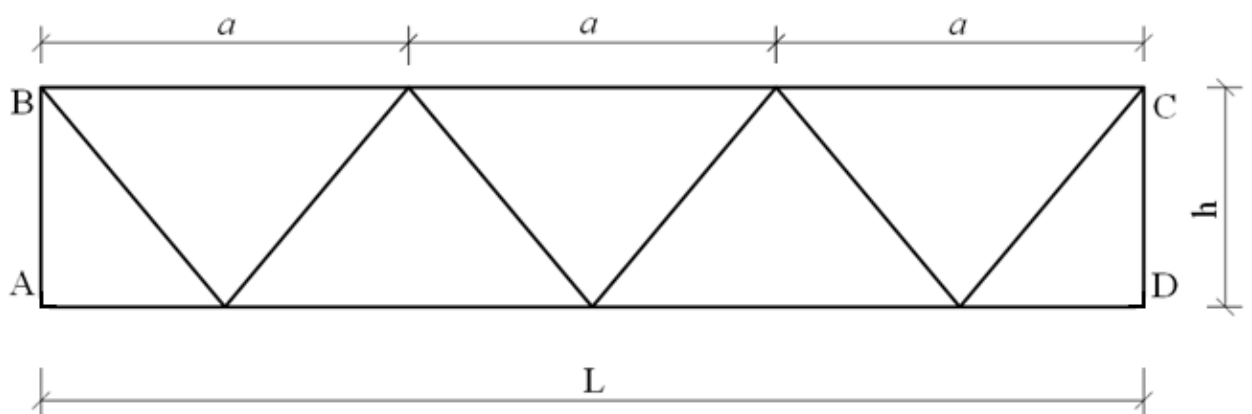


Рисунок 2.1 – Конструктивна схема досліджуваної ферми

Ця конструктивна схема є типовою зварною прямокутною фермою, яка може використовуватися в різних цілях, таких як прогін моста, технологічна

платформа для встановлення обладнання тощо. Ферма складається з трьох основних конструктивних елементів (рис. 2.1) - верхнього (BC) та нижнього (AD) поясів і решітки, що складається з розкосів (похилих стержнів) і стояків (вертикальних стержнів), які з'єднують пояси. Відстань між вузлами решітки ферми - a (панель ферми), відстань між її опорами - L (прогін ферми). Габаритна висота ферми - h (відстань між поясами). Згідно з цією конструктивною схемою буде розроблено конструкції як повномасштабної ферми, так і її фізичних моделей.

Для цієї конструктивної схеми ферми очевидно є схеми базування і навантажування (рис. 2.2).

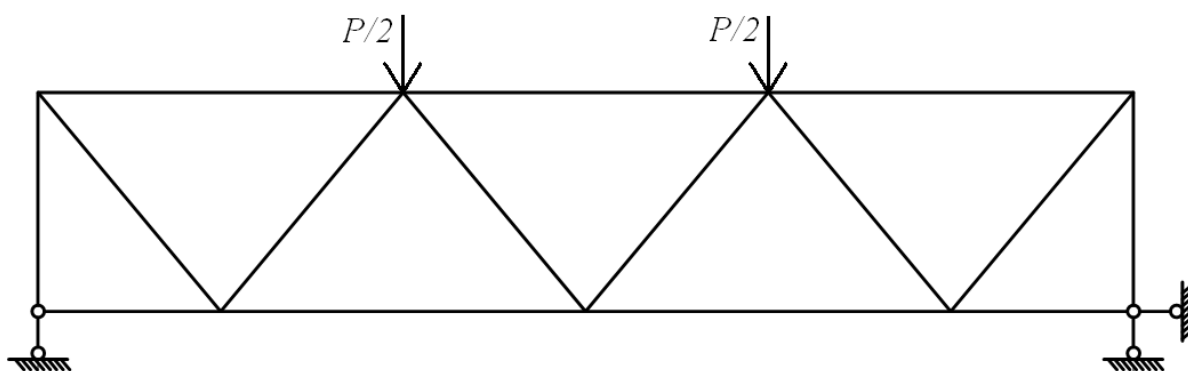


Рисунок 2.2 – Схеми базування і навантажування досліджуваної зварної ферми

Згідно з конструктивною схемою (рис. 2.1) прийнято конструкцію повномасштабної досліджуваної ферми 18000x3600 (рис. 2.3).

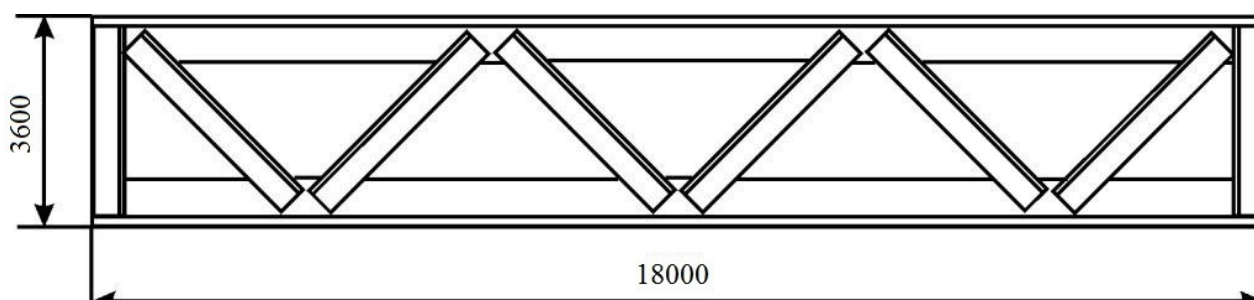


Рисунок 2.3 – Конструкція досліджуваної ферми

Характеристики конструктивних елементів повномасштабної зварної ферми 18000x3600 подано в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Елементи зварної повномасштабної ферми 18000x3600

Елемент	Довжина, мм	Поперечний переріз			Матеріал
		Профіль	Площа, см ²	Осьовий момент опору, см ³	
Нижній та верхній пояси	18980	Кутник 100×100×10	19,24	24,97	ВСтЗпс
Ліва і права стійки	3600				
Розкоси	4590				

2.2.3 Розробка конструкцій фізичних моделей зварної ферми для напівнатурного експерименту

Аналітичні методи розрахунку фокусуються на обмеженій кількості основних вхідних даних, які не враховують всі аспекти конструкції, а лише найважливіші серед них. За їх допомогою створюється розрахункова схема зварної ферми, яка дозволяє передбачити її поведінку під час експлуатації. Розрахункова схема - це спрощена модель конструкції, що використовується для розрахунків. Чим точніше розрахункова схема відображає реальну конструкцію, тим складніше провести розрахунки. Однак це може вимагати спрощень, що полегшують розрахунок. Недооцінка навіть незначних факторів впливу, особливо у поєднанні з іншими, може призвести до неузгодженості між

розрахунками та реальними результатами, які отримані під час експлуатації чи натурними дослідженнями.

Реальні зварні ферми є складними системами з різноманітними фізичними властивостями та недоліками, які не завжди можна описати теоретично. Для вивчення таких систем широко застосовується фізичне моделювання, що ґрунтується на подібності фізичних процесів. Коли немає математичної моделі або вона занадто складна, використовують натурні експериментальні дослідження на фізичних моделях з наступним перерахунком результатів на реальну конструкцію, яка слугує прототипом моделі. Такі експерименти ще називають напівнатурними. Тобто вивчення поведінки цікавої конструкції замінюється дослідженням поведінки її фізичної моделі в спеціальних лабораторних умовах.

Розробка фізичної моделі для дослідження зварної прямокутної ферми при статичних навантаженнях обумовлена двома основними причинами:

- складність врахування впливу багатьох стохастичних чинників при їх комплексному поєднанні. У реальних умовах конструкція піддається різноманітним зовнішнім факторам, таким як температурні зміни, вологість, динамічні навантаження тощо. Фізична модель дозволяє систематично дослідити ці фактори та їх взаємодію, що може бути складно або неможливо зробити теоретично.

- значна матеріало-, трудо- і енергомісткість випробування натурних зразків. Випробування реальних конструкцій може бути вкрай витратним за ресурсами. Фізична модель дозволяє вести експерименти в більш контрольованих умовах та зменшити витрати на матеріали, працю та енергію.

Під час напівнатурного експерименту система повинна піддаватися різноманітним видам впливу, які якомога точніше відтворюють робочі навантаження як за величиною, так і за характером дії.

При розробці фізичної моделі обов'язковою є дотримання умов подібності з реальною конструкцією і її фізичною моделлю [3] (на практиці - з врахуванням

певних коефіцієнтів). Вагомий науковий внесок в формулювання і розвиток положень теорії подібності саме при дослідженні механічних систем та фермових конструкцій, зробили Dubey S. [34], Müller E [40], Maddox S. [44].

Принципи теорії подібності визначають співвідношення між параметрами фізичної моделі та реальною конструкцією, а також правила перерахунку досліджуваних величин з моделі на реальну конструкцію і навпаки.

Експериментальні дані, отримані на фізичній моделі, дозволяють ідентифікувати результати дослідження для повномасштабних зварних ферм.

Системи тіл називають подібними, якщо вони геометрично схожі між собою, в них відбуваються процеси однакового типу, і однойменні величини, що характеризують ці явища, відносяться одна до одної як постійні числа. Інакше кажучи, явище вважається подібним до заданого, якщо його можна отримати шляхом такого перетворення, при якому кожна величина змінюється на певний коефіцієнт. Це перетворення називається подібним перетворенням. [66].

Коефіцієнти пропорційності c_l , і т.д. називаються константами подібності. Для кожного роду величин вони мають своє чисельне значення.

Так, константи подібності залишають своє значення для будь-яких випадків співвідношення однойменних величин. Наприклад, якщо l' і l'' – однойменні відрізки двох подібних систем, то справедлива рівність

$$\frac{l''}{l'} = \frac{l_1''}{l_1'} = \frac{l_2''}{l_2'} = \frac{l_0''}{l_0'} = \frac{l_2'' - l_1''}{l_2' - l_1'} = \frac{\Delta l''}{\Delta l'} = c_l \quad (2.1)$$

і, отже, відношення довжин $l''/l' = c_l$ варто замінити відношенням інших відповідних довжин. Так формулюється правило заміщення одних величин іншими тієї ж назви.

Враховуючи вимоги до розроблення фізичних моделей [5, 66, 67] і технологічні можливості для виконання напівнатурного експерименту, було

прийнято рішення про використання двох масштабних моделей для дослідження зварної прямокутної ферми. При цьому незмінними залишилися прийнята конструктивна схема (рис. 2.1), схеми її базування та навантажування (рис.2.2).

Конструкцію фізичної моделі 600x120 подано на рис. 2.4.

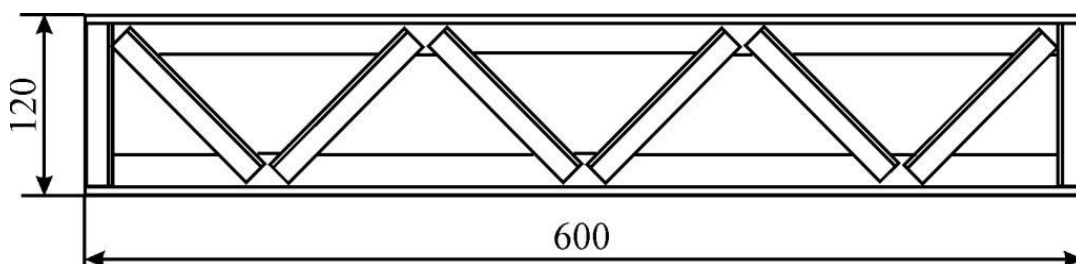


Рисунок 2.4 – Конструкція фізичної моделі 600x120 зварної прямокутної ферми

Характеристики конструктивних елементів фізичної моделі 600x120 зварної ферми подано в табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Елементи фізичної моделі 600x120 зварної ферми

Елемент	Довжина, мм	Поперечний переріз			Матеріал
		Профіль	Площа, см ²	Осьовий момент опору, см ³	
Нижній та верхній пояси	600	Кутник 20×20×3	1,13	0,28	ВСт3пс
Ліва і права стійки	120				
Розкоси	153				

Конструкцію фізичної моделі 2000х400 подано на рис. 2.5.

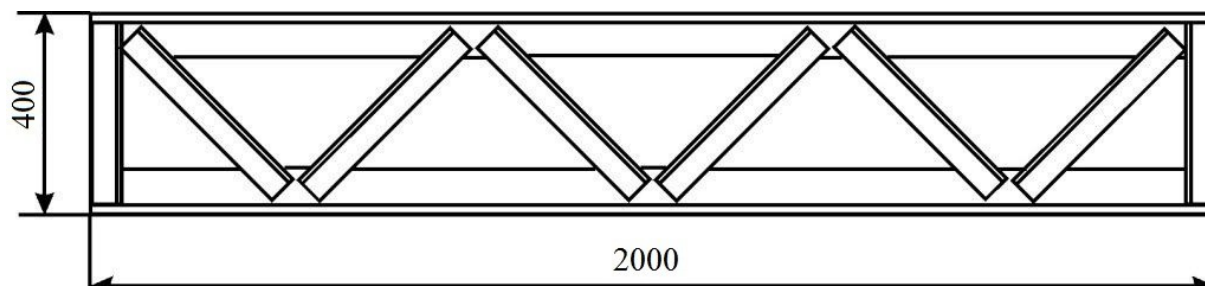


Рисунок 2.5 – Конструкція фізичної моделі 2000х400
зварної прямокутної ферми

Характеристики конструктивних елементів фізичної моделі 2000х400 зварної ферми подано в табл. 2.3.

Таблиця 2.3 – Елементи фізичної моделі 2000х400 зварної ферми

Елемент	Довжина, мм	Поперечний переріз			Матеріал
		Профіль	Площа, см ²	Осьовий момент опору, см ³	
Нижній та верхній пояси	1992	Кутник 40×40×4	3,08	1,60	ВСт3пс
Ліва і права стійки	400				
Розкоси	510				

Матеріал зразків – сталь звичайної якості ВСт3пс. Виробник сталі ВАТ «Арселор Міттал Кривий Ріг». Повна інформація про характеристики гарячевальцьованого кутникового профілю, включаючи хімічний склад сталі, подана в Сертифікаті № Б-1874 від 13.07.2021р. згідно стандарту ISO 9001-2000.

Всі зварні шви на зразках були виконані напівавтоматичним дуговим зварюванням за допомогою постійного струму прямої полярності з використанням дротового електрода діаметром 1,2 мм типу Св-08Г2С з однієї поставочної партії. Цей процес проводився в середовищі вуглекислого газу (СО2) з дотриманням стандартизованих технологій. Робочий струм зварювання склав 110 Ампер.

2.2.4 Визначення констант фізичного моделювання зварної ферми

Фізичні моделі зварної ферми були розроблені з врахуванням умов подібності при фізичному моделюванні об'єктів і явищ. Під час порівняння геометричних розмірів натурального зразка та його фізичних моделей були знайдені константи подібності за співвідношенням (2.1) для розмірів конструкцій.

$$C_l = l''/l' = 600\text{мм}/18000\text{мм} = 120\text{мм}/3600\text{мм} = 0,0333,$$

$$C_l = l'''/l' = 2000\text{мм}/18000\text{мм} = 400\text{мм}/3600\text{мм} = 0,1111,$$

де l'' , l''' і l' – відповідні лінійні розміри фізичних моделей і натурної конструкції зварної ферми.

У таблиці 2.4 наведено константи фізичного моделювання зварної прямокутної ферми, які були визначені за умовами подібності аналогічно за формулою (2.1).

У таблиці 2.4 подано константи фізичного моделювання зварної прямокутної ферми, які визначені за умовами подібності по аналогії за формулою (2.1).

Таблиця 2.4 – Константи фізичного моделювання зварної прямокутної ферми

Матеріал	Розмір, мм	k_1
Кутник 20×20×3	600×120	0,0333
Кутник 40×40×4	2000×400	0,1111
Кутник 100×100×10	18000×3600	1

Отримані константи подібності можуть бути використані для перерахунку результатів, отриманих для фізичної моделі через розрахункові методи або напівнатурний експеримент, до значень, які стосуються повномасштабної конструкції зварної ферми.

2.3 Методика виконання напівнатурних експериментальних досліджень зварної ферми

2.3.1 Методика дослідження параметрів деформування і умов руйнування фізичної моделі 600x120 мм при силових впливах

Виконано напівнатурним силовий експеримент для масштабної моделі 600x120 згідно рис. 2.4 для виявлення параметрів її деформування і умов руйнування при кімнатній температурі. Схеми базування і навантажування згідно рис. 2.2. Тип навантаження – статичне.

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 і запис результатів досліджень з формуванням інформаційних масивів здійснювалось програмно компютером.

На рис. 2.6 зображено структурну схему випробувального комплексу СТМ-100. На рис. 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.

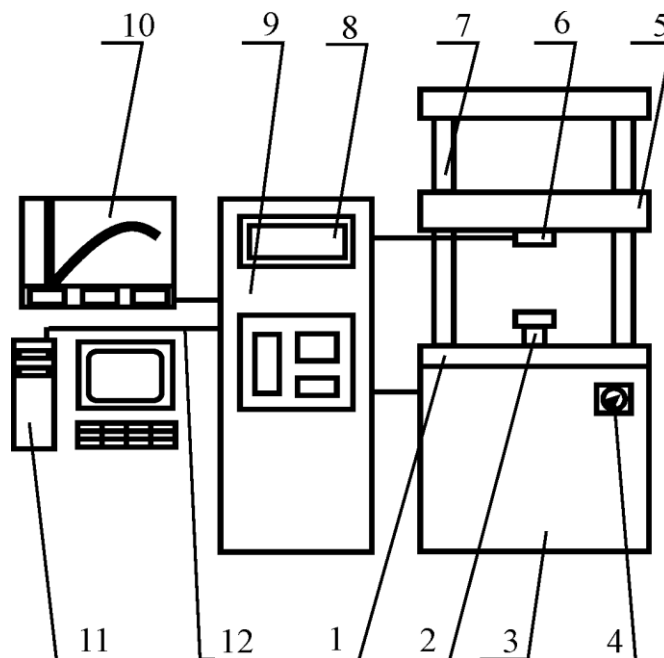


Рисунок 2.6 – Структурна схема випробувального комплексу СТМ-100

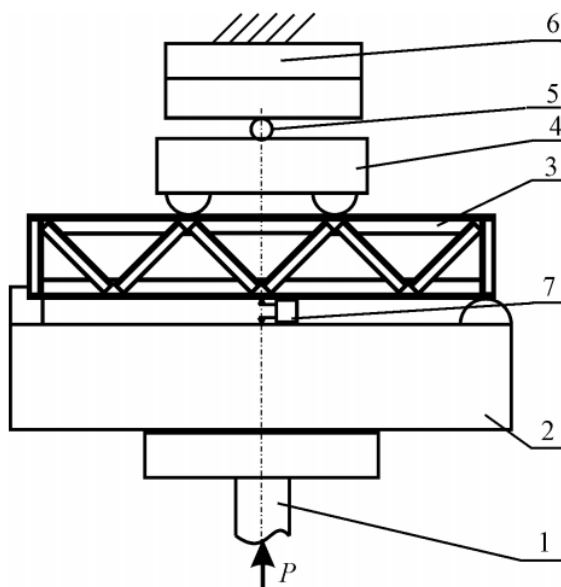
Робоча ділянка для встановлення зразків знаходиться між штоком гідроциліндра 2 та динамометром 6.

Загальний вигляд робочої стійки випробувального комплексу СТМ-100 без комп’ютерного блоку керування подано на рис. 2.7.



Рисунок 2.7 – Загальний вигляд робочої стійки випробувального комплексу STM-100

Схему реалізації експериментального навантажування зразків на випробувальному комплексі STM-100 приведено на рис. 2.8.



a



б

Рисунок 2.8 – Реалізація експериментального навантажування зразків на випробувальному комплексі STM-100

a – конструктивна схема; *б* – зразок 3 в пристосуванні 2, 3

Перевагами такої схеми є:

- відкритий візуальний доступ до всіх зварних швів;
- конструктивна та технологічна раціональність;
- максимальне наближення експлуатаційних та випробувальних умов.

Підставка 2 виготовлена з швелера №14, а траверса 4 - з швелера №12. За результатами класичних інженерних розрахунків та експериментальних випробувань встановлено, що жорсткість цих елементів значно перевищує жорсткість досліджуваного зразка. Тому, деформація цих елементів устаткування не має суттєвого впливу на чистоту експерименту.

Випробувальний комплекс забезпечує можливість проведення як статичних, так і циклічних випробувань при одновісному розтягуванні та стисканні. Основні показники технічної характеристики випробувального комплексу СТМ-100 подано в табл. 2.5.

Таблиця 2.5 – Основні показники технічної характеристики випробувального комплексу 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
Часова дискретність запису інформації, с	0,055
Канали керування і запису інформації	Сила, переміщення штока, дві деформації від тензодавачів
Потужність електродвигуна гідростанції, кВт	11
Робочий хід силового штока гідроциліндра, мм	100
Допустимий режим роботи при випробуваннях	Довготривалий

Під час статичних випробувань навантаження поступово збільшувалося на 500Н з відповідним візуальним контролем стану конструкції. Показники сили, переміщення штока і деформації прогину нижнього пояса записувалися на протязі експерименту. При цьому відбувалося візуальне спостереження за появою тріщин та вигинами елементів, що свідчило про втрату стійкості конструкції. Навантаження здійснювалося до моменту руйнування.

Керування машиною STM-100 відбувалося за допомогою персонального комп'ютера через програму TestBuilder (fatigue tool). Вхідні параметри вводилися безпосередньо у програму для контролю над експериментом.

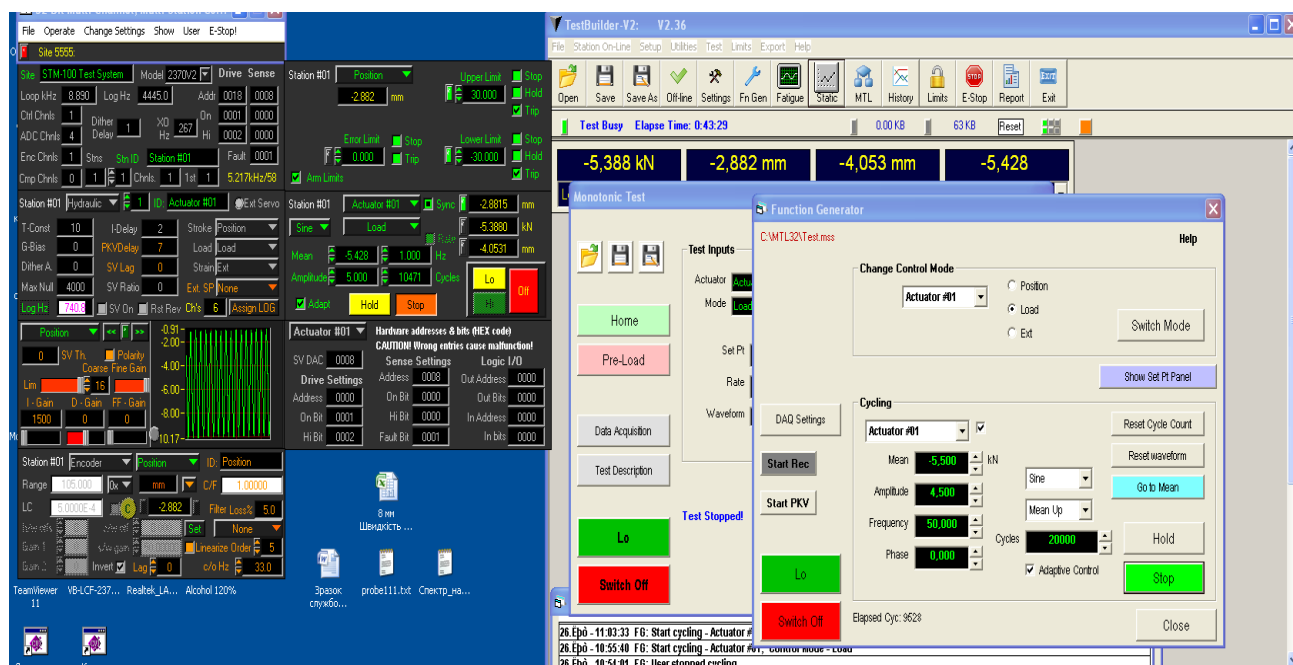


Рисунок 2.9 – Інтерфейс програми TestBuilder із встановленими параметрами випробувань

Для керування експериментом і запису його результатів використовувалося програмне забезпечення MTL32 Base Module. У цьому базовому модулі встановлюються робочі параметри випробувань, такі як тип режиму (жорсткий чи м'який), аварійні межі каналів, апаратні і програмні

коефіцієнти регулювання тощо. Випробування проводилися у модулі TestBuilder, який інтегрований у програмне забезпечення MTL32 Base Module.

MTL32 Base Module та TestBuilder забезпечують виконання таких функцій:

- Підготовка параметрів і конфігурація одного з керуючих каналів.
- Підготовка параметрів і конфігурація за чотирма незалежними вимірювальними каналами.
- Контроль реалізації програми випробувань і установлених аварійних меж каналів.
- Вимірювання зусиль (P), переміщень штока (S), поздовжньої або поперечної деформації (ϵ). Похибка сигналу завдання і точність вимірювання контрольованих величин не перевищує 1% максимального значення встановленого масштабного діапазону.
- 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.
- Можливість зміни програми каналів в процесі випробувань або її зупинки з наступним продовженням з місця зупинки або виходом на заданий рівень статичного навантаження.

2.3.2 Методика дослідження параметрів деформування фізичної моделі 2000x400 мм при силових впливах

Для дослідження поведінки фізичної моделі зварної ферми розміром 2000x400 (рис. 2.4) під впливом статичних навантажень згідно прийнятих схем базування і навантажування було використано випробувальний стенд. (рис. 2.10).

На рис. 2.10 показано: 1 – дослідний зразок; 2 – випробувальний стенд; 3 – нижні опори; 4 – верхні опори; 5 – траверса; 6 – домкрат 50 тс.; 7 – відліковий пристрій динамометра; 8 – динамометр; 9 – індикатор повздовжньої деформації; 10 – затискач для індикатора; 11 – вимірювальний шток; 12 – затискач вимірювального штока.

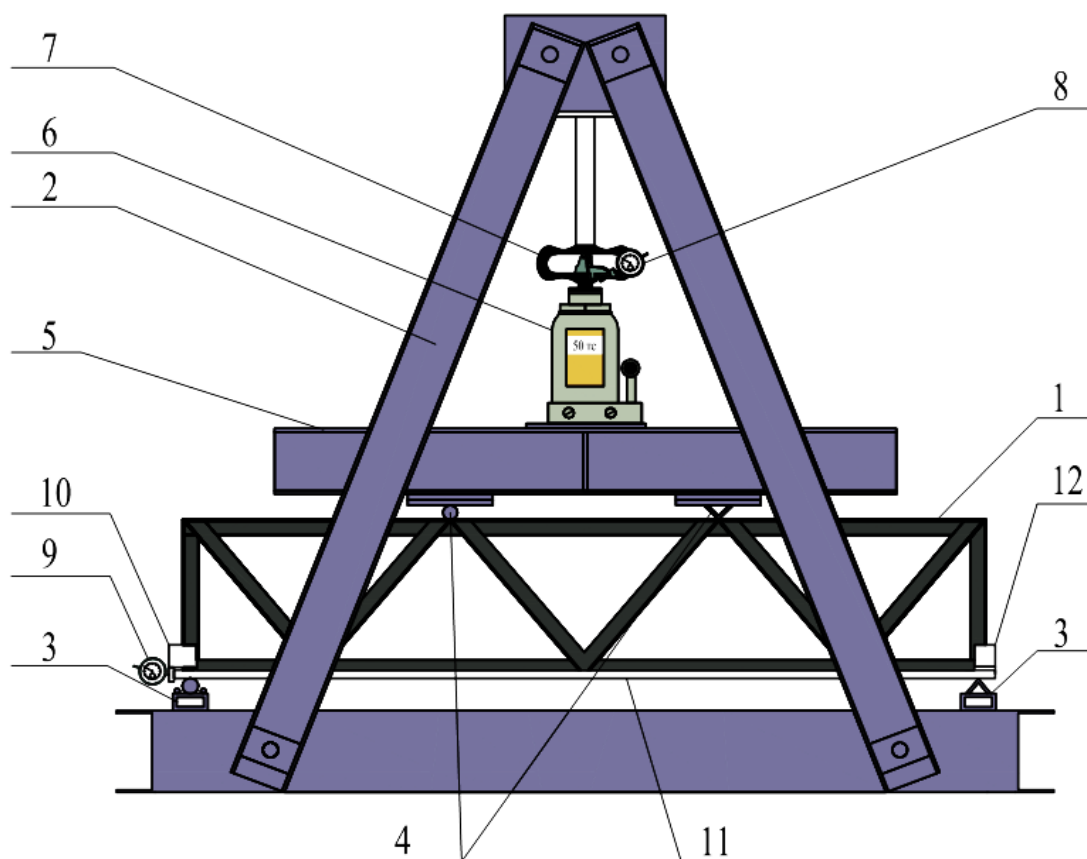


Рисунок 2.10 – Схема реалізації експериментального навантаження фізичної моделі 2000x400

Для напівнатурних випробувань досліджуваний зразок був встановлений у випробувальний стенд згідно з схемою базування (рис. 2.2), на нижні опори. Навпроти верхніх вузлів були встановлені опори на траверсі. Навантаження створювали за допомогою домкрата. Величину навантаження визначали за показниками відлікового пристрою динамометра. Величину поздовжньої деформації нижнього пояса визначали за показами індикатора, встановленого у

затискачі на лівому кінці пояса ферми. Відлік деформації визначали за переміщенням лівого торця вимірювального штока, правий кінець якого був закріплений до затискача, розташованого на правому кінці нижнього пояса.

Запис отриманої інформації виконувався як в ручному, так і в режимі відеофіксації.

2.3.3 Методика дослідження параметрів деформування фізичної моделі 2000x400 мм при температурних впливах

Дослідження деформаційної поведінки зварної прямокутної ферми при температурних змінах проводилося за допомогою методу натурального експерименту в спеціальному пристосуванні, згідно з описаним у джерелі [72] (рис. 1.13).

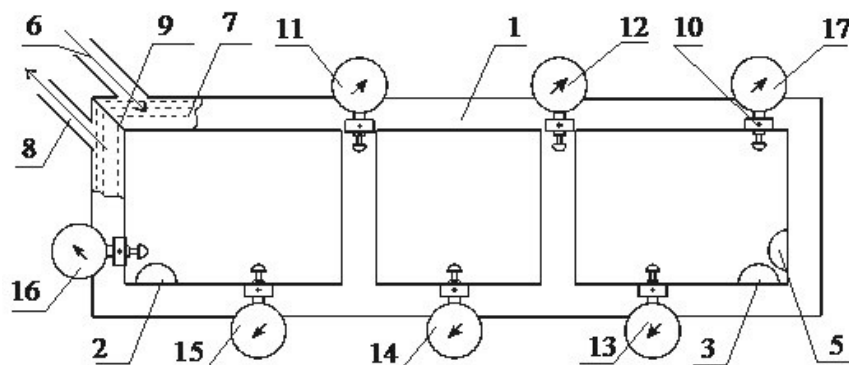


Рисунок 2.13 – Пристосування для визначення температурних деформацій фізичної моделі 2000x400

Пристосування для визначення температурних деформацій плоских ферм працює наступним чином: спочатку плоска ферма піддається підготовці, яка включає нагрівання у печі до температури 170 °С, після чого вона встановлюється в пристосуванні (рис 2.14).

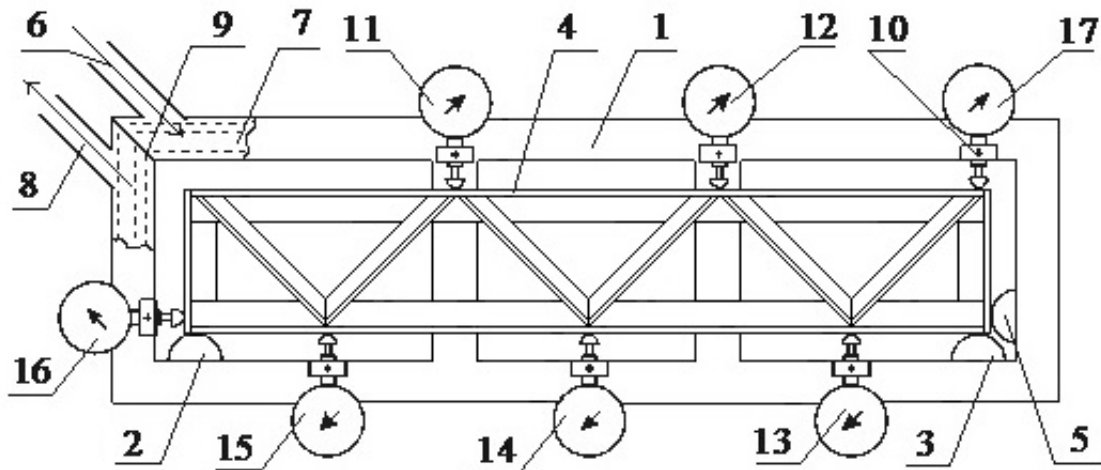


Рисунок 2.14 – Пристосування для визначення температурних деформацій фізичної моделі 2000x400 з встановленою конструкцією

Підготовка пристрою включає в себе наступні етапи: термоконстантна рідина прокачується через патрубки 6 і 8 до того моменту, коли конструкція досягає стабільності за температурою і, відповідно, деформацією. Після цього нагріта ферма встановлюється на базові елементи 2, 3, 5. Початкові показники температури фіксуються, і покази відлікових приладів лінійної деформації 11...17 обнуляються. Під час послідовного охолодження ферми під впливом зовнішнього середовища регулярно вимірюються значення миттєвої температури за допомогою інфрачервоного термометра і відповідні деформації в повздовжніх і поперечних елементах за показами відлікових приладів (індикаторів часового типу) 11...17. Отримані результати фіксуються як вручну, так і за допомогою відеозапису.

По завершенні вимірювань і фіксації даних, створюються інформаційні набори для кожного з вимірювальних приладів.

2.4 Методика виконання комп'ютерного моделюючого експерименту для дослідження міцності й деформівності зварної ферми при термосилових впливах

Комп'ютерний моделюючий експеримент виконано з використанням прикладного програмного пакету Ansys.

Процес моделювання починається із задання характеристик матеріалу конструкції, що розраховується. Необхідно ввести всі значення: густину матеріалу, ізотропний коефіцієнт миттєвого теплового розширення, модуль Юнга, коефіцієнт Пуассона, модуль зсуву, межу пластичності, теплопровідність, питому теплоємність та залежність всіх цих значень від температури. Також можливий вибір матеріалу з його характеристиками з бібліотеки програми, якщо такий матеріал наявний.

Після створення інформаційної бази для матеріалу виконується побудова геометричної моделі ферми. Її можна будувати у спеціальних графічних середовищах (SolidWorks, Ansys, Revit), а після побудови імпортувати в середовище програм скінчено-елементного аналізу або можна створити модель безпосередньо в програмі, користуючись стандартним набором інструментів. Процес моделювання складається із створення ескізів, та операції з ними (витискання, об'єднання, видалення тощо).

Створена модель розбивається на сітку скінчених елементів. Розбиття можна виконувати вручну або автоматично. Процес розбиття вручну передбачає задання кількості та щільності скінчених елементів, на яку необхідно розбити геометричну модель. Автоматичне розбиття, виключає запит кількості та щільності скінчених елементів, процес розбиття відбувається без втручання користувача, підбір виконується в залежності від геометрії конструкції. Недоліком автоматично розбиття є те, що не завжди відбувається рівномірний поділ на скінчені елементи, але ця властивість на результати розрахунку не впливає.

Розбитій сіткою скінчених елементів моделі задаються граничні умови по переміщенню та статичні й температурні навантаження. Граничні умови включають в себе заземлення або заборону переміщення конструкції в одній або кількох площинах. Статичні навантаження є силовим впливом від зусилля, яке зосереджується над вузлами верхнього поясу та власної ваги конструкції.

Завершальною складовою математичного моделювання поведінки зварної ферми при дії на неї температурних впливів є виконання розрахунку та отримання вихідних даних. Оскільки середовище аналізу може видати велику кількість графічних і числових вихідних даних, можна зробити висновки про характеристику конструкції.

У дисертації дослідження поведінки зварної ферми під дією термосилових впливів виконано з використанням прикладного програмного пакету Ansys. Цей програмний комплекс розроблено для операційного середовища Windows на алгоритмічній мові Object Pascal для Delphi і дає можливість вирішити такі задачі дослідження зварних фермових конструкцій (рис. 2.15):

- 1) лінійний статичний аналіз систем;
- 2) пошук параметрів системи, при яких задовольняються вимоги норм та задані проектувальником критерії;
- 3) оптимізація систем за вибраним критерієм.

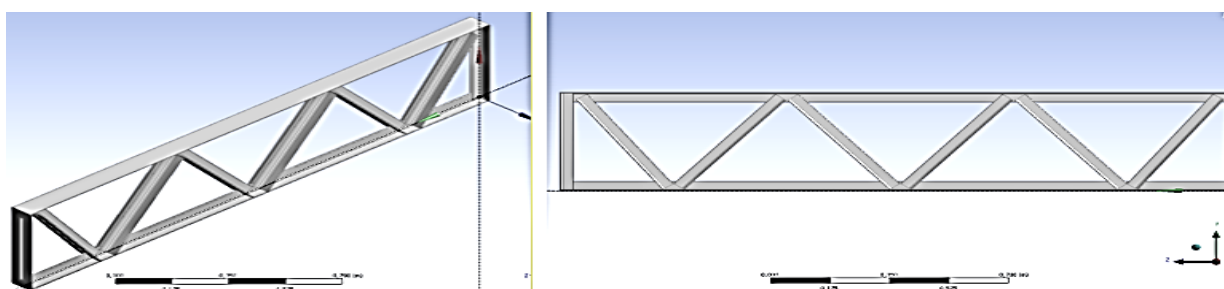


Рисунок 2.15 – Структура програмного забезпечення та організація руху потоків даних

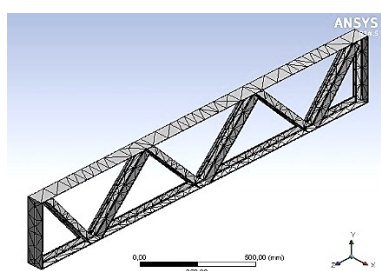
Перед розрахунковим аналізом будь-якої конструкції стоїть завдання визначити, що саме в цьому випадку є суттєвим, а чим можна знехтувати. Це здійснюється для спрощення задачі, оскільки врахування усіх деталей реальної конструкції зазвичай можливе лише з певним ступенем приблизності.

Для вирішення цієї задачі використовується математична модель, яка складається з таких компонентів:

- геометрична модель CAD разом із заданим вантаженням, яка представляє собою формалізовану фізичну модель (рисунок 2.3, а);
- розрахункова модель - скінченно-елементна сітка, яка є математичним поданням геометричної моделі CAD (рисунок 2.3, б);
- точність розрахунків визначається припущеннями фізичної моделі і щільністю сітки.



а)



б)

Рисунок 2.16 – Ферма з розмірами 2000×400 мм:

а) CAD – геометрична модель; б) CAE – скінченно-елементна сіткова модель.

Розв'язок задачі проходить через 4 ступені.

1. Основні допущення:

- вибір типу аналізу (статичний, динамічний, модальний) і проведення відповідних налаштувань програми;
- вибір типу елементів (оболонкові чи твердотільні) ;
- вибір контактної моделі.

2. Підготовка:

- побудова геометричної моделі.
- вибір матеріалу об'єкта та зазначення його основних властивостей;
- генерація сітки та її параметрів. Геометрична модель розбивається на скінченні елементи;
- навантаження і закріплення конструкції;
- вибір розрахункових параметрів;

3. Розрахунок.

4. Постпроцесинг:

- перегляд результатів в файл;
- перевірка достовірності рішення. Всі фізичні величини представлені в графічному вікні у вигляді картинок, таблиць, графіків.

При напружено-деформованих станах розв'язання задачі включає такі основні кроки конструкційного аналізу:

- 1) транслювати геометричну модель з CAD системи;
- 2) вказати властивості матеріалів;
- 3) згенерувати відповідну сітку;
- 4) закріпити модель;
- 5) прикласти навантаження;
- 6) вибрати параметри вирішувача;
- 7) вказати список розрахункових результатів і провести розрахунок;
- 8) генерування розрахункових результатів та генерація звіту.

На початку розв'язку задачі вибирається тип аналізу, після чого програма додає в схему проекту відповідний блок, який включає всі необхідні етапи виконання аналізу.

Для дослідження температурного впливу на зварну ферму вибрано три напрямки розв'язання поставленої задачі:

- за статичних навантажень при кімнатній температурі;
- за статичних навантажень при підвищеній експлуатаційній температурі;
- за статичних навантажень при пожежно-аварійній температурі.

За статичних навантажень при кімнатній температурі розрахунок проводився як статичний міцнісний аналіз. Процес моделювання і розрахунків проходив поетапно. На першому етапі була розроблена структура статичного міцнісного аналізу (рис. 2.2), у рамках якої виконувались подальші дії.

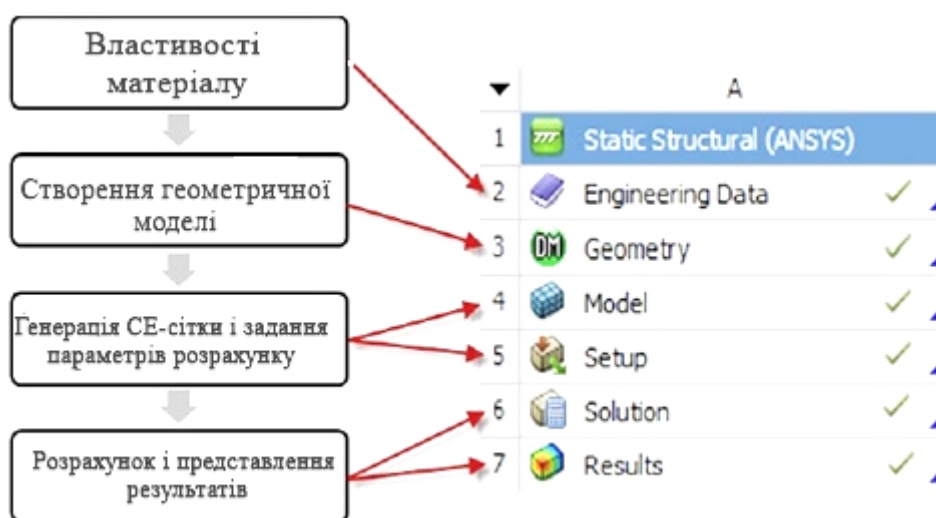


Рисунок 2.17 – Структура статичного міцнісного аналізу

Другим етапом було задання властивостей матеріалу, базоване на характеристиках і властивостях сталі ВСтЗпс. Третій етап полягав у створенні геометричної моделі. У складі Ansys є спеціальний модуль для 3D-моделювання, редагування CAD-геометрії та присвоєння атрибутів моделі перед розбиванням на сітку скінчених елементів.

Після створення ескізів та задання їм розмірних параметрів, виконання ряду послідовних операцій з витискання, об'єднання та видалення граней, було отримано тривимірну геометричну модель зварної прямокутної ферми розмірами 400x2000 мм, як показано на рис. 2.18.

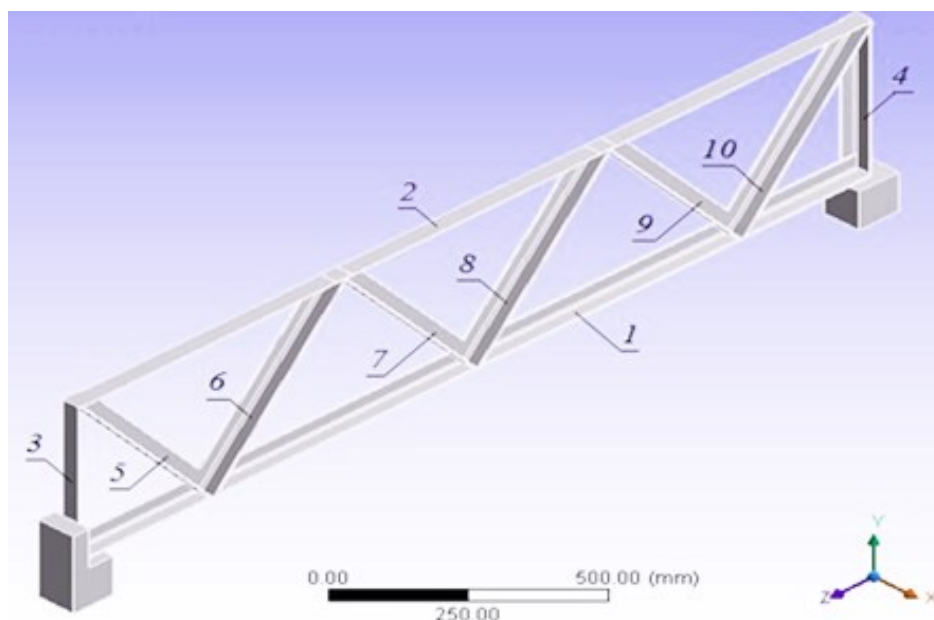


Рисунок 2.18 – Геометрична модель ферми: 1 – нижній пояс; 2 – верхній пояс; 3 – ліва стійка; 4 – права стійка; 5 – розкіс 1; 6 – розкіс 2; 7 – розкіс 3; 8 – розкіс 4; 9 – розкіс 5; 10 – розкіс 6

Четвертий етап полягає у генерації сітки скінчених елементів. За допомогою команди Mesh було виконано розбиття моделі на скінчені елементи відповідно до її геометрії. Сітка, що генерується на геометричній моделі, є основою для вирішення рівнянь у матричному вигляді. Для цієї моделі обрано автоматичну генерацію сітки з налаштуваннями за замовчуванням під час запуску на розрахунок.

П'ятим етапом є встановлення параметрів розрахунку. Тобто вказуємо параметри опор, навантажень та інерційних сил. У цій моделі є дві опори: крайня ліва опора забороняє будь-які переміщення конструкції, а крайня права дозволяє переміщення зварної прямокутної ферми по осі Z. Прикладання зовнішніх силових зусиль виконувалось за схемою, показаною на рис. 2.18. Для

цієї зварної прямокутної ферми сумарне навантаження, для якого проводився розрахунок, становило 10, 20, 30, 40, 50 і 60 кН при кімнатній температурі.

Інерційна сила задається гравітаційним прискоренням, що моделює власну вагу конструкції. У системі СІ величина гравітаційного прискорення становить $9,80665 \text{ м/с}^2$.

Шостий та сьомий етапи завершують структуру статичного міцнісного аналізу, дозволяючи після виконання розрахунків отримати необхідні результати.

Відповідно для статичних навантажень при підвищеній експлуатаційній температурі розрахунок проводився як нестационарний тепловий аналіз. На основі статичного міцнісного аналізу було створено структуру для виконання нестационарного теплового аналізу (рис. 2.19). Було імпортовано модель та додано властивості матеріалу для сталі ВСтЗпс, які відповідають її температурним характеристикам.

Розрахунок здійснювався шляхом задання підвищеної експлуатаційної температури та відповідного коефіцієнта конвекції, а також прикладеного навантаження і власної ваги конструкції. Підвищена експлуатаційна температура становила 200°C . Статичне навантаження дорівнювало 10, 20 та 30 кН, враховуючи власну вагу конструкції.

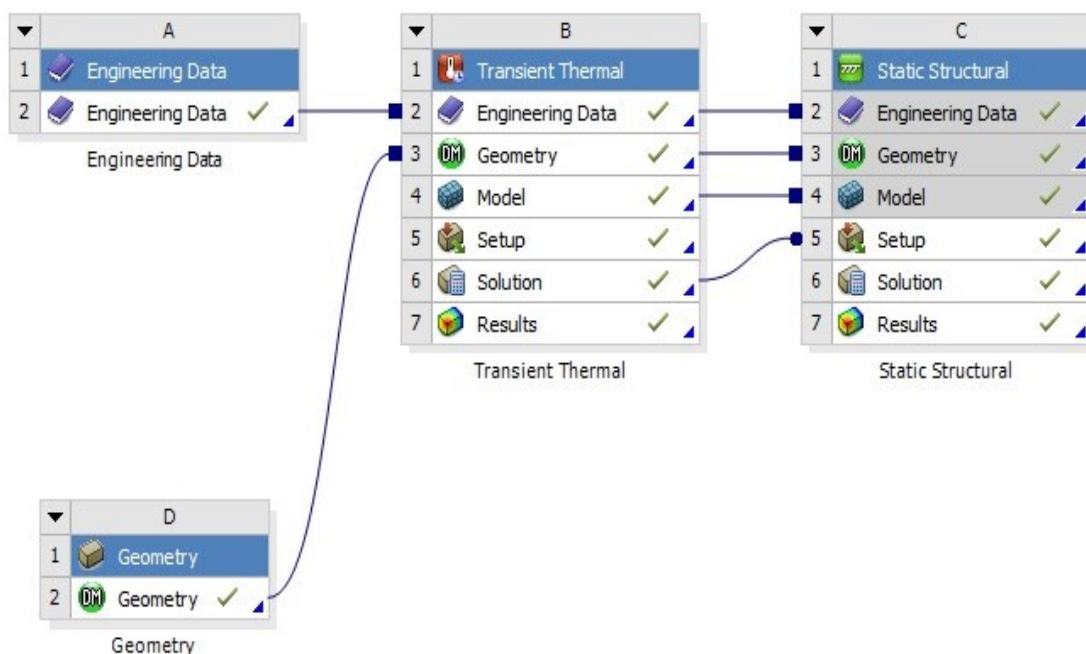


Рисунок 2.19 – Структура нестационарного теплового аналізу

За різних статичних навантажень при пожежно-аварійній температурі розрахунок виконано для температури 450°C .

2.5 Методичні особливості формування інформаційних масивів для комп'ютерного моделювання

Для визначення параметрів деформування і руйнування зварної прямокутної ферми при дії силових і температурних впливів згідно з нормативною базою [22] враховують три групи параметрів:

- впливи експлуатаційного середовища (схему та характер діючих навантажень і температури);
- механічні властивості матеріалів;
- геометричні розміри конструкції в цілому та її елементів зокрема, наявність концентраторів напружень, положення в просторі, умови закріплення конструкції та її елементів.

Механічні властивості матеріалів не мають точних значень. Для них характерним є розсіювання показників в певному діапазоні. Це стосується як показників, вказаних у ДСТУ на матеріал, так і в сертифікатах якості кожної поставачної партії металопродукату. Саме ступінь цього розсіювання і визначатиме в кінцевому результаті достовірність результатів, отриманих комп'ютерним моделюючим експериментом, при порівнянні їх з результатами натурних чи напівнатурних досліджень.

Для досягнення високих показників при верифікації результатів комп'ютерного моделюючого експерименту потрібно діапазон розсіювання значень показників міцності конструкційного матеріалу якомога сильніше звужити. Добитися цього можна лише за результатами натурального експерименту на стандартних зразках, отриманих з металопродукату тієї поставачної партії, з якої виготовлено дослідні зразки прямокутної ферми. Такий методичний підхід відомий і дав задовільні результати в інших дослідників [23]

Для отримання високої достовірності результатів моделювання потрібно виявити закони розподілу величин з вхідного інформаційного масиву та характеристики цих законів. Виявлено, що показники механічних властивостей сталі ВСтЗпс підпорядковуються нормальному закону розподілу [102 в 6] і характеризуються математичним сподіванням і дисперсією.

Середнє значення випадкової величини (математичне сподівання), наприклад, для тимчасового опору σ_{σ} , позначається як $\overline{\sigma_{\sigma}}$ і визначається за формулою

$$\overline{\sigma_{\sigma}} = \sum_{i=1}^{i=k} \sigma_{\sigma i} \frac{m_i}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=k} \sigma_{\sigma i} m_i = \sum_{i=1}^{i=k} \sigma_{\sigma i} p_i \quad , \quad (2.2)$$

де n – загальна величина вибірки;

m_i – кількість значень $\sigma_{\sigma i}$ в загальній вибірці n ;

$p = m_i/n$ – частота появи значення $\sigma_{\sigma i}$ в загальній вибірці n .

В якості кількісної характеристики розподілу випадкової величини, крім математичного сподівання, використовують дисперсію D і середнє квадратичне відхилення S .

$$D = \sum_{i=1}^k (\sigma_{ei} - \bar{\sigma}_e)^2 p_i, \quad (2.3)$$

$$S = \sqrt{D}. \quad (2.4)$$

Для нормального закону розподіл механічних властивостей конструкційних матеріалів поданий на рис. 2.20,а.

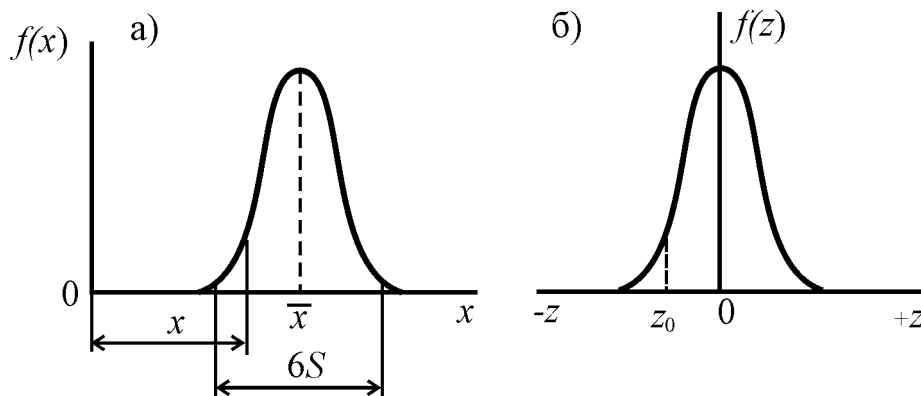


Рисунок 2.20 – Криві нормального розподілу механічних властивостей конструкційних матеріалів

На ділянці $6S$ знаходиться понад 99% всіх результатів з партії розміром n . Якщо припустити $S=1$ і перенести криву на \bar{x} вліво, тобто розмістити симетрично відносно початку координат, то отримують нормовану і центровану функцію розподілу (рис. 2.20, б), яка описується залежністю

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2g}} e^{-z^2/2}. \quad (2.5)$$

Імовірність появи величини $z < z_0$ визначається таким чином:

$$\Phi(z_0) = \int_{-\infty}^{z_0} f(z) dz = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{z_0} e^{-z^2/2} dz. \quad (2.6)$$

Дисперсія визначається за формулою

$$D = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \bar{x})^2 f(x) dx. \quad (2.7)$$

Якщо міцність зварного з'єднання і основного матеріалу мають розсіювання (криві 1 і 2 на рис. 2.21), то звичайна оцінка нерівноміцності зварного з'єднання за співвідношенням $\eta = \sigma'_e / \sigma_e \leq 1$ не враховує величини розсіювання.

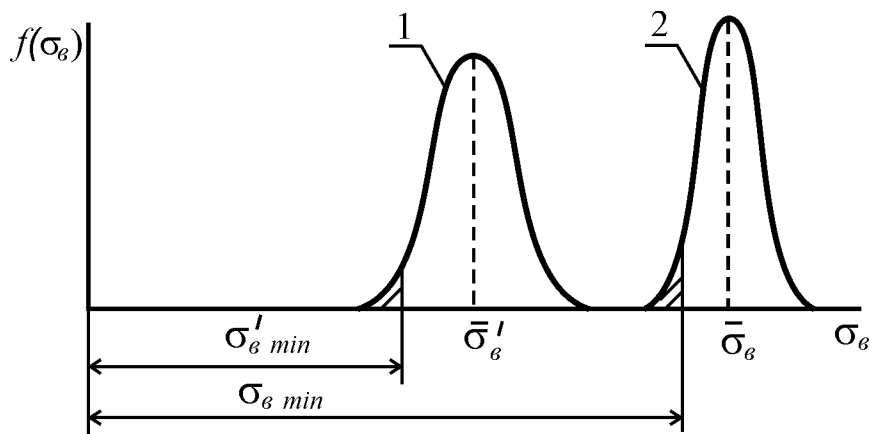


Рисунок 2.21 – Криві розсіювання тимчасового опору для зварного з'єднання (1) та для основного металу (2)

Якщо за основу порівняння взяти рівну ймовірність руйнування, що означає рівність заштрихованих ділянок на рис. 2.21, то нерівноміцність повинна оцінюватися відношенням $\eta = \sigma'_{e \min} / \sigma_{e \min} \leq 1$. Різній ймовірності руйнування буде відповідати різний коефіцієнт нерівноміцності. Для усунення

такої невизначеності доцільно користуватися стандартним відхиленням, а саме $3S$.

Тоді нерівноміцність

$$\eta = \bar{\sigma}'_e - 3S_{звар.з} / (\bar{\sigma}_e - 3S_{осн.м}). \quad (2.8)$$

За таким методом оцінки рівноміцність, зазвичай, буває більшою, ніж при оцінці її за середнім значенням, оскільки $3S_{звар.з} \geq 3S_{осн.м}$. Очевидно, що рівень міцності й надійності конструктивного елемента залежить від кількості слабких ланок в ньому.

Для отримання коректних вхідних інформаційних масивів для комп'ютерного моделюючого експерименту передбачено виконання натурних досліджень не лише матеріалів та їх зварних з'єднань, але й зразків фізичної моделі ферми. Важливим на цьому етапі дослідження є використання сучасного сертифікованого випробувального устаткування та прикладного програмного забезпечення для керування натурним експериментом і опрацювання отриманої первинної інформації.

2.6 Оцінювання достовірності результатів натурних досліджень (6)

Попередня обробка результатів випробувань передбачає виявлення в інформаційних масивах помилкових даних, які випадають із загального закону розподілу досліджуваної характеристики. Тому перед остаточною математичною обробкою масивів, інформацію перевіряють на наявність випадкових даних.

Якщо закон розподілу невідомий, перевірку як крайніх, так і інші суміжних точок на їхню приналежність до вибірки здійснено за критерієм Ірвіна (критерій λ). Для цього отримані значення x_i результатів випробувань записано в ряд $x_1,$

x_2, x_3, \dots, x_n в порядку збільшення значень x (варіаційний ряд). Фактичне (розрахункове) значення критерію λ_p визначено за рівнянням для суміжних точок x_n та x_{n-1}

$$\lambda_p = \frac{x_n - x_{n-1}}{S} \quad (2.9)$$

де x_n – сумнівне значення x ;

x_{n-1} – наступне від краю значення x .

S – оцінка середнього квадратичного відхилення значень x_i , визначена за формулою

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}, \quad (2.10)$$

де

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}; \quad (2.11)$$

При цьому має бути дотримана умова $\lambda_p < \lambda_T$, де λ_T – теоретичне значення критерію Ірвіна λ . Для обсягу інформації $n=5$ при довірчій імовірності $\gamma=0,95$ (див. табл. 3.5) $\lambda_T = 1,1$.

Варто зазначити, що для отриманого експериментального значення x_i розрахункове значення критерію Ірвіна буде $\lambda_p < 1,1$, то таке значення залишено, в іншому випадку – виключено з подальшого розгляду.

Перевірку узгодженості дослідного і теоретичного закону розподілу випадкової величини (межі текучості, твердості) виконано за критерієм Пірсона χ^2 згідно з вказівками п. 3.

2.7 Висновки до розділу 2

1. Виявлено, що для дослідження міцності й деформівності повномасштабної зварної прямокутної ферми при дії силових і температурних впливів з високою вірогідність отриманих результатів доцільно виконати комплексні дослідження, поєднуючи натурний, напівнатурним і комп'ютерний моделюючий експерименти.

2. Використання програми Ansys для компютерного моделюючого експерименту при дії силових і температурних впливів дозволяє нам отримати результати з високою вірогідністю по підношенню до фактичних експлуатаційних показників, оскільки метод скінчених елементів має ряд переваг в порівнянні з іншими програмними пакетами такого типу.

3. Для раціонального вибору параметрів скінчено-елементної моделі повномасштабної зварної ферми доцільно розробити фізичну модель конструкції з дотриманням нормативних вимог ідентифікації та подібності, виконати для цієї моделі напівнатурним і комп'ютерний моделюючий експерименти. Верифікація отриманих результатів і буде свідченням правильного вибору параметрів моделювання.

4. Для максимального наближення результатів комп'ютерного моделюючого експерименту до фактичних експлуатаційних параметрів повномасштабної ферми необхідно сформувати вхідний інформаційний масив для моделювання на підставі фактичних показників міцності матеріалу ферми як при кімнатній температурі, так і при підвищених її значеннях аж до рівня пожежних умов.

РОЗДІЛ 3

МІЦНІСТЬ І ДЕФОРМІВНІСТЬ ФІЗИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ЗВАРНОЇ ФЕРМИ ПРИ ТЕРМОСИЛОВИХ ВПЛИВАХ

3.1 Фізико-механічні аспекти впливу температури на міцність і деформівність зварної ферми

Міцність і деформівність зварних ферм формується при поєднання багатьох чинників (рис. 3.1). У кожному конкретному випадку якісь з них стають визначальними, а якісь маловпливовими чи навіть зовсім відсутніми. Для власних досліджень визначальними чинниками прийнято дію статичного навантаження і температурний вплив.

Механічні властивості сталі змінюються залежно від його температури. При отриманні зварних конструкцій метал нагрівають до високих температур за короткий час. Механічні характеристики металу при високих температурах не можна вважати повністю дослідженими. Детальніше вивчені закономірності зміни механічних характеристик сталі звичайної якості в області пружних деформацій. Очевидною є здатність конструкційних сталей розм'якшуватися при нагріванні і відновлювати свої фізико-механічні властивості після охолодження. Така властивість дає можливість отримувати вироби куванням, гарячим вальцюванням, гарячим штампуванням. Проте ця перевага металів стає недоліком у тому випадку, коли тепло впливає на виконані з них конструкції. Тому при пожежі металеві конструкції внаслідок нагрівання, втрачають міцність, деформуються й руйнуються.

Особливістю формування параметрів НДС в зварних фермах є ще й температурні деформації окремих конструктивних елементів, які зварені між собою в стержневу конструкцію. При цьому в самих стержнях і місцях їх з'єднань (вузлах ферми) виникають внутрішні напруження, які в поєднанні з напруженнями від зовнішніх навантажень знижують тримкість ферми.

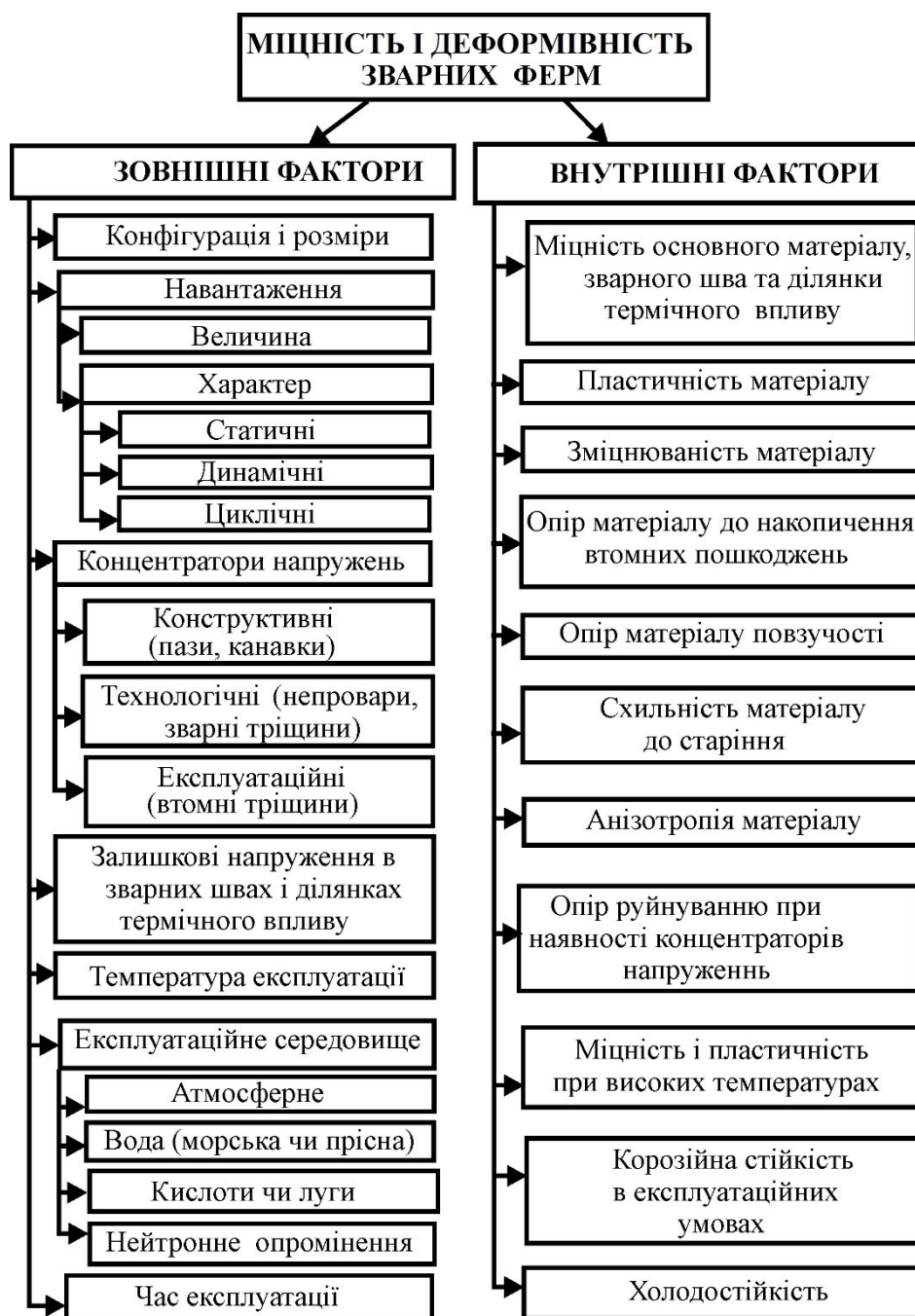


Рисунок 3.1 – Фактори впливу на міцність і деформівність зварних ферм

Для виявлення поведінки навантажених сталевих зварних ферм та інших металевих і залізо-бетонних будівельних конструкцій при підвищеній температурі, в т.ч. і при пожежі, необхідно знати характер зміни фізико-механічних властивостей сталей в умовах дії високих температур.

Виявити особливості поведінки зварної ферми з врахуванням всіх факторів впливу, використовуючи класичні аналітичні підходи, не вдається.

Найоб'єктивніші результати можна отримати при використанні натурних експериментів на повномасштабних моделях. Однак для фермових конструкцій це надзвичайно матеріально-, енерго- і трудозатратно. Тому в роботі буде виконано напівнатурні дослідження на масштабних моделях зварної ферми та комп'ютерне моделювання для виявлення міцності і деформівності зварної прямокутної ферми при дії силових і температурних впливів.

3.2 Умови забезпечення точності результатів комп'ютерного моделюючого експерименту

Для досягнення високого ступеня співпадіння результатів комп'ютерного моделюючого експерименту з реальними експлуатаційними показниками зварної прямокутної ферми необхідно забезпечити максимальну ідентифікацію конструкції ферми, схем її базування і навантажування, характеру силових і температурних впливів, властивостей матеріалу. Проблемним з цього переліку для моделювання є формування інформаційної бази властивостей матеріалу.

Отримати показники міцності для сталі ВСтЗпс з загальновідомих джерел можна з ДСТУ 380-2005 та з сертифікату якості заводу-виробника металопрокату.

За основу для визначення показників міцності і пластичності сталі ВСтЗпс взято ДСТУ 380-2005, а саме межа міцності 370...490 МПа (розсіювання 27,9%), межа текучості 205...255 МПа (розсіювання 21,7%), відносне видовження 22...26% (розсіювання 16,7%).

За сертифікатами якості заводів-постачальників металопрокату вказані вище показники будуть відповідно в межах 400...460 МПа (розсіювання 14,0%), 282...330 МПа (розсіювання 15,6%), 32...40% (розсіювання 22,2%).

Для порівняння описані результати зведено в табл. 3.1...3.3.

Таблиця 3.1

Межа міцності сталі ВСт3пс, отримана з різних інформаційних джерел

Джерело інформації	Діапазон значень, МПа	Математичне сподівання, МПа	Розсіювання значень	
			Абсолютне, МПа	Відносне, %
ДСТУ	370...490	430	120	27,9
Сертифікати якості	400...460	430	60	14

Таблиця 3.2

Межа текучості сталі ВСт3пс, отримана з різних інформаційних джерел

Джерело інформації	Діапазон значень, МПа	Математичне сподівання, МПа	Розсіювання значень	
			Абсолютне, МПа	Відносне, %
ДСТУ	205...255	230	50	21,7
Сертифікати якості	282...330	306	48	15,6

Таблиця 3.3

Відносне видовження при розтягуванні сталі ВСт3пс,
отримане з різних інформаційних джерел

Джерело інформації	Діапазон значень, %	Математичне сподівання, %	Розсіювання значень	
			Абсолютне, %	Відносне, %
ДСТУ	22...26	24	4	16,7
Сертифікати якості	32...40	36	8	22,2

Показники міцності й пластичності сталі ВСт3пс вводять в якості вхідної інформаційної бази для комп'ютерного моделюючого експерименту. Зрозуміло, що чим меншим буде розсіювання цих показників, тим вищою буде достовірність результатів моделювання. Проаналізувавши інформацію табл.

3.1...3.3, зроблено висновок, що при розсіюванні цих показників в межах 14...27,9% отримати достовірність результатів комп'ютерного моделюючого експерименту понад 90% неможливо. Для мінімізації розсіювання цих показників необхідно їх визначити на підставі натурального експерименту.

3.3 Розробка статистичних планів для натурального дослідження механічних характеристик сталі ВСтЗпс (23)

Метою розробки статистичних планів натурних випробувань для виявлення показників міцності конструкційної сталі ВСтЗпс є визначення мінімальної кількості зразків для отримання результатів з достатньою точністю і вірогідністю. Методи планування і обробки результатів випробувань регламентуються системою стандартів „Надійність в техніці”. Науково-методичний підхід і рекомендації з раціонального планування випробувань згідно з цим документом можуть бути використані для випробувань стандартних зразків зі сталі ВСтЗпс для формування вхідного інформаційного забезпечення комп'ютерної моделі зварної прямокутної ферми.

Вихідними даними для розрахунку мінімального об'єму спостережень є:

– довірча ймовірність γ для оцінки відповідного показника. Довірчу ймовірність рекомендовано вибрати з ряду 0,8; 0,9; 0,95; 0,99;

– гранична відносна похибка δ оцінки відповідного показника, яка є мірою точності цієї оцінки

$$\delta = \max\left(\frac{A - A_n}{A}, \frac{A_g - A}{A}\right) \quad (3.1)$$

де A – оцінка показника;

A_n – нижня межа одностороннього довірчого інтервалу;

A_g – верхня межа одностороннього довірчого інтервалу (граничну відносну похибку рекомендовано вибрати з ряду 0,05; 0,1; 0,15; 0,2);

– передбачуваний коефіцієнт варіації v .

Виходячи з досліджень інших авторів [55-60], розподіл результатів пошкоджуваності для розглядуваного типу конструкцій і режимів навантажень підпорядковується нормальному закону. Оскільки для нормального закону розподілу коефіцієнт варіації показників не повинен перевищувати $0,3 \dots 0,4$, то для визначення мінімальної кількості зразків для дослідження приймаємо значення $v = 0,1$.

Мінімальну кількість зразків для випробувань визначають за табл. 3.5, отриманої за рекомендаціями [62].

Для дослідження прийнято мінімально допустиму кількість зразків $n=5$ штук, що задовольняє умови (табл. 3.4), а саме гранична відносна похибка $\delta=0,1$; довірча ймовірність $\gamma=0,95$; передбачуваний коефіцієнт варіації $v=0,1$.

Таблиця 3.4 – Мінімальна кількість зразків n для випробувань в залежності від граничної відносної похибки δ і довірчої ймовірності γ [123]

δ	γ	Мінімальна кількість зразків n при						
		$v=0,1$	$v=0,2$	$v=0,3$	$v=0,4$	$v=0,6$	$v=0,8$	$v=1$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,05	0,9	8	25	65	100	250	500	650
	0,95	13	40	100	150	400	650	1000
0,1	0,8	-	5	10	13	32	50	100
	0,9	3	8	15	32	65	125	300
	0,95	5	13	25	50	100	200	400
0,15	0,8	-	3	5	6	15	25	40
	0,9	-	4	8	15	32	65	80
	0,95	3	6	13	25	50	100	150

Примітка. Знак „-” вказує, що кількість зразків $n < 3$.

3.4 Натурні дослідження характеристик міцності матеріалу для виготовлення зварних ферм

3.4.1 Показники міцності сталі ВСт3пс при кімнатній температурі

Досліджувана зварна ферма виготовлена зі сталі ВСт3сп. Вона оптимально поєднує механічні властивості, зварюваність і ціну й, зазвичай, задовольняє конструктивні, технологічні й експлуатаційні вимоги до зварних фермових конструкцій.

Одним з ключових чинників, що забезпечують точність розрахунку типової зварної ферми, є фактичні показники міцності матеріалу. Якщо припустити, що експлуатація конструкцій відбувається в межах пружних деформацій, то таким показником є межа текучості матеріалу.

Для оцінювання умов настання граничного стану на межі руйнування конструкції визначальним показником міцності буде межа міцності матеріалу.

Визначення показників міцності сталі ВСт3пс виконано за результатами випробувань на статичний розтяг стандартних зразків, виготовлених з металопрокату однієї поставочної партії матеріалу, передбаченого для виготовлення зварних ферм.

Для формування вхідної інформаційної бази властивостей матеріалу виконано серію натурних експериментів по визначенню межі текучості й межі міцності сталі ВСт3сп за стандартизованими методиками [77] на сертифікованому випробувальному комплексі СТМ-100 (див розділ 2).

Для натурального експерименту використано стандартні плоскі зразки [78] (рис. 3.1).

Заготовки для зразків вирізані з кутникового металопрокату 20x20x3 мм зі сталі ВСт3пс вздовж напрямку вальцювання (рис. 3.3). Саме такий профіль використано для виготовлення фізичної моделі 600x120 зварної ферми (див. п. 2.3.1), яку буде досліджено напівнатурним експериментом.

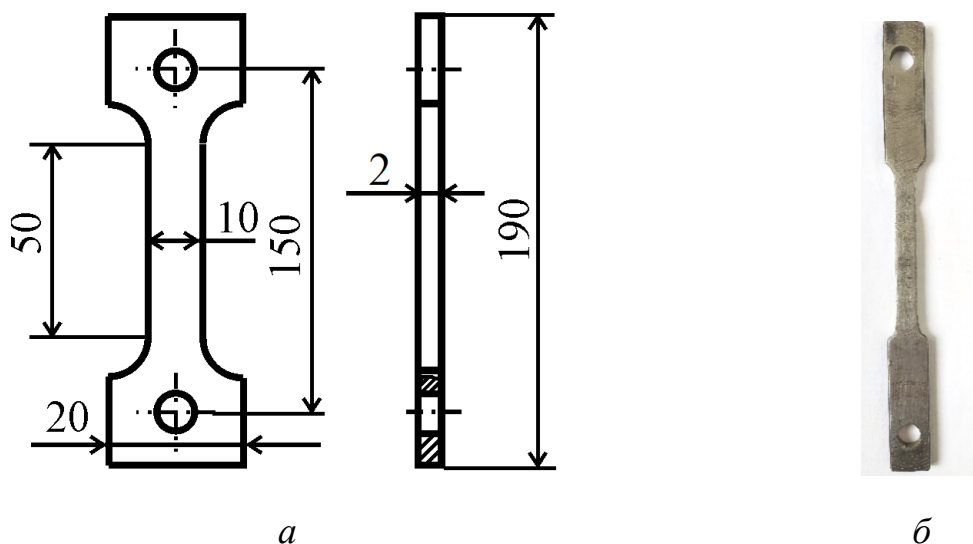


Рисунок 3.2 – Стандартний зразок для експериментального визначення показників міцності сталі ВСтЗсп за статичного розтягу

а – креслення; *б* – фото

Інформацію про миттєві зусилля під час навантаження зразків було отримано від динамометра (поз. 6 на рис. 2.8), а дані про деформацію – від накладного тензOMETричного датчика 1, закріпленого на зразку 4 за допомогою опорних ножів 2 з пружинними затискачами 3 (рис. 3.4).

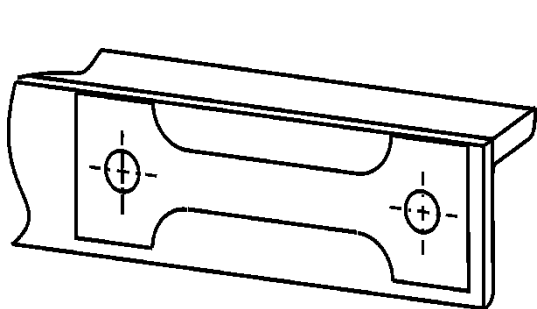


Рисунок 3.3 – Схема вирізки зразків з кутникового металопрокату

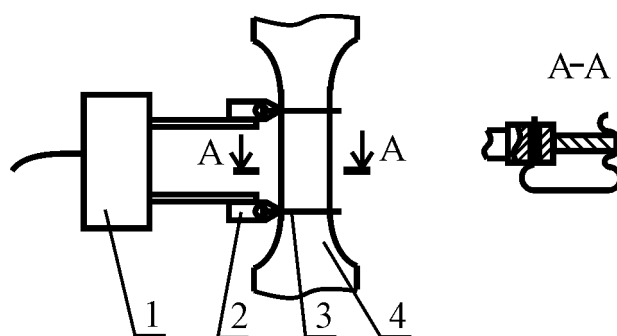


Рисунок 3.4 – Схема встановлення тензодавача для визначення поздовжньої деформації зразка

На статичну міцність при розтягуванні досліджено 5 зразів з суцільного матеріалу згідно статистичних планів випробувань. Зразки отримано з 6

метрового кутникового металопрокату сталі ВСтЗпс з трьох різних ділянок: центральна частина довжини, крайня частина кутника, четвертинна ділянка довжини.

Результати випробувань подано в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 – Механічні властивості сталі ВСтЗпс при розтягові за результатами натурних досліджень суцільних зразків

Показники міцності	Номер зразка				
	1	2	3	4	5
Межа текучості σ_T , МПа	274	276	269	271	275
Межа міцності σ_B , МПа	382	384	376	381	377

Отримані експериментальні результати підлягають статистичній обробці для виявлення закону їх розподілу та на приналежність крайніх значень вибірки до цього закону.

3.4.2 Статистичні характеристики розсіювання механічних властивостей сталі ВСтЗпс

Статистичну обробку результатів експериментів виконано згідно з стандартизованими методиками [67].

Результати випробувань на розтяг і твердість зразків, виготовлених з мірного куска сталюого кутникового металопрокату, розглянуто як малі вибірки.

Для впорядкування вибірки результатів визначення межі текучості, поданих в табл. 3.5, розраховано вибіркоче середнє значення

$$\bar{\sigma}_T^p = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sigma_{Ti}^p = 1365 / 5 = 273 \text{ МПа}, \quad (3.2)$$

і вибіркоче середнє квадратичне відхилення

$$S_{\sigma_T^P} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\bar{\sigma}_T^P - \sigma_{T_i}^P)^2} = \sqrt{\frac{1}{5-1} \cdot 34} = 2,92 \text{ МПа.} \quad (3.3)$$

На приналежність крайніх членів вибірки $\sigma_{T_1}^P = 269$ МПа та $\sigma_{T_{21}}^P = 276$ МПа до даної нормальної сукупності вказує перевірка:

$$U_1 = \frac{\bar{\sigma}_T^P - \sigma_{T_1}^P}{S_{\sigma_T^P}} = (273-269)/2,92=1,37 < \beta_\gamma=3,152 \quad (3.4)$$

$$U_{21} = \frac{\sigma_{T_{21}}^P - \bar{\sigma}_T^P}{S_{\sigma_T^P}} = (276-273)/2,92=1,03 < \beta_\gamma=3,152, \quad (3.5)$$

де β_γ отримано з табл. 3.5 [71] для об'єму вибірки $n=5$ і рівня довірчої імовірності $\gamma=0,9$.

Перевірка узгодженості дослідного і теоретичного закону розподілу випадкової величини межі текучості за критерієм Пірсона χ^2 виконано згідно з вказівками п.3 [72]. Перевірка підтвердила задовільне узгодження дослідного й теоретичного розподілу та доцільність апроксимації фактичних розподілів кривими Гауса (нормальний закон розподілу). Отримані відхилення пояснюються впливом випадкових помилок вимірювання, які, як відомо, також підпорядковуються нормальному розподілу.

За залежностями (2.3) і (2.4) визначено дисперсію для межі текучості. Аналогічні розрахунки статистичних характеристик механічних властивостей за експериментально отриманими показниками виконано для границі міцності сталі ВСт3пс.

Статистичні характеристики механічних властивостей сталі ВСтЗпс за результатами натурних експериментальних досліджень зведено в табл. 3.6.

Таблиця 3.6 – Статистичні характеристики розсіювання показників міцності при розтягові сталі ВСтЗпс за результатами натурних досліджень

Показники міцності	Статистичні характеристики		
	Вибіркове середнє значення	Вибіркове середнє квадратичне відхилення	Дисперсія
Межа міцності	$\bar{\sigma}_e = 380$ МПа	$S_{\sigma_b} = 3,39$ МПа	$D_{\sigma_b} = 11,5$ МПа ²
Межа текучості	$\bar{\sigma}_T = 273$ МПа	$S_{\sigma_T} = 2,92$ МПа	$D_{\sigma_T} = 8,53$ МПа ²

Розсіювання значень для межі міцності становить 2,1%, а для межі текучості 2,6%. Очевидно, що це суттєво кращі показники, ніж за інформацією з ДСТУ чи сертифікатів якості металопрокату. Використовуючи таку вхідну інформаційну базу, можна отримати досить високу вірогідність результатів комп'ютерного моделюючого експерименту.

3.4.3 Показники міцності сталі ВСтЗпс при підвищеній температурі

Дослідження показників міцності сталі ВСтЗпс при підвищеній температурі виконано на стандартних зразках (рис. 3.2), встановлених в термокамеру (рис. 3.5), на випробувальному комплексі СТМ-100.

Температурний діапазон для натурного експерименту прийнято від 100 °С до 450 °С з кроком 50 °С. Для кожної з температурних точок використано 3 зразки. Для всього температурного діапазону використано 24 зразки.

Отримано значення межі текучості й межі міцності для кожного зразка в кожній температурній точці. Виконано статистичне опрацювання

експериментально отриманої чисельної бази результатів, аналогічно по попереднього пункту.

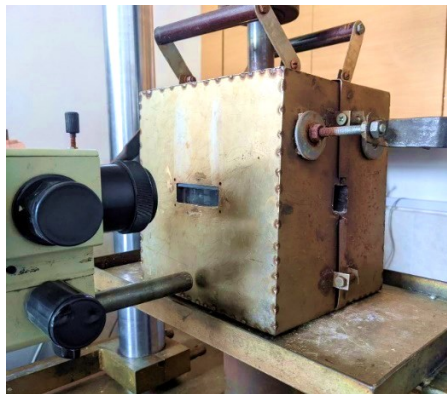


Рисунок 3.5 – Термокамера випробувального комплексу СТМ-100 для визначення показників міцності сталі ВСтЗпс при підвищеній температурі

Виявлено, що результати досліджень підпорядковуються нормальному закону розподілу. В табл. 3.7 подано вибіркове середнє значення межі текучості й межі міцності в кожній температурній точці.

Таблиця 3.7 – Характеристики міцності сталі ВСтЗпс при підвищеній температурі

Температура, °С	Вибіркове середнє значення	
	Межі міцності, $\bar{\sigma}_s$, МПа	Межі текучості, $\bar{\sigma}_T$, МПа
20	380	273
100	372	252
150	362	246
200	334	228
250	315	215
300	292	192
350	278	185
400	265	174
450	247	165

Для формування якісної картини про вплив температури на показники міцності результати досліджень подано у вигляді графіків (рис. 3.6 для межі міцності і 3.7 для межі текучості).

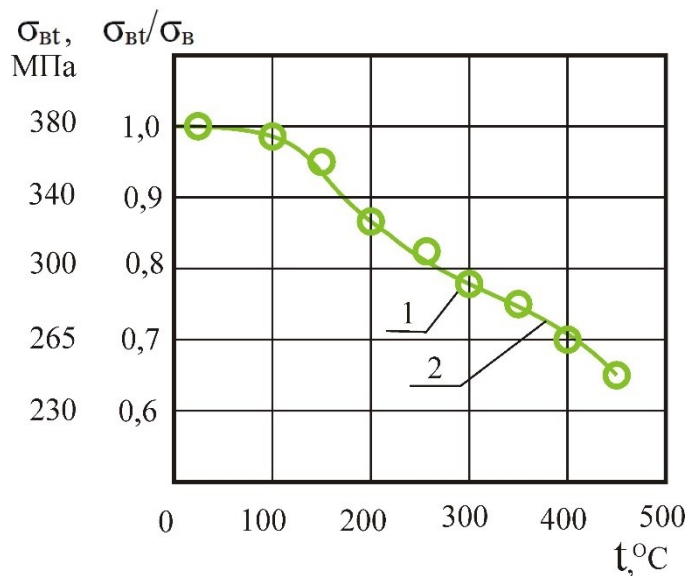


Рисунок 3.6 – Зміна межі міцності $\sigma_{в}$ сталі ВСт3пс при нагріванні:

1 – за результатами натурних випробувань; 2 – за результатами лінійної апроксимації експериментальних даних

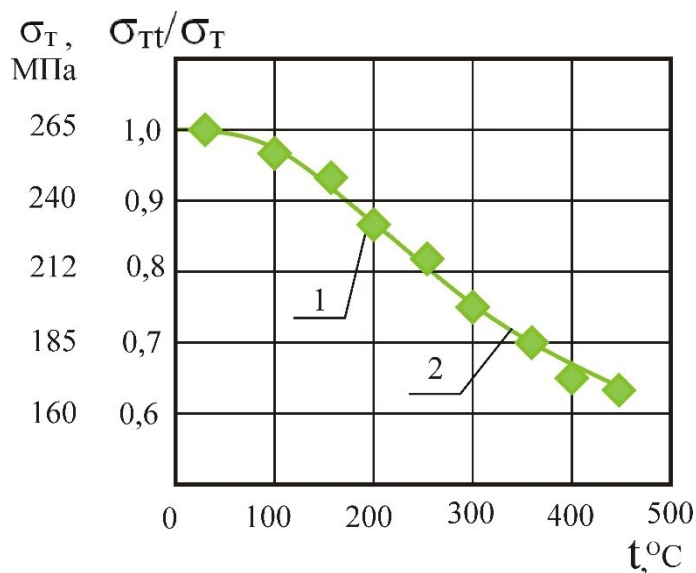


Рисунок 3.7 – Зміна межі текучості $\sigma_{т}$ сталі ВСт3пс при нагріванні:

1 – за результатами натурних випробувань; 2 – за результатами лінійної апроксимації експериментальних даних

На графіках вибіркові середні значення досліджуваних величин, які визначено за результатами статистичного опрацювання експериментальних даних, прийнято як дійсні значення і тому в їх позначеннях тут і надалі не використовується символіка, прийнята для вибірових середніх значень.

Для порівняння властивостей сталі ВСтЗпс при кімнатній температурі й при підвищеній температурі на рис. 3.6 і 3.7 вздовж осі ординат поруч з абсолютними значеннями показників міцності подано відносне значення цих величин, тобто $\sigma_{вt}/\sigma_{в}$ – це співвідношення межі міцності при конкретній підвищеній температурі й межі міцності при кімнатній температурі. Аналогічно подано $\sigma_{тt}/\sigma_{т}$ для межі текучості.

Отримані результати досліджень матеріалу зварної ферми буде використано в якості вхідних параметрів для комп'ютерного моделювання поведінки досліджуваної конструкції при дії силових і температурних впливів.

3.5 Міцність і деформівність фізичної моделі 600x120 зварної ферми при навантажуванні

3.5.1 Натурні силові дослідження фізичної моделі 600x120

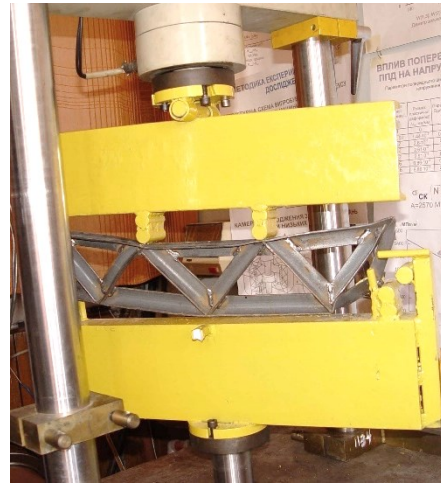
Для досягнення високих показників достовірності при комп'ютерному моделюючому експерименті для повномасштабної ферми необхідно правильно вибрати параметри скінченно-елементної моделі досліджуваної конструкції. Для досягнення цього прийнято рішення виконати натурний і комп'ютерний моделюючий експерименти для фізичної моделі 600x120 мм в межах технологічних можливостей наявного випробувального устаткування з наступним порівнянням результатів. При задовільному співпаданні отриманих результатів використані параметри скінченно-елементної моделі можна буде адаптувати для виявлення параметрів деформування повномасштабної ферми при її навантажуванні аж до руйнування.

Для натурних досліджень використано серію зразків, виготовлених згідно розробленої конструкції для фізичної моделі 600x120 мм прямокутної зварної ферми (рис. 2.4).

Експериментальні зразки встановлювались на пристосуванні [66](рис. 3.8) і навантажувались статичними зусиллями аж до руйнування.



a



б

Рис. 3.8 – Зразок зварної ферми на випробувальному комплексі СТМ-100 перед навантаженням (*a*) та після руйнування (*б*)

Натурними випробуваннями при дії статичних навантажень досліджено поведінку 5 вище описаних експериментальних зразків (рис. 2.4).

Отримано інформаційну базу даних з результатами натурального експерименту. Обчислено усереднене значення експериментальних значень деформацій. Перевірено на приналежність до вибірки всіх отриманих експериментальних значень за методикою, описаною в розділі 2. Результати досліджень подано в табл. 3.8.

За результатами натурального експерименту (табл. 3.8) побудовано діаграму деформування досліджуваних зразків фізичної моделі 600x120 прямокутної зварної ферми (рис. 3.9). Проаналізовано динаміку деформування зразків при збільшенні навантаження.

Таблиця 3.8 – Значення деформацій фізичної моделі зварної ферми при різних навантаженнях за результатами напівнатурного експерименту

Навантаження P , кН	Деформація $\delta_{експ}$, мм					Усереднене значення
	Зразок 1	Зразок 2	Зразок 3	Зразок 4	Зразок 5	
6	0,198	0,204	0,210	0,212	0,211	0,207
12	0,420	0,422	0,412	0,402	0,394	0,410
20	0,686	0,696	0,670	0,668	0,655	0,675
25	0,818	0,850	0,848	0,858	0,867	0,842
30	0,998	0,982	0,986	0,994	0,970	0,986
35	1,224	1,214	1,232	1,190	1,250	1,222
40	1,400	1,418	1,396	1,412	1,419	1,409
45	1,716	1,696	1,711	1,722	1,700	1,709
48	1,996	1,988	2,006	2,002	1,958	1,990

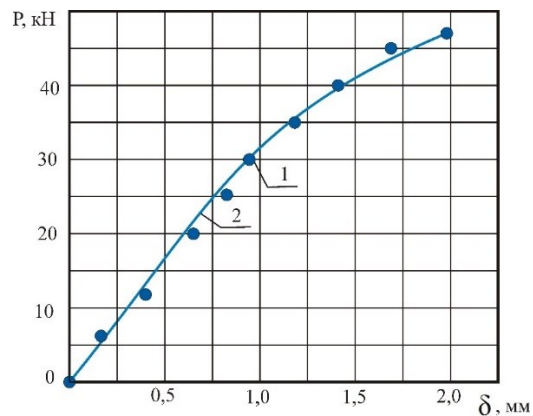


Рисунок 3.9 – Діаграма деформування фізичної моделі зварної ферми 600x120 за результатами натурного експерименту:

1 – за усередненими експериментальними даними; 2 – за результатами лінійної апроксимації експериментальних даних

На діаграмі очевидними є ділянка лінійного деформування при навантаженні до 30 кН і ділянка з пластичною природою деформування при вищих рівнях навантажень.

3.5.2 Дослідження міцності й деформівності фізичної моделі 600x120 комп'ютерним моделюючим експериментом

Досліджено поведінку фізичної моделі 600x120 прямокутної зварної ферми (рис. 2.4) під дією статичних навантажень згідно прийнятих схем базування і навантажування (див. рис. 2.2) комп'ютерним моделюючим експериментом з використанням прикладного програмного пакету Ansys, який алгоритмічно базується на методі скінчених елементів згідно методики, описаної вище (див. п. 2.4).

Для дослідження у вхідний модуль програми введено інформаційний масив властивостей матеріалу ферми, а саме сталі ВСтЗпс:

- 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 (рис. 3.15);
- геометричні параметри зварних швів;
- властивості металу зварного шва [2].

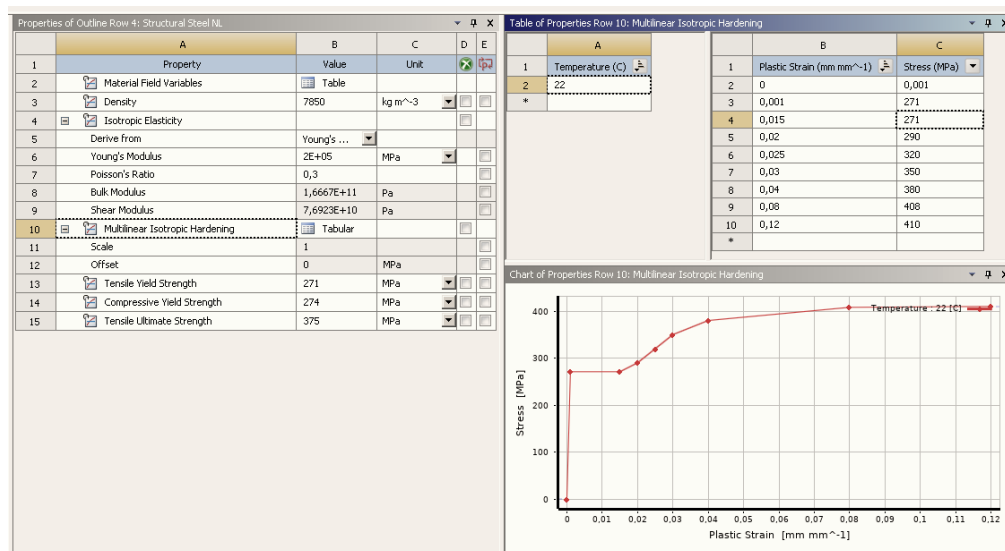


Рисунок 3.10 – Меню Engineering Data із заданими характеристиками сталі ВСтЗпс

За результатами виконання комп'ютерного моделюючого експерименту отримано значення деформації нижнього пояса ферми вздовж вертикальної осі зразка $\delta_{\text{кме}}$ в залежності від рівня навантаження P на ферму (табл. 3.9).

Таблиця 3.9 – Значення деформацій нижнього пояса фізичної моделі 600x120 зварної ферми при різних навантаженнях за результатами комп'ютерного моделюючого експерименту

Навантаження P , кН	6	12	20	25	30	35	40	45	48
Деформація $\delta_{\text{кме}}$, мм	0,210	0,418	0,691	0,868	1,021	1,288	1,511	1,878	2,220

Отримано візуалізовану картину поведінки ферми при навантаженнях на рівні граничного стану (рис. 3.11) та при навантаженнях, які перевищують допустимі значення, тобто після втрати фермою поперечної стійкості (рис. 3.12).

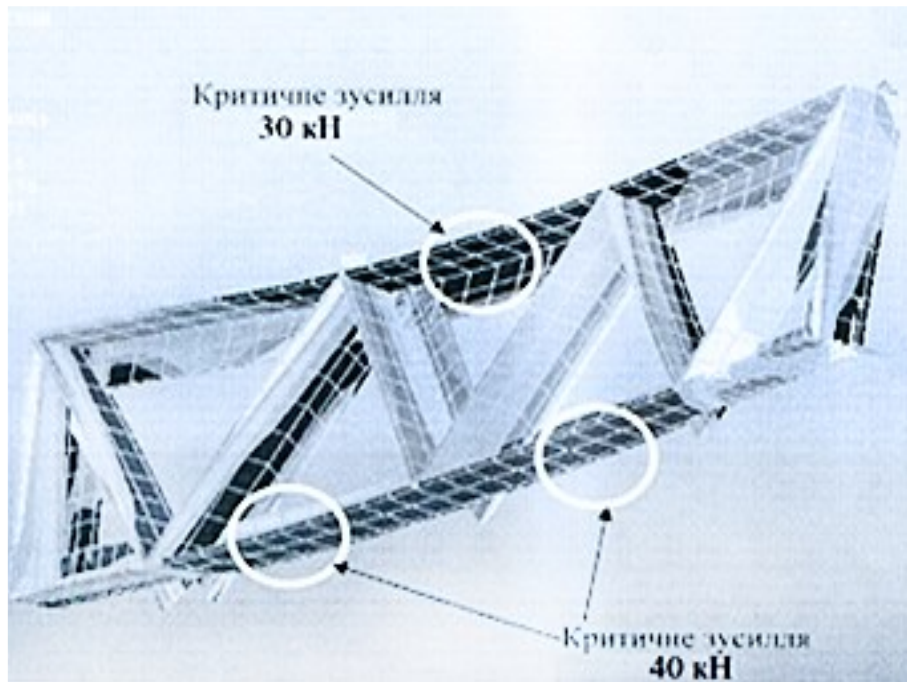


Рисунок 3.11 – Візуалізація поведінки фізичної моделі 600x120 зварної ферми за результатами комп'ютерного моделюючого експерименту при навантаженнях на рівні граничного стану



Рисунок 3.12 – Візуалізація поведінки фізичної моделі 600x120 зварної ферми за результатами комп'ютерного моделюючого експерименту при навантаженнях після втрати фермою поперечної стійкості

За чисельними результатами комп'ютерного моделюючого експерименту побудовано діаграму деформування зварної ферми 600x120 мм (рис. 3.13).

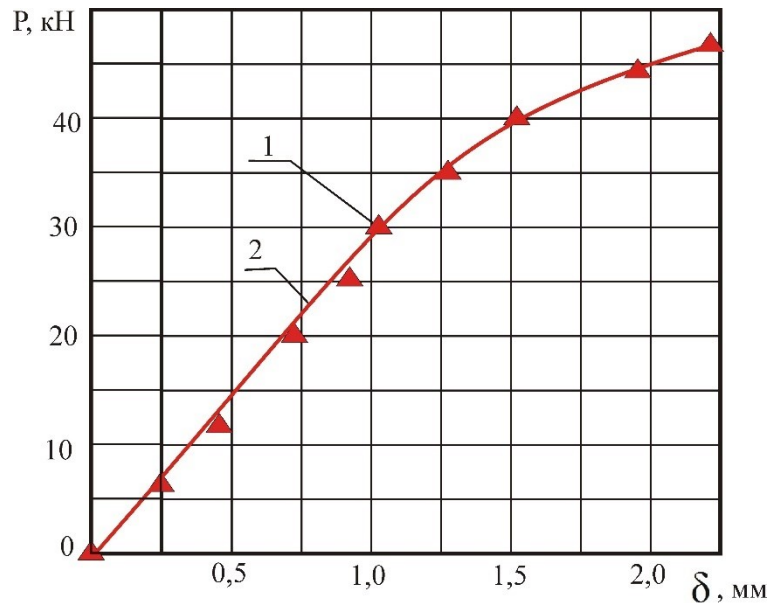


Рисунок 3.13 – Діаграма деформування фізичної моделі зварної ферми 600x120 за результатами комп'ютерного моделюючого експерименту:

1 – за експериментальними даними; 2 – за результатами лінійної апроксимації експериментальних даних

Таким чином, за результатами комп'ютерного моделюючого експерименту виявлено кількісну та якісну картину поведінки фізичної моделі 600x120 мм зварної ферми під дією статичних навантажень.

3.5.3 Виявлення достовірності результатів комп'ютерного моделюючого експерименту при навантажуванні фізичної моделі 600x120 зварної ферми

Використавши результати натурних досліджень для цієї ферми (див. п. 3.4), виконано порівняння чисельних даних за прогином нижнього пояса для виявлення ступеня достовірності отриманих результатів комп'ютерного моделюючого експерименту.

Для візуального порівняння результатів побудовано суміщені діаграми деформування фізичної моделі 600x120 зварної ферми за результатами натурного (лінія А) та комп'ютерного моделюючого експериментів (лінія Б) (рис. 3.14).

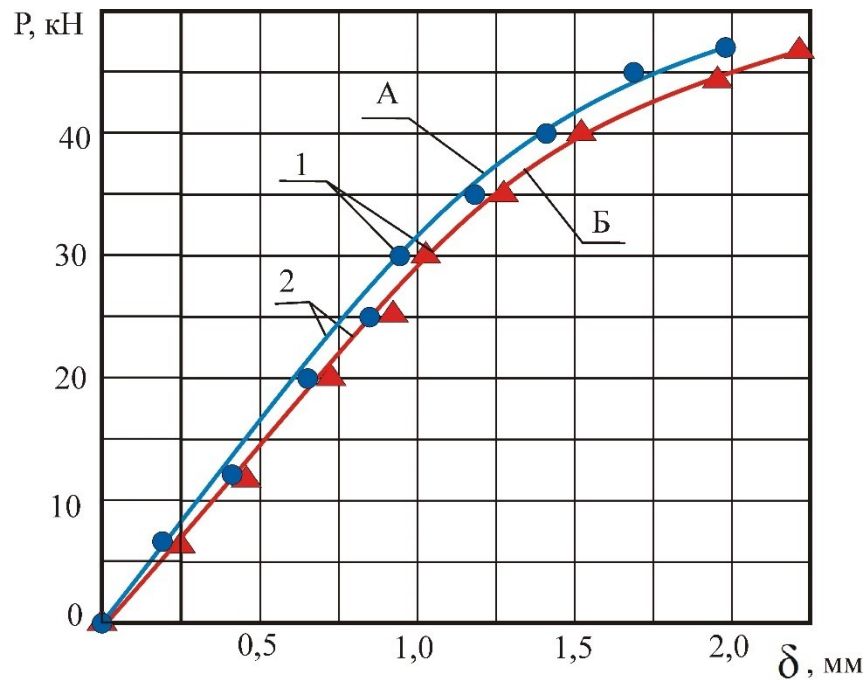


Рисунок 3.14 – Суміщені діаграми деформування фізичної моделі зварної ферми за результатами натурного (лінія А) та комп'ютерного моделюючого (лінія Б) експериментів: 1 – експериментальні значення; 2 – лінійна апроксимація експериментальних даних

При візуальному порівнянні ліній А і Б виявлено, що навантаження, при якому конструкція переходить за межу пружних деформацій практично співпадають для натурного і комп'ютерного моделюючого експериментів і становить 30 кН.

Виконано верифікацію результатів комп'ютерного моделюючого експерименту шляхом їх порівняння з дійсними значеннями деформацій, отриманими натурним силовим експериментом на фізичній моделі 600x120 зварної ферми (табл. 3.10).

Таблиця 3.10 – Порівняння величини деформації зварної ферми 600x120 при статичному навантаженні за результатами комп'ютерного моделюючого $\delta_{кме}$ та натурального $\delta_{експ}$ експериментів

Показники	Навантаження, P , кН								
	6	12	20	25	30	35	40	45	48
Деформація $\delta_{кме}$, мм	0,210	0,418	0,691	0,868	1,021	1,288	1,511	1,878	2,220
Деформація $\delta_{експ}$, мм	0,207	0,410	0,675	0,842	0,986	1,222	1,409	1,709	1,990
Абсолютна похибка моделювання, Δ , мм	0,003	0,008	0,016	0,026	0,035	0,066	0,102	0,169	0,230
Відносна похибка моделювання, μ	0,014	0,020	0,026	0,031	0,306	0,054	0,072	0,099	0,116
Ступінь співпадання, C	0,986	0,980	0,976	0,969	0,964	0,946	0,928	0,901	0,884

Абсолютну похибку комп'ютерного моделювання Δ визначали за залежністю

$$\Delta = |\delta_{експ} - \delta_{кме}|, \text{ мм} \quad (3.6),$$

де $\delta_{кме}$ – деформація ферми за результатів комп'ютерного моделюючого експерименту (табл. 3.9);

$\delta_{експ}$ – усереднена фактична деформація, отримана натурним дослідженням ферми на п'яти зразках ферми (табл. 3.8)

Відносну похибку комп'ютерного моделювання μ визначали за залежністю

$$\mu = \left| \delta_{експ} - \delta_{кме} \right| / \delta_{експ} \quad (3.7)$$

Ступінь співпадання C деформації ферми за результатів комп'ютерного моделюючого експерименту $\delta_{кме}$ по відношенню до усередненої фактичної деформації $\delta_{експ}$, отриманої натурним дослідженням ферми п'яти зразків ферми визначали за залежністю (3.8):

$$C = 1 - \left| \delta_{експ} - \delta_{кме} \right| / \delta_{експ} \cdot \quad (3.8)$$

Результати обчислень подано в табл. 3.10

Ступінь співпадання результатів комп'ютерного моделюючого експерименту по відношенню до результатів натурального експерименту за величиною деформації середини нижнього поясу зварної ферми 600x120 мм при однакових навантаженнях в графічному вигляді подано на рис. 3.15.

За результатами порівняння і аналізу отриманих чесельних даних очевидним є факт високого ступеня співпадання отриманих результатів при низьких рівнях навантаження і нижчого при високих навантаженнях. Так при навантаженнях в межах пружного діапазону деформування (до 30 кН) відносна похибка моделювання становить до 3%. При появі пластичної деформації відносна похибка збільшується і на момент руйнування конструкції становить 11,6%. Варто зауважити, що це не загрожує неконтрольованому руйнуванню ферми, спроектованої за розглянутими принципами комп'ютерного моделювання, оскільки проєктні показники деформування є вищими за фактичні, виявлені при натурному силовому експерименті (див. рис. 3.14). Тобто для експлуатованої ферми отримується додатковий запас міцності конструкції.

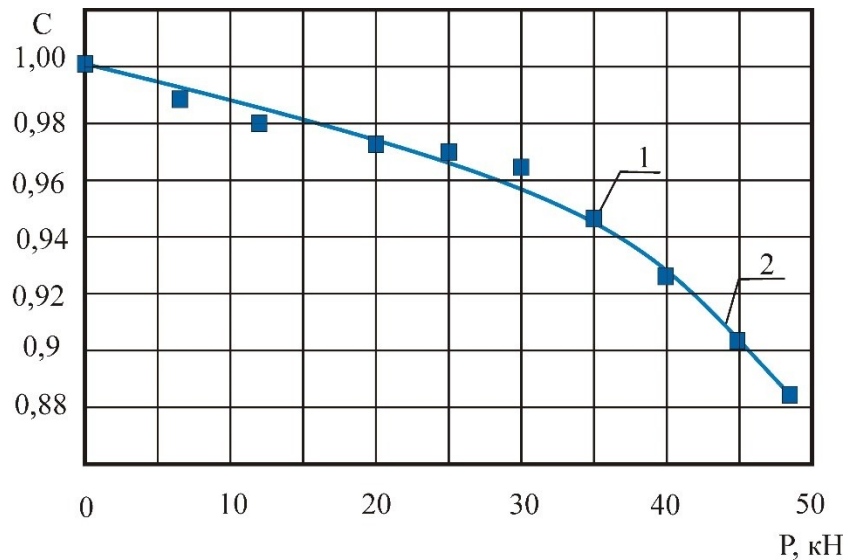


Рисунок 3.15 – Співпадання C деформацій прогину нижнього пояса фізичної моделі 600x120 зварної ферми під дією статичного навантаження при порівнянні результатів комп'ютерного моделюючого та натурального експериментів:

1 – розрахункові точки; 2 – лінійна апроксимація результатів

3.6 Міцність і деформівності фізичної моделі 2000x400 зварної ферми при силовому впливі

3.6.1 Натурні силові дослідження фізичної моделі 2000x400

Для натурального дослідження міцності і деформівності зварної прямокутної ферми використано фізичну модель 2000x400, яку виготовлено з вальцьованого кутникового профілю 40x40x4 мм згідно розробленої конструкції, описаної в п. 2.2.3 та зображеної на рис. 2.5.

Натурний силовий експеримент для цієї ферми реалізовано за описаною схемою базування і навантажування (рис. 2.2) на випробувальному стенді (рис. 3.16) за методикою згідно п. 2.3.2.

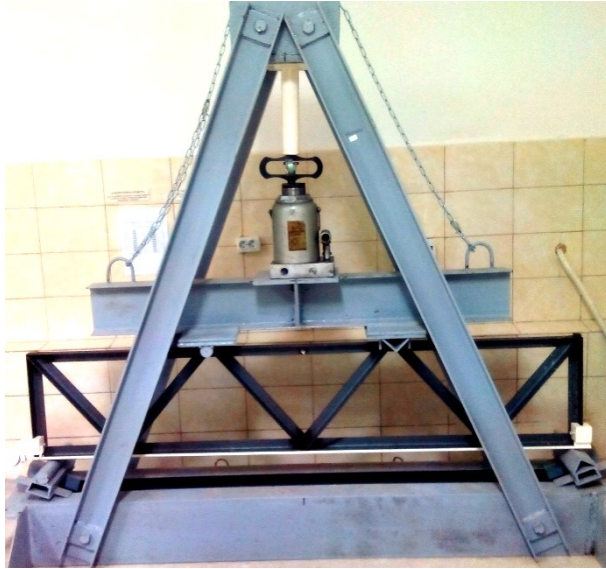


Рисунок 3.16 – Фізична модель 2000x400 зварної ферми на випробувальному стенді перед навантаженням

При випробуванні проводився запис вимірювальних величин: величину навантаження визначали за показами відлікового пристрою динамометра (рис. 3.17, а); величину поздовжньої деформації нижнього пояса визначали за показами індикатора (рис. 3.17, б).



а



б

Рисунок 3.17 – Вимірювання досліджуваних величин за показами відлікових пристроїв динамометра (*а*) та індикатора (*б*)

Натурним силовим експериментом отримано значення видовження та прогину нижнього пояса фізичної моделі 2000x400 зварної прямокутної ферми при дії дискретних статичних навантажень на конструкцію (табл. 3.11) за умов кімнатної температури 18°C.

Таблиця 3.11

Деформування фізичної моделі 2000x400 зварної прямокутної ферми, отримані натурним силовим експериментом

№	Навантаження P , кН	Деформації видовження, нижнього пояса Δl , мм	Деформації прогину нижнього пояса δ , мм
1	10	0,352	1,052
2	20	0,693	2,079
3	30	1,028	3,075
4	40	1,355	4,087
5	50	1,675	5,084
6	60	1,988	6,076
7	70	2,294	7,029
8	80	2,623	7,990

Побудовано діаграму видовження нижнього пояса Δl досліджуваного зразка фізичної моделі 2000x400 зварної прямокутної ферми за результатами натурального силового експерименту (рис. 3.18) при статичних навантаженнях до 80 кН. Очевидно, що при таких навантаженнях видовження нижнього пояса Δl відбувається в пружному діапазоні деформацій.

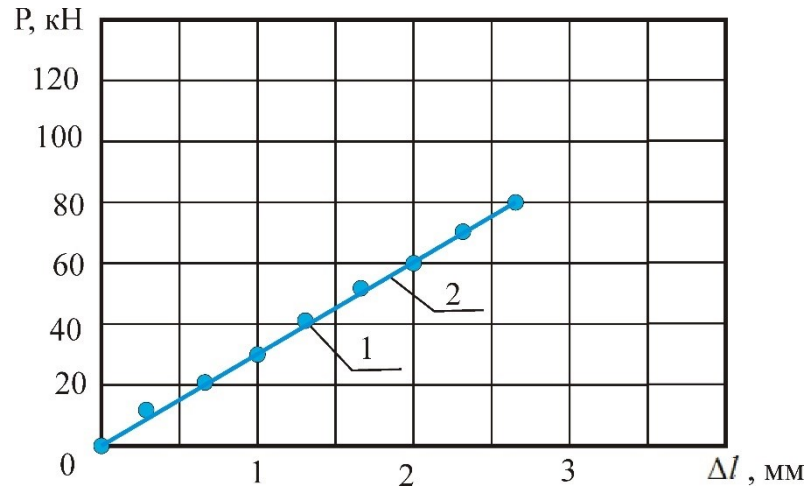


Рисунок 3.18 – Діаграма видовження нижнього пояса Δl фізичної моделі 2000x400 зварної ферми за результатами натурного експерименту: 1 – експериментальні значення; 2 – лінійна апроксимація експериментальних даних

За отриманою чисельною базою (табл. 3.11) побудовано діаграму прогину нижнього пояса $\delta_{експ}$ фізичної моделі 200x400 зварної ферми (рис. 3.19).

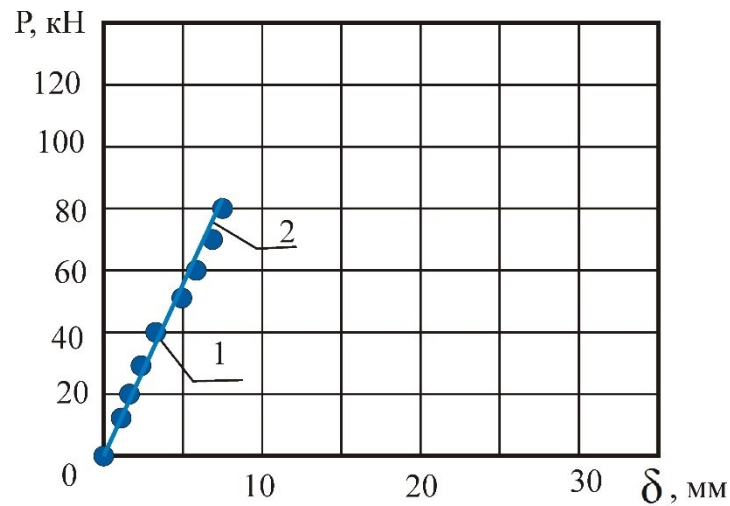


Рисунок 3.19 – Діаграма прогину нижнього пояса $\delta_{експ}$ фізичної моделі 2000x400 зварної ферми за результатами натурного експерименту: 1 – експериментальні значення; 2 – лінійна апроксимація експериментальних даних

3.6.2 Дослідження міцності й деформівності фізичної моделі 2000x4000 зварної ферми комп'ютерним моделюючим експериментом

Для дослідження міцності і деформівності фізичної моделі зварної ферми при статичних навантаженнях комп'ютерним моделюючим експериментом використано програмний комплекс Ansys, який алгоритмічно базується на методі скінчених елементів.

Використовуючи інструменти програмного комплексу Ansys було проведено статичний аналіз фізичної моделі. Статичний розрахунок ферми включає визначення переміщень вузлів, реакцій опор, зусиль у стержнях, а також напружень і деформацій стержнів, що виникають у конструкції під дією навантажень.

За результатами виконання комп'ютерного моделюючого експерименту візуалізовано розподіл деформації видовження $\Delta l_{\text{кме}}$ вздовж нижнього пояса ферми (рис. 3.20) при різних навантаженнях.

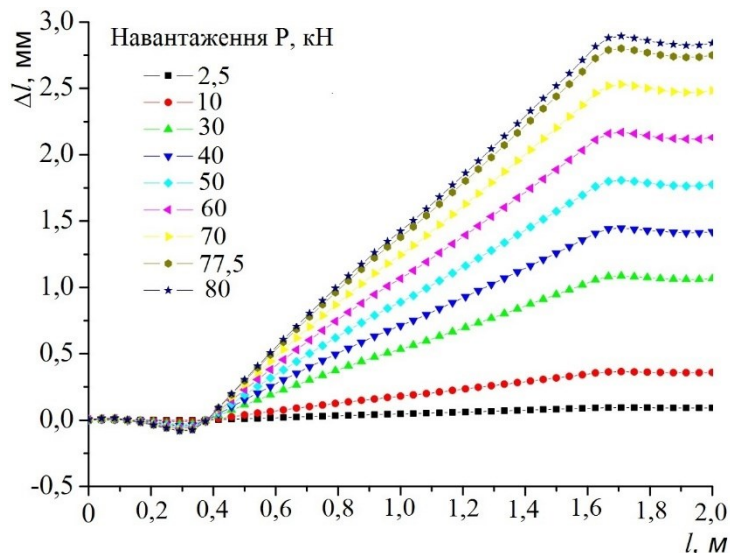


Рисунок 3.20 – Розподіл деформації видовження $\Delta l_{\text{кме}}$ вздовж нижнього пояса фізичної моделі 2000x4000 зварної ферми при різних навантаженнях P

За отриманим розподілом деформації видовження Δl вздовж нижнього пояса виявлено, що деформування конструктивного елемента відбувається по різному для крайніх частин пояса (від опори до вузла) і його центральної частини. Центральна частина пояса розтягується, а крайні частини піддаються незначному стисканню.

За результатами комп'ютерного моделюючого експерименту визначено розподіл деформації прогину δ вздовж нижнього пояса ферми (рис. 3.21).

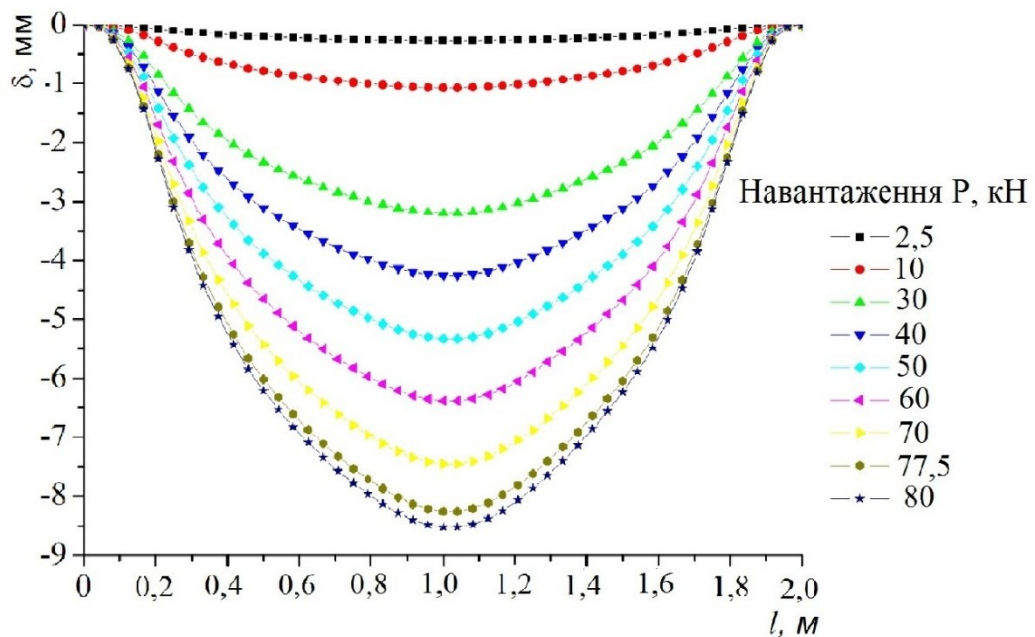


Рисунок 3.21 – Розподіл деформації прогину $\delta_{кме}$ вздовж нижнього пояса фізичної моделі 2000x400 зварної ферми при різних навантаженнях P

Очевидним є факт максимального прогину нижнього пояса посередині ферми. Візуалізована картина розподілу деформації прогину вздовж нижнього пояса фізичної моделі 2000x400 зварної ферми при різних навантаженнях (рис. 3.21) фактично відтворює конфігурацію зігнутої осі досліджуваного конструктивного елемента.

Для виявлення параметрів напружено-деформівного стану отримано діаграму розподілу напружень вздовж нижнього пояса ферми при різних навантаженнях P (рис. 3.22).

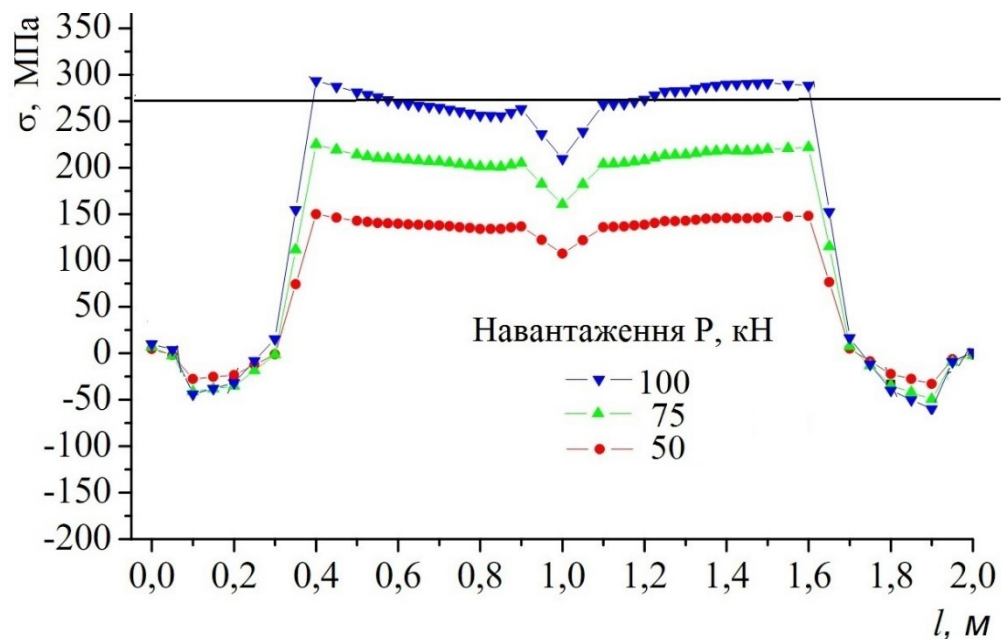


Рисунок 3.22 – Діаграма напружень σ вздовж нижнього пояса фізичної моделі 2000x400 ферми при різних навантаженнях P

На діаграмі напружень (рис. 3.22) виділено межу текучості матеріалу конструкції $\sigma_T=273$ МПа. Такі напруження формуються в нижньому поясі навпроти середніх вузлів при навантаженні на ферму $P = 87,2$ кН. Саме це навантаження формує граничний стан конструкції.

Візуалізовано зовнішню конфігурацію zdeформованої фізичної моделі 2000x400 ферми при навантаженнях на рівні граничного стану (рис. 3.23). За отриманою візуалізацією виявлено, що максимальні локальні деформації формуються на нижньому поясові в обидва боки від середнього вузла. Це корелюється зі значеннями напружень вздовж нижнього пояса (рис. 3.22).

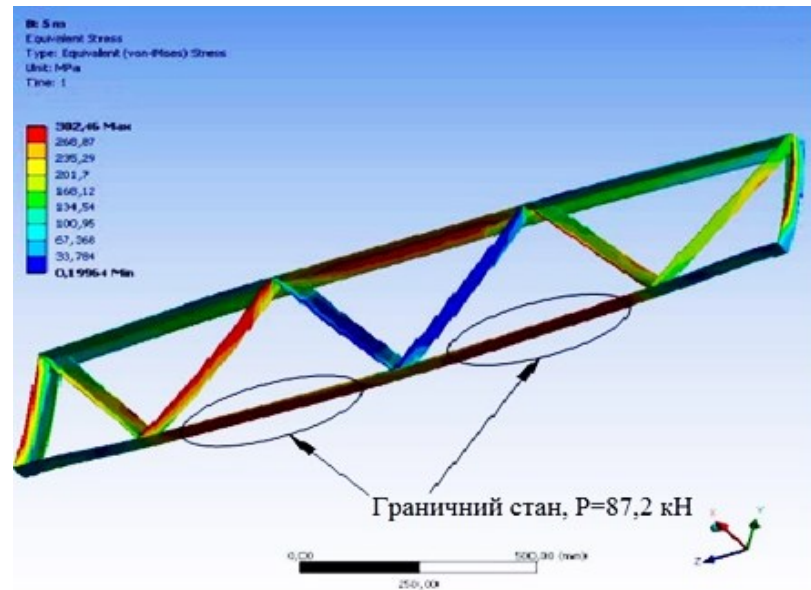


Рисунок 3.23 – Комп’ютерна візуалізація деформування фізичної моделі 2000x400 зварної ферми при навантаженні на рівні граничного стану

Визначені величини максимальних деформації видовження (рис.3.20), максимальні прогини (рис.3.21) та максимальні напруження (рис.3.22), які при цьому формуються в нижньому поясі фізичної моделі 2000x400 зварної ферми при різних навантаженні на конструкцію, зведено в табл. 3.12.

Таблиця 3.12 – Чисельна база параметрів напружено-деформівного стану в нижньому поясі фізичної моделі 2000x400 зварної ферми за результатами комп’ютерного моделюючого експерименту

№	Навантаження P , кН	Напруження σ , МПа	Деформації видовження, нижнього поясу Δl , мм	Деформації прогину нижнього поясу δ , мм
1	2	3	4	5
1	10	31,210	0,363	1,073
2	20	62,106	0,722	2,134
3	30	93,002	1,082	3,195

Продовження табл. 3.12

1	2	3	4	5
4	40	123,899	1,441	4,257
5	50	154,810	1,801	5,319
6	60	185,733	2,161	6,382
7	70	216,711	2,505	7,446
8	80	247,862	2,882	8,518
9	90	280,615	3,239	9,670
10	100	300,758	3,596	11,155
11	120	324,599	11,909	27,743

За отриманою чисельною базою, отриманою комп'ютерним моделюючим експериментом, (табл. 3.12) побудовано діаграми видовження нижнього пояса $\Delta l_{\text{кме}}$ (рис. 3.24) та прогину нижнього пояса $\delta_{\text{кме}}$ (рис. 3.25) фізичної моделі 2000x400 зварної ферми.

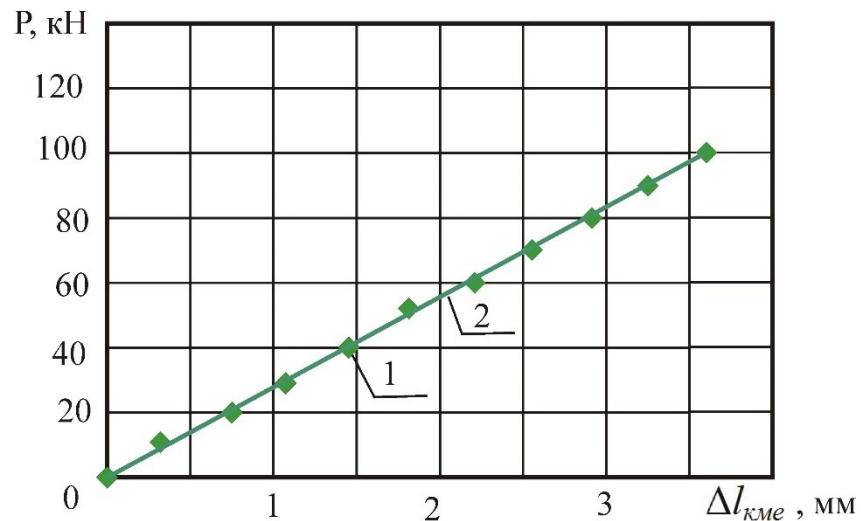


Рисунок 3.24 – Діаграма видовження $\Delta l_{\text{кме}}$ нижнього пояса фізичної моделі 2000x400 зварної ферми, отримана за результатами комп'ютерного моделюючого експерименту:

1 – розрахункові точки; 2 – лінійна апроксимація результатів

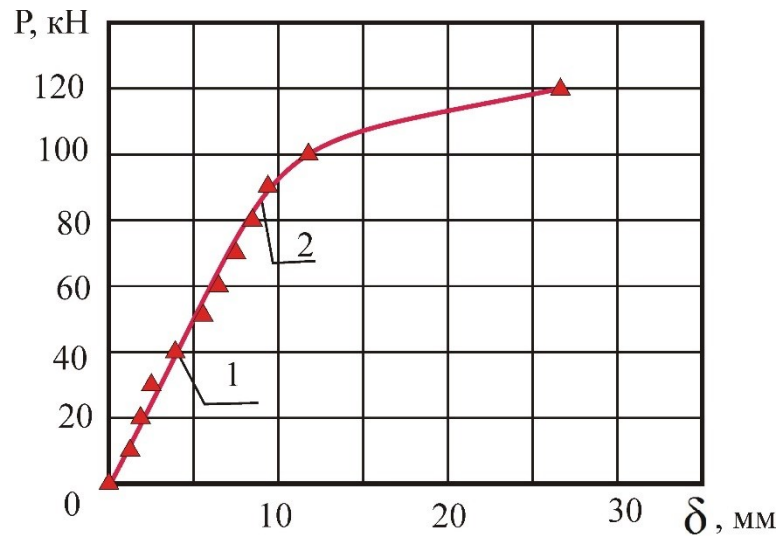


Рисунок 3.25 – Діаграма прогину $\delta_{\text{кме}}$ нижнього пояса фізичної моделі 2000x400 зварної ферми, отримана за результатами комп'ютерного моделюючого експерименту:

1 – розрахункові точки; 2 – лінійна апроксимація результатів

Таким чином, за результатами комп'ютерного моделюючого експерименту виявлено кількісну та якісну картину поведінки фізичної моделі 2000x400 зварної ферми під дією статичних навантажень.

Варто відзначити, що виявлена якісна картина поведінки фізичної моделі 2000x400 зварної ферми співпадає з аналогічною візуалізацією для фізичної моделі 600x120. Очевидно, що якісна картина поведінки при навантажуванні для повномасштабної ферми буде такою ж. Цей факт підтверджує доцільність дослідження конструкцій такого типу фізичним моделюванням виконанням напівнатурних експериментів для виявлення особливостей деформування і руйнування зварних ферм.

Результати такого комп'ютерного моделюючого експерименту використовують для оцінювання поведінки ферм при дії статичних навантажень та попередження настання граничного стану в зварних прямокутних фермах під дією відомих зовнішніх силових впливів в конструкції в процесі експлуатації.

3.6.3 Виявлення достовірності результатів комп'ютерного моделюючого експерименту при навантажуванні фізичної моделі 2000x400 зварної ферми

Для візуального порівняння результатів, отриманих натурним і комп'ютерним моделюючим експериментами, побудовано суміщену діаграму видовження нижнього пояса Δl досліджуваного зразка фізичної моделі 2000x400 зварної ферми (рис. 3.26).

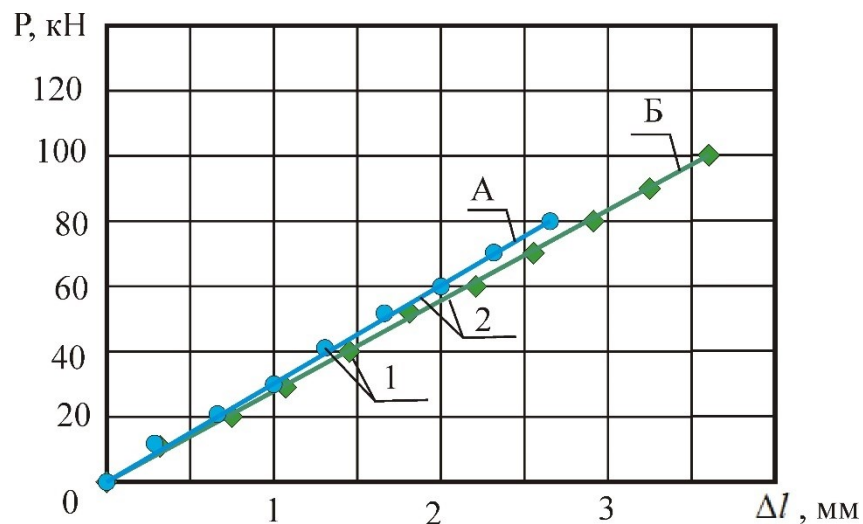


Рисунок 3.26 – Суміщені діаграми видовження Δl нижнього пояса фізичної моделі 2000x400 зварної ферми, отримані за результатами натурального (лінія А) та комп'ютерного моделюючого експериментів (лінія Б):
1 – розрахункові точки; 2 – лінійна апроксимація результатів

З рис. 3.26 можна зробити якісну оцінку про задовільне співпадання результатів комп'ютерного моделювання з дійсними показниками деформування, отриманими при натурному експерименті. Кількісні показники співпадання цих результатів наведено в табл. 3.13. Для розрахунків параметрів порівняння використані залежності згідно п. 3.5.3.

Таблиця 3.13 – Порівняння величин видовження нижнього пояса Δl фізичної моделі 2000x400 зварної ферми, отримані за результатами натурального $\Delta l_{експ}$ та комп'ютерного моделюючого експериментів $\Delta l_{кме}$

Показники	Навантаження, P , кН							
	10	20	30	40	50	60	70	80
Деформація $\Delta l_{кме}$, мм	0,363	0,722	1,082	1,441	1,801	2,161	2,505	2,882
Деформація $\Delta l_{експ}$, мм	0,352	0,693	1,028	1,355	1,675	1,988	2,294	2,623
Абсолютна похибка моделювання, Δ , мм	0,011	0,029	0,054	0,086	0,126	0,173	0,211	0,259
Відносна похибка моделювання, μ	0,031	0,042	0,053	0,063	0,075	0,087	0,092	0,099
Ступінь співпадання, C	0,969	0,958	0,947	0,937	0,925	0,913	0,908	0,901

Ступінь співпадання результатів комп'ютерного моделюючого експерименту по відношенню до результатів натурального експерименту за величиною видовження нижнього поясу Δl фізичної моделі 2000x400 мм зварної ферми при однакових навантаженнях в графічному вигляді подано на рис. 3.27.

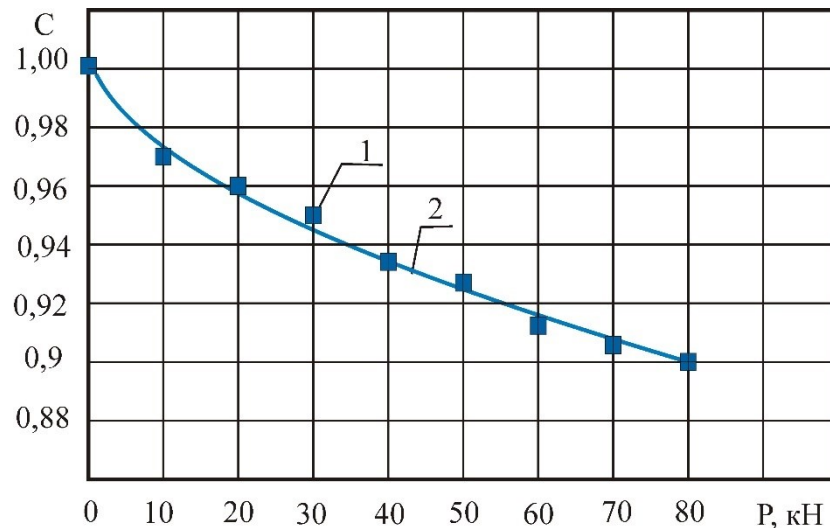


Рисунок 3.27 – Співпадання C видовження нижнього поясу Δl фізичної моделі 2000x400 зварної ферми під дією статичного навантаження при порівнянні результатів комп'ютерного моделюючого та натурального експериментів:

1 – розрахункові точки; 2 – лінійна апроксимація результатів

За результатами порівняння видовження нижнього пояса ферми можна зробити висновок про задовільне узгодження чисельних баз натурального і комп'ютерного моделюючого експериментів. Співпадання деформацій в межах пружного діапазону навантажень не нижче 90 %. При цьому натурний експеримент дає вищі міцнісні показники конструкції в порівнянні з показниками, отриманими комп'ютерним моделюючим експериментом, що забезпечує додатковий запас міцності для досліджуваної конструкції.

Виконано порівняння значень прогину δ нижнього пояса, отриманих натурним і комп'ютерним моделюючим експериментом у візуалізованому (рис. 3.28) і чисельному вигляді (табл. 3.14).

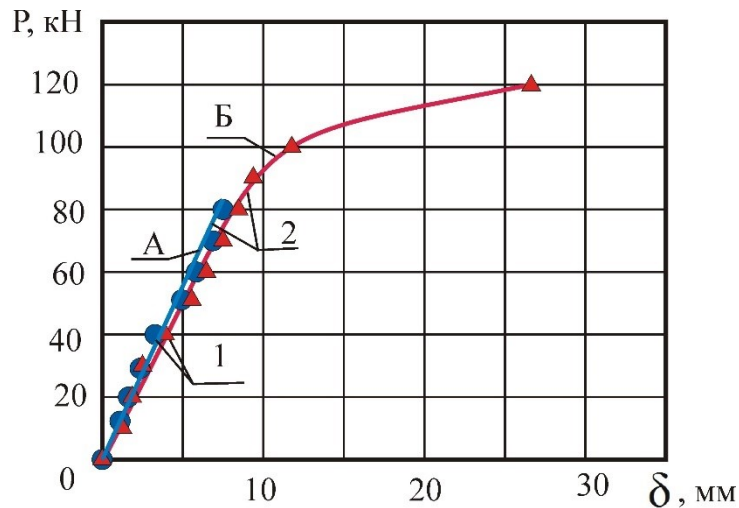


Рисунок 3.28 – Суміщені діаграми прогину δ нижнього пояса фізичної моделі 2000x400 зварної ферми, отримані за результатами натурного (лінія А) та комп'ютерного моделюючого експериментів (лінія Б):
1 – розрахункові точки; 2 – лінійна апроксимація результатів

Абсолютну похибку моделювання Δ , відносну похибку моделювання μ та ступінь співпадання S для експериментальних результатів визначено за залежностями п. 3.5.3.

Таблиця 3.14 – Порівняння величин прогину нижнього пояса δ фізичної моделі 2000x400 зварної ферми, отримані за результатами натурного $\delta_{експ}$ та комп'ютерного моделюючого експериментів $\delta_{кме}$

Показники	Навантаження, P , кН							
	10	20	30	40	50	60	70	80
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Деформація $\delta_{кме}$, мм	1,073	2,134	3,195	4,247	5,319	6,382	7,446	8,518
Деформація $\delta_{експ}$, мм	1,052	2,079	3,075	4,087	5,084	6,076	7,029	7,990

Продовження табл. 3.14

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Абсолютна похибка моделювання, Δ , мм	0,021	0,055	0,120	0,160	0,235	0,306	0,417	0,528
Відносна похибка моделювання, μ	0,020	0,026	0,039	0,039	0,046	0,050	0,059	0,066
Ступінь співпадання, C	0,980	0,974	0,961	0,961	0,954	0,950	0,941	0,934

За отриманими чисельними даними порівняння побудовано графік співпадання C прогину нижнього поясу δ фізичної моделі 2000x400 зварної ферми під дією статичних навантажень при порівнянні результатів комп'ютерного моделюючого та натурного експериментів (рис. 3.29).

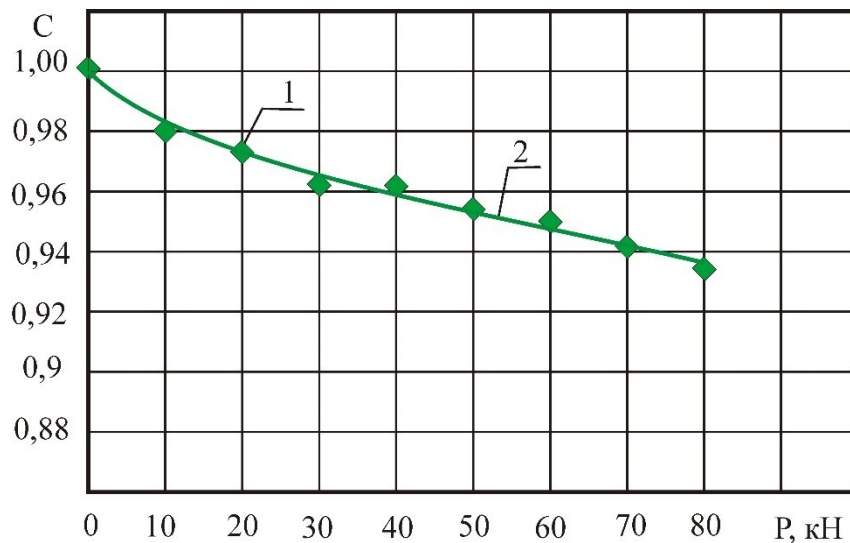


Рисунок 3.29 – Співпадання C прогину нижнього поясу δ фізичної моделі 2000x400 зварної ферми під дією статичних навантажень при порівнянні результатів комп'ютерного моделюючого та натурного експериментів:

1 – розрахункові точки; 2 – лінійна апроксимація результатів

Ступінь співпадання величини прогину нижнього поясу δ фізичної моделі 2000x400 зварної ферми є не нижчим за 93,4% для пружного діапазону статичних навантажень. Як і у випадку з розтягом нижнього пояса, розбіжність результатів комп'ютерного моделюючого експерименту в 6,6% забезпечує додатковий запас міцності для досліджуваної конструкції.

3.7 Деформівність фізичної моделі 2000x400 зварної ферми при дії температурних впливів натурним та комп'ютерним моделюючим експериментами

Натурні експериментальні дослідження виконано згідно описаної методики (див. п. 2.5) у спеціальному пристосуванні [27], яке дала можливість визначити температурні деформації елементів ферми згідно схеми замірів на рис. 3.30. Попередньо нагріту ферму до 180°C в камері для порошкового фарбування встановили в пристосування і впродовж її охолодження до кімнатної температури визначали:

- $\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_5, \delta_6, \delta_7$ – вертикальні температурні деформації, заміряні для вузлів верхнього та нижнього поясів зварної ферми (стрілками вказано напрямок додатної деформації);

- δ_4 – горизонтальні температурні деформації, заміряні в торцевій частині ферми.

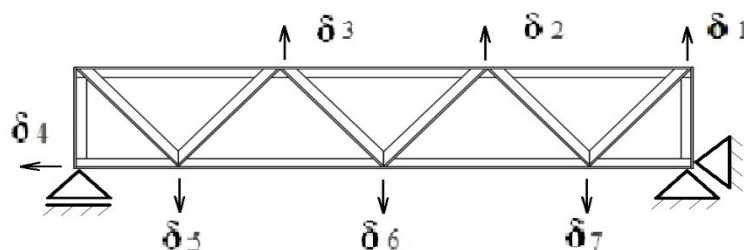


Рисунок 3.30– Схема замірів температурних деформацій у вузлах фізичної моделі 2000x400 зварної ферми

Інформацію, отриману в чисельному вигляді, зведено в табл. 3.15. Для створення адекватних умов порівняння з результатами комп'ютерного моделюючого експерименту результати переформатовано до вигляду від $t=20$ °С до 160 °С, а не так як їх отримували від $t=160$ °С до 20 °С.

Таблиця 3.15 – Деформування елементів фізичної моделі 2000×400 зварної ферми при температурних впливах за результатами натурального експерименту

$t, ^\circ\text{C}$	$\delta_1, \text{мм}$	$\delta_2, \text{мм}$	$\delta_3, \text{мм}$	$\delta_4, \text{мм}$	$\delta_5, \text{мм}$	$\delta_6, \text{мм}$	$\delta_7, \text{мм}$
20	0	0	0	0	0	0	0
40	0,12	0,06	0,05	0,32	-0,01	-0,08	-0,01
60	0,20	0,12	0,13	0,72	-0,02	-0,14	-0,02
80	0,27	0,18	0,22	1,12	-0,035	-0,20	-0,03
100	0,33	0,25	0,30	1,41	-0,05	-0,25	-0,045
120	0,39	0,35	0,40	1,80	-0,07	-0,32	-0,06
140	0,48	0,46	0,51	2,35	-0,09	-0,40	-0,08
160	0,60	0,63	0,63	3,23	-0,115	-0,58	-0,10

За температурним діапазоном, прийнятим для натурального експерименту, виконаний комп'ютерний моделюючий експеримент і визначено відповідні деформації ферми у вузлах. На рис. 3.31... 3.37 подано суміщені графіки температурних деформацій вузлів зварної ферми за результатами натурального (лінія А) і комп'ютерного моделюючого (лінія Б) експериментів.

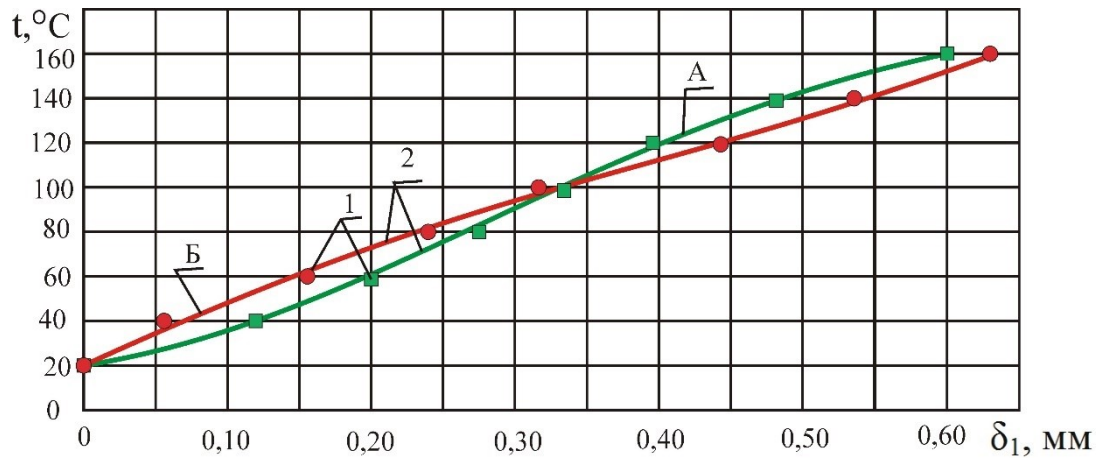


Рисунок 3.31 – Суміщені графіки температурних деформацій δ_1 вузла ферми

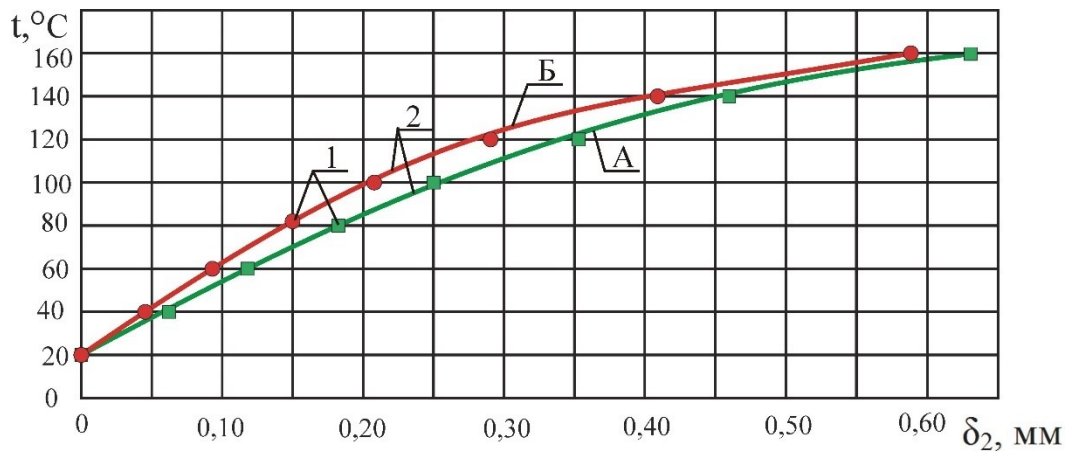


Рисунок 3.32 – Суміщені графіки температурних деформацій δ_2 вузла ферми

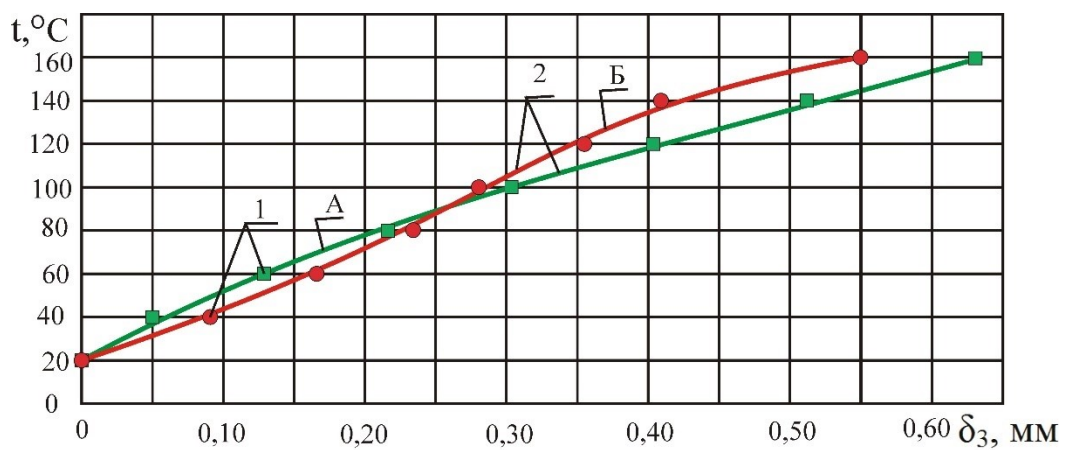


Рисунок 3.33 – Суміщені графіки температурних деформацій δ_3 вузла ферми

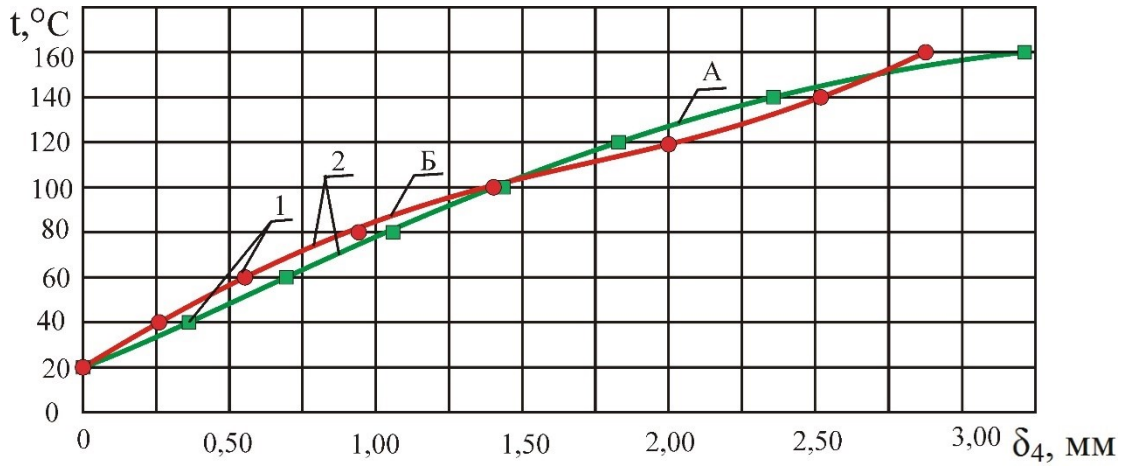


Рисунок 3.34 – Суміщені графіки температурних деформацій δ_4 вузла ферми

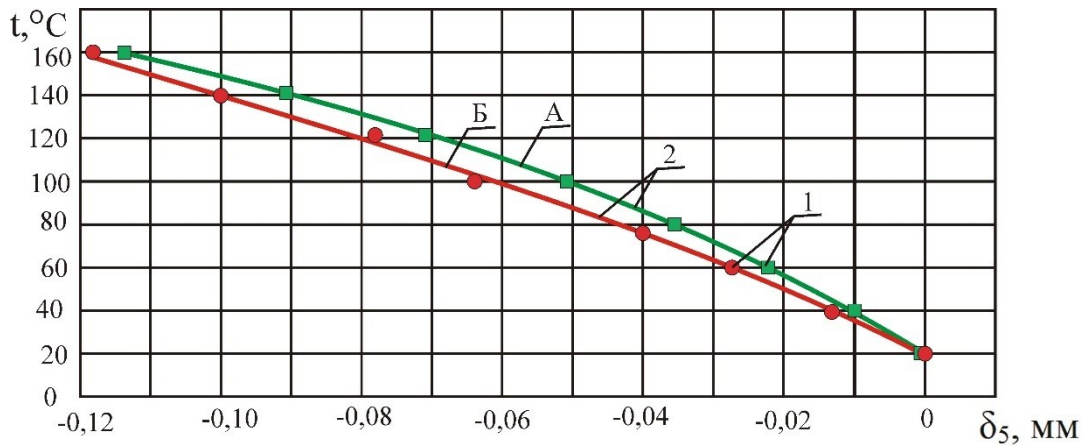


Рисунок 3.35 – Суміщені графіки температурних деформацій δ_5 вузла ферми

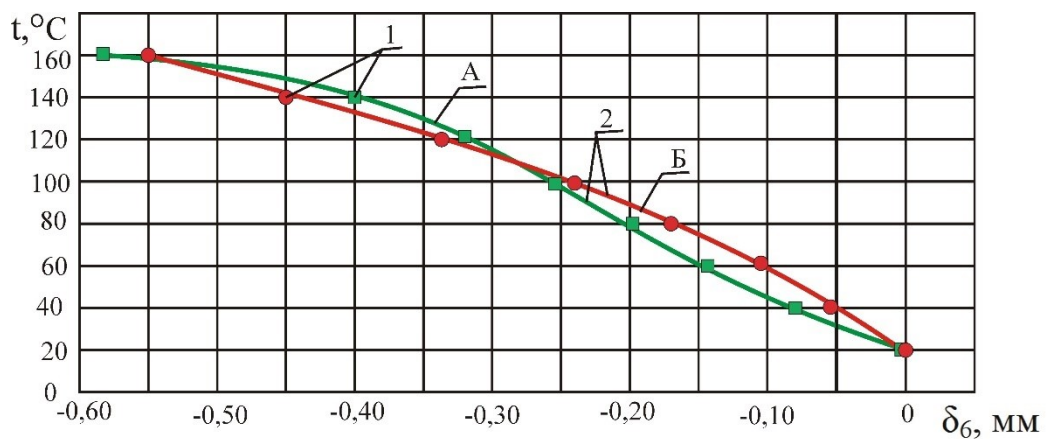


Рисунок 3.36 – Суміщені графіки температурних деформацій δ_6 вузла ферми

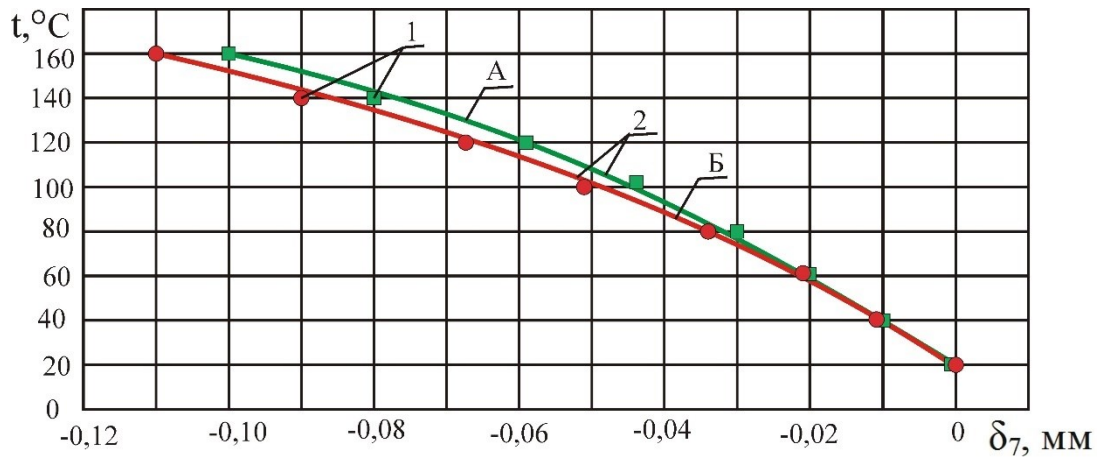


Рисунок 3.37 – Суміщені графіки температурних деформацій δ_7 вузла ферми

На графіках рис. 3.32...3.37 цифрою 1 позначені точки, отримані за експериментальними результатами, а цифрою 2 – лінії, побудовані за результатом лінійної апроксимації експериментальних даних.

При візуальному порівнянні графіків на кожному рисунку помітно їх високій ступінь наближення. За результатами кількісного оцінювання ступеня співпадання результатів виконаних натурального і комп'ютерного моделюючого експериментів по визначенню температурних деформацій конструктивних елементів зварної ферми виявлено, що їх співпадання не нижче 92,7%. Отже використаний для комп'ютерного моделюючого експерименту програмний пакет SolsdWorks придатний для моделювання поведінки конструкцій такого типу з високим ступенем достовірності отриманих результатів.

3.8 Висновки до розділу 3

1. Для формування вхідного інформаційного забезпечення при виконанні комп'ютерного моделюючого експерименту натурними силовими дослідженнями визначено механічні властивості сталі ВСт3пс як за умов кімнатних температур, так і при термічному впливі на матеріал від 100 до 450 $^{\circ}\text{C}$. Виявлено розкид експериментальних даних в межах 5%, що суттєво точніше, ніж за даними ДСТУ і сертифікатів якості.

2. Виконано серію напівнатурних і комп'ютерних моделюючих експериментів для двох фізичних моделей 600x120 і 2000x400 зварної прямокутної ферми. За результатами таких досліджень виявлено:

- якісна картина формування параметрів НДС в конструктивних елементах обох фізичних моделей співпадає, що свідчить про доцільність використання методики фізичного моделювання для дослідження великогабаритних ферм такого типу;
- ступінь співпадання параметрів міцності і деформівності, визначених напівнатурним і комп'ютерним моделюючим експериментом становить понад 0,9, що свідчить про раціональний вибір розрахункового програмного пакету і методики його використання.

3. Відпрацьовано методику комп'ютерного моделюючого експерименту, визначено параметри скінченно-елементної моделі, сформовано вхідну інформаційну базу, яку буде використано при моделюванні міцності і деформівності повномасштабної зварної прямокутної ферми 18000x3600.

РОЗДІЛ 4

ПОВЕДІНКА ПОВНОМАСШТАБНОЇ ЗВАРНОЇ ПРЯМОКУТНОЇ ФЕРМИ ПРИ ДІЇ СИЛОВИХ І ТЕМПЕРАТУРНИХ ЧИННИКІВ

4.1 Міцність і деформівність зварної ферми при навантажуванні без температурних впливів

Дослідження поведінки повномасштабної зварної ферми 18000x3600 мм з кутникового профілю 100×100×10 мм (див. п. 2.2) при статичних силових впливах за прийнятою схемою навантажування виконано програмним комплексом Ansys.

Для реалізації комп'ютерного моделюючого експерименту розроблено тривимірну модель конструкції (рис.4.1).

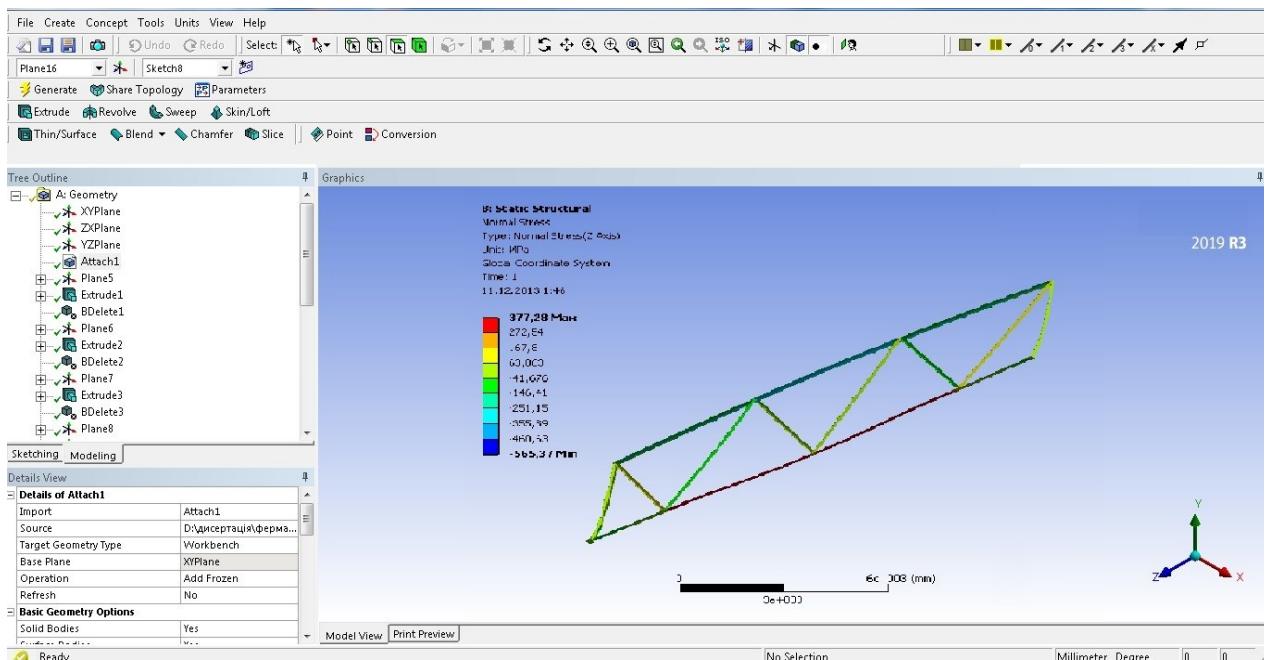


Рисунок 4.1 – Тривимірна модель ферми 18000x3600 мм

Виконано комп'ютерний моделюючий експеримент по навантажуванні досліджуваної ферми аж до настання її граничного стану за умов кімнатної температури.

Отримано візуалізовану картину розподілу еквівалентних напружень по всіх конструктивних елементах зварної ферми (рис. 4.2) (поясах, стійках, розкосах) для різних значень статичних навантажень при кімнатній температурі.

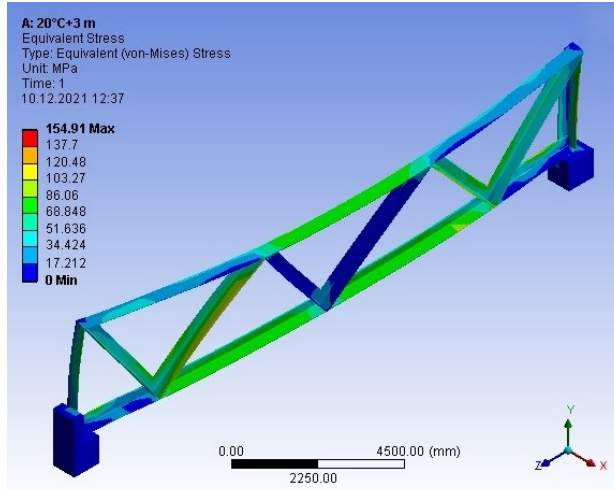
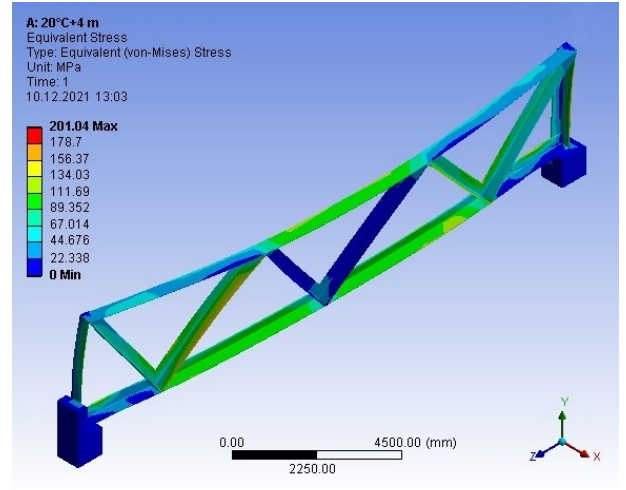
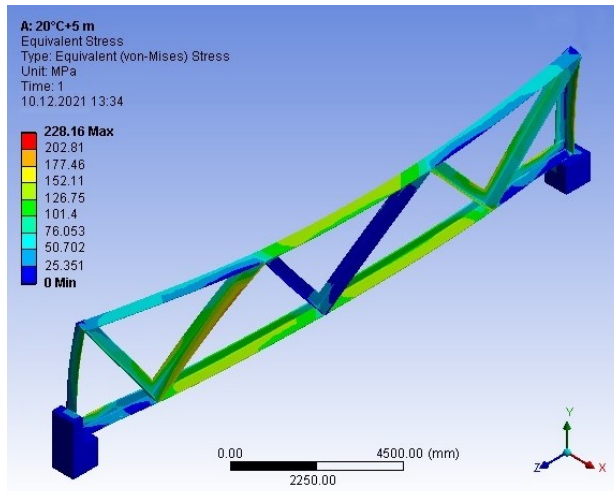
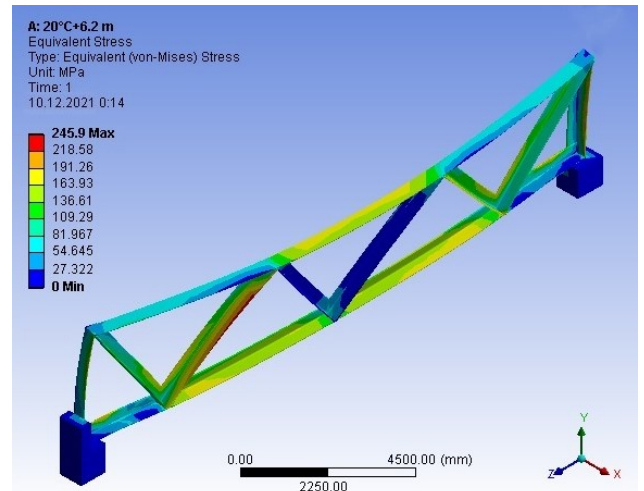
*a**б**в**г*

Рисунок 4.2 – Візуалізація розподілу еквівалентних напружень по елементах зварної ферми при дії навантаження: *a* – 200 кН; *б* – 300 кН; *в* – 400 кН; *г* – 500 кН

Аналогічно моделюванням за таких самих умов отримано візуалізовану картину розподілу нормальних напружень по всіх конструктивних елементах зварної ферми (рис. 4.3).

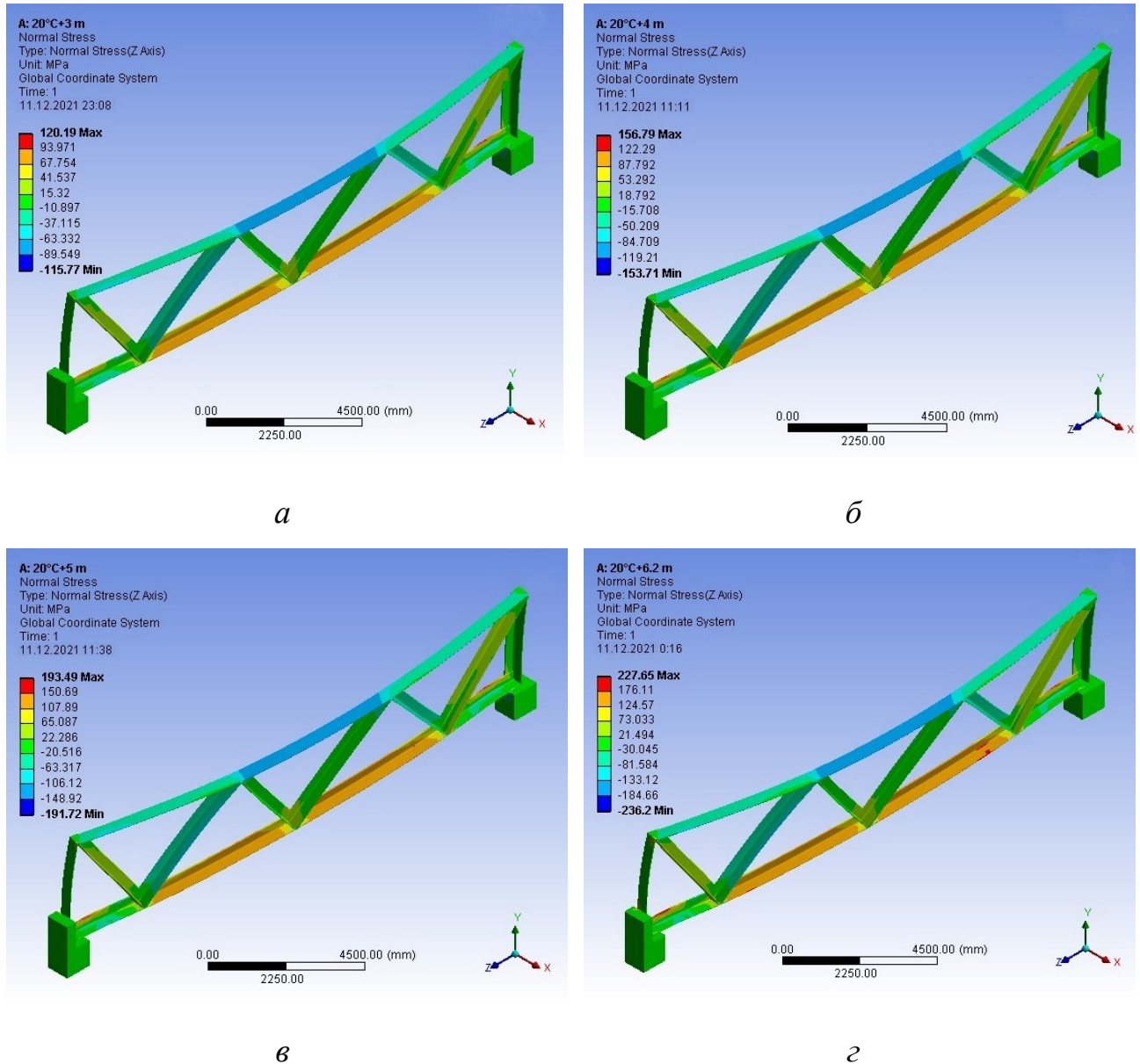


Рисунок 4.3 – Візуалізація розподілу нормальних напружень по елементах зварної ферми при дії навантаження:

а – 200 кН; *б* – 300 кН; *в* – 400 кН; *г* – 500 кН

Для кількісного оцінювання параметрів напружено-деформівного стану в конструктивних елементах ферми побудовано графіки нормальних напружень

для всіх конструктивних елементів ферми (рис. 4.4...4.7, 4.9...4.14) (поясів, стійок, розкосів) для різних значень статичних навантажень при кімнатній температурі.

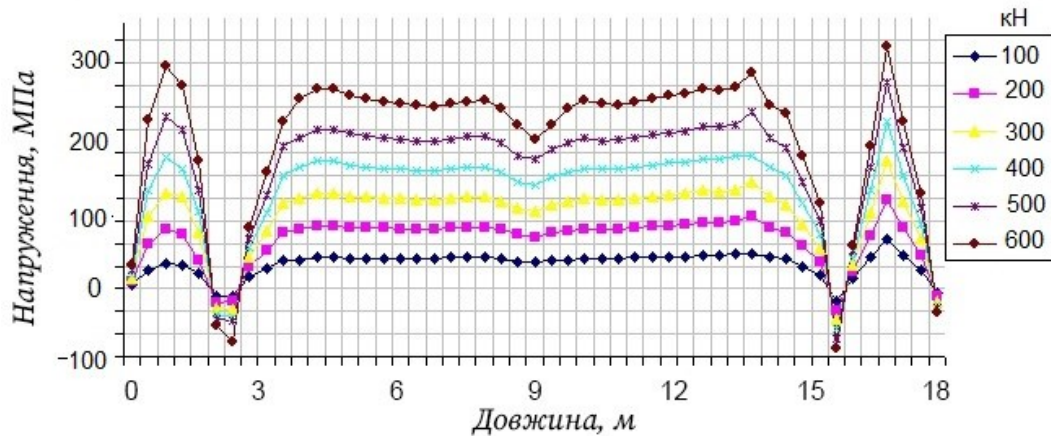


Рисунок 4.4 – Розподіл нормальних напружень по довжині нижнього поясу ферми за статичних навантажень при кімнатній температурі

За отриманим розподілом напружень вздовж нижнього поясу виявлено, що їх максимальні значення формуються в правій частині між опорним і проміжним вузлами. Це було помітно і за вище отриманою візуалізацією розподілу нормальних напружень (рис. 4.3).

Доцільність детальнішого аналізу параметрів напружено-деформівного стану вздовж нижнього поясу буде тоді, якщо тримкість ферми буде визначатися саме його міцністю. Для виявлення цього досліджено розподіл напружень вздовж верхнього поясу (рис. 4.5), в стійках (рис. 4.6, 4.7) і розкосах ферми (рис. 4.9...4.14).

За співвідношенням між експериментально визначеною границею текучості матеріалу ($\sigma_T=273$ МПа) (див. п. 3.2) і напруженнями в елементах конструкції ферми можна оцінити міцнісний режим роботи кожного конструктивного елемента ферми.

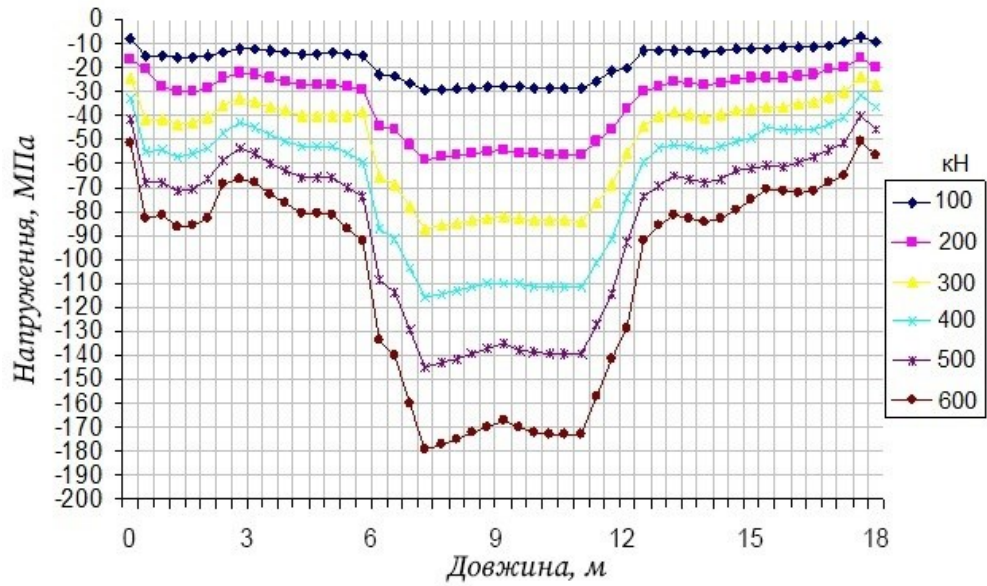


Рисунок 4.5 – Розподіл нормальних напружень по довжині верхнього поясу ферми за статичних навантажень при кімнатній температурі

Проаналізувавши отриманий розподіл виявлено, що напруження вздовж верхнього поясу є завжди стискаючими, а їх максимальні значення локалізуються в околі середини ферми.

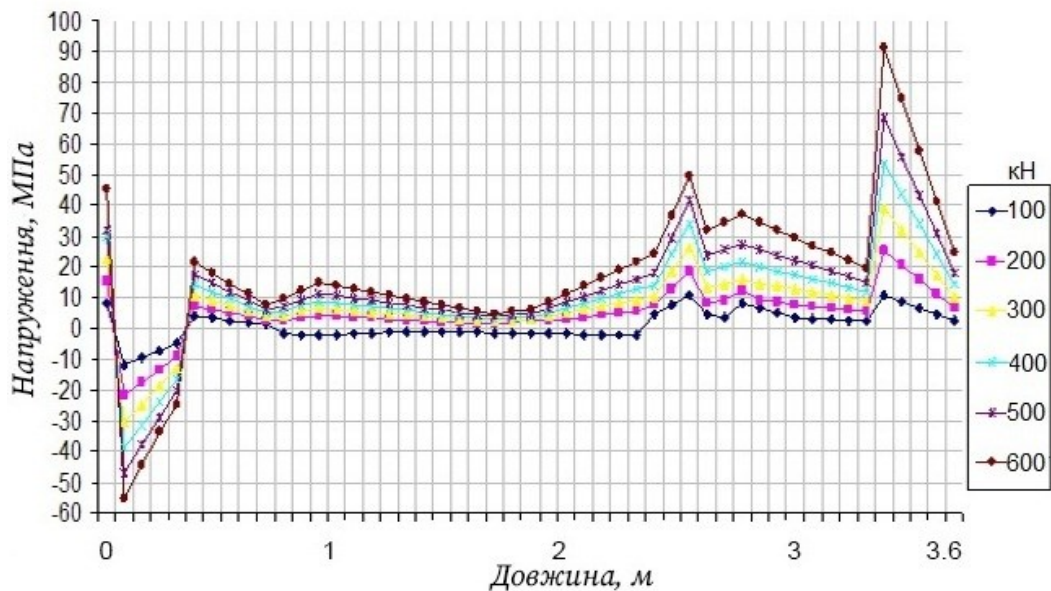


Рисунок 4.6 – Розподіл нормальних напружень вздовж лівої стійки ферми за статичних навантажень при кімнатній температурі

За розподілом напружень вздовж лівої стійки ферми помітно, що вздовж стійці має місце складний напружений стан, який проявляється наявністю як стискаючих, так і розтягуючих напружень.

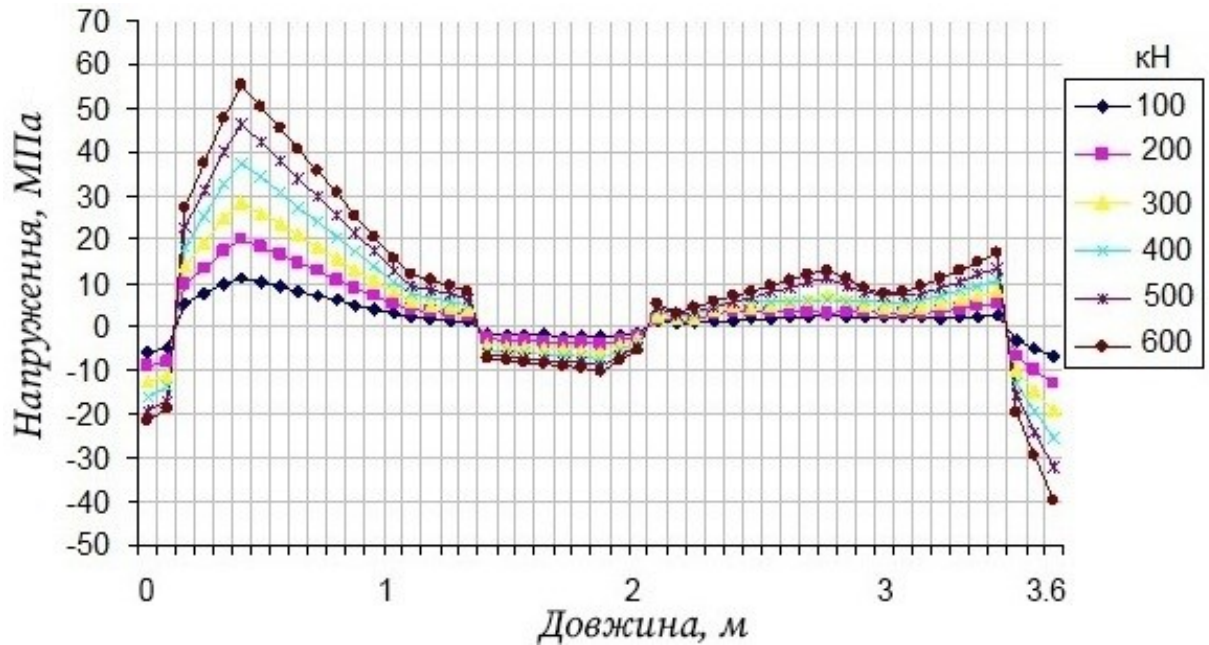


Рисунок 4.7 – Розподіл нормальних напружень вздовж правої стійки ферми за статичних навантажень при кімнатній температурі

Подібно до лівої стійки ферми працює і права стійка, в якій також мають місця і стискаючі, і розтягуючі напруження.

Для дослідження параметрів напружено-деформівного стану вздовж розкосів ферми подано їх нумерацію з прив'язкою до прийнятої схеми базування (рис. 4.8).

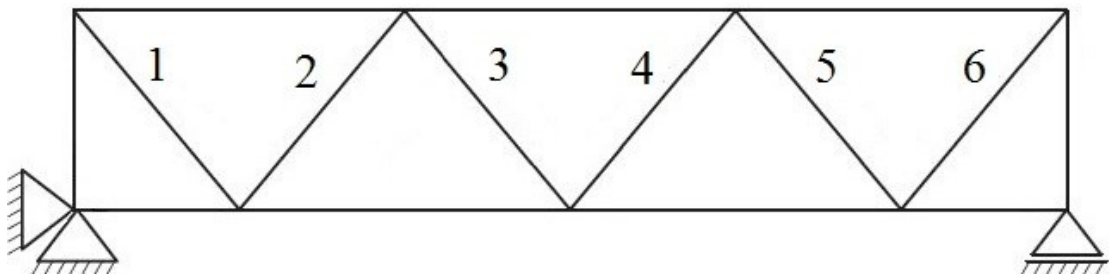


Рисунок 4.8 – Нумерація розкосів ферми для їх ідентифікації при виконанні комп'ютерного моделюючого експерименту

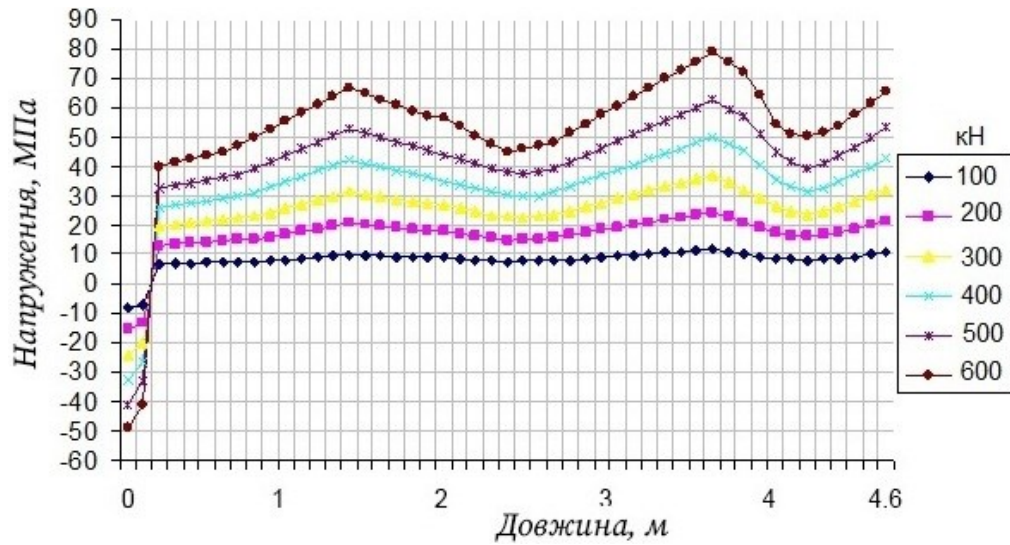


Рисунок 4.9 – Розподіл нормальних напружень для 1-го розкосу ферми за статичних навантажень при кімнатній температурі

Для переважної довжини 1 розкосу основними напруженнями є розтягуючі, хоча в лівій при вузловій ділянці має місце незначний стиск.

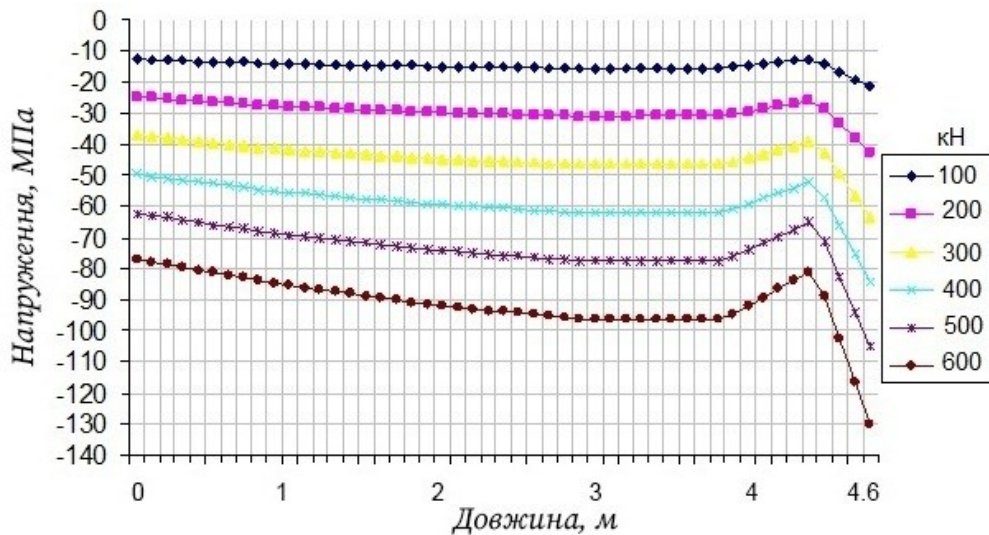


Рисунок 4.10 – Розподіл нормальних напружень для 2-го розкосу ферми за статичних навантажень при кімнатній температурі

На відміну від розкосу 1 в розкосі 2 всі напруження, які формуються при навантажуванні ферми, є стискаючими.

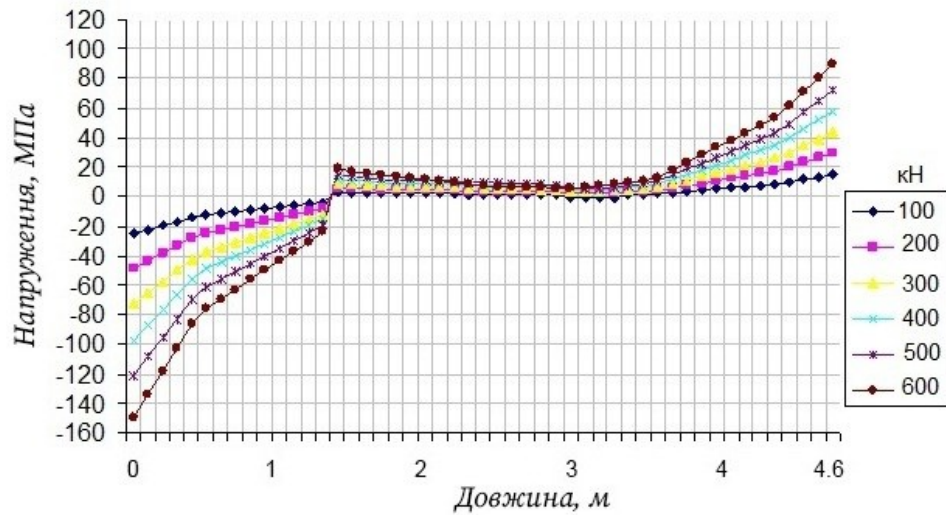


Рисунок 4.11 – Розподіл нормальних напружень для 3-го розкосу ферми за статичних навантажень при кімнатній температурі

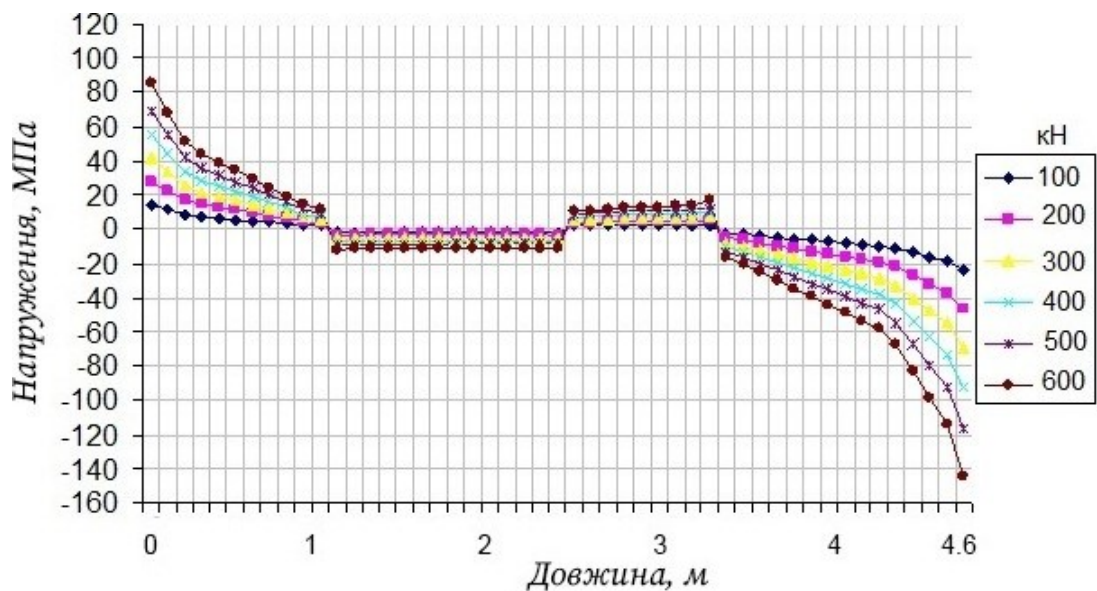


Рисунок 4.12 – Розподіл нормальних напружень для 4-го розкосу ферми за статичних навантажень при кімнатній температурі

Оскільки 3 і 4 розкоси розміщені симетрично відносно вертикальної осі ферми, то й напруження, які формуються в них, мають подібну схему розподілу і близькі чисельні значення.

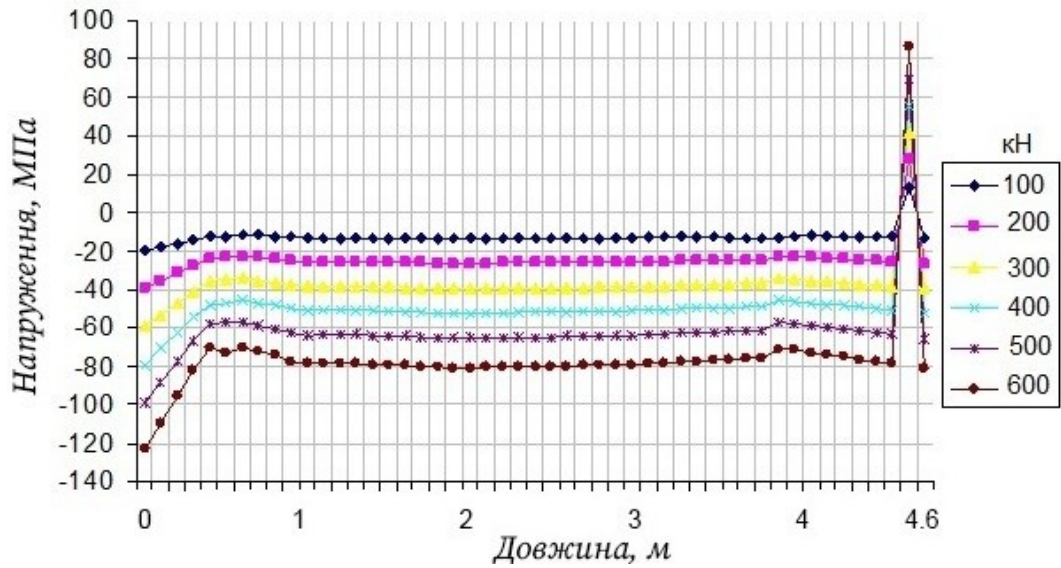


Рисунок 4.13 – Розподіл нормальних напружень для 5-го розкосу ферми за статичних навантажень при кімнатній температурі

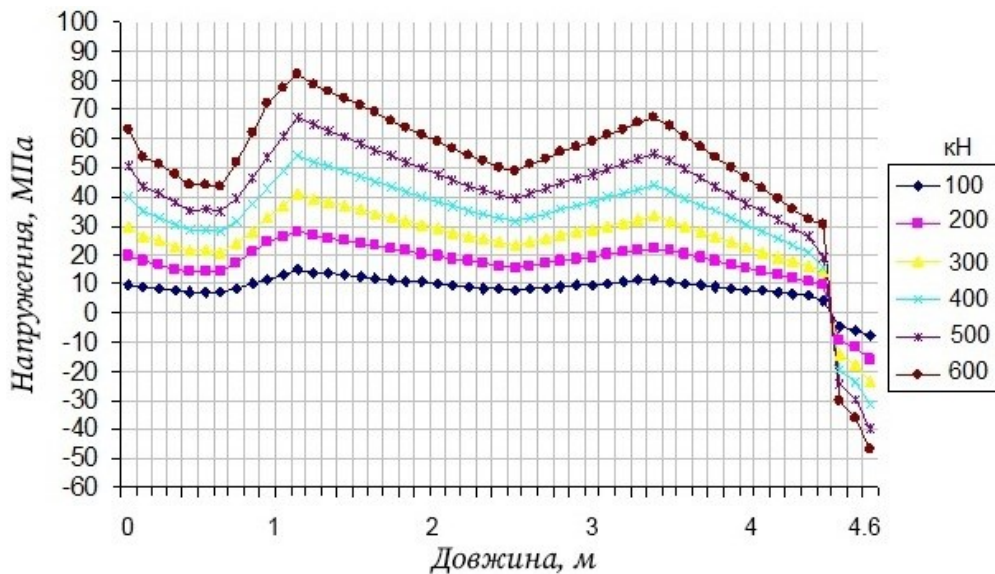


Рисунок 4.14 – Розподіл нормальних напружень для 6-го розкосу ферми за статичних навантажень при кімнатній температурі

Розкоси 5 і 6 є також симетричними відповідно до 2 і 1 розкосів. Як і у випадку з розкосами 3 і 4 напруження, які формуються в них, мають подібну схему розподілу і близькі чисельні значення.

Виходячи з вище описаних досліджень і аналізом отриманих результатів

виявлено місця локалізації максимальних напружень, які зумовлюють втрату фермою міцності (рис. 4.3, 4.4). Втрата міцності ферми відбувається за рахунок формування найвищих напружень в нижньому поясові на ділянці між опорним і першим проміжним вузлами (рис. 4.4).

Іншою причиною руйнування ферми може бути втрата її стійкості, але цей варіант впродовж експлуатації малоімовірний, оскільки в будівлях і спорудах ферма не працює самостійно, а в поєднанні з іншими конструкціями, які забезпечують її просторову жорсткість практично не змінюючи її тримкості.

Виходячи з цього вивчення питання міцності й деформівності зварної прямокутної ферми при дії силових впливів, в першу чергу, зводиться до дослідження поведінки нижнього пояса. Винятком може бути локальне нагрівання якогось іншого конструктивного елемента ферми (стояка, розкоса чи верхнього пояса), які при цьому формуватимуть місцеве пошкодження і руйнування ферми.

За результатами комп'ютерного моделюючого експерименту отримано діаграму видовження Δl (рис. 4.15) нижнього пояса ферми при дії конкретних навантажень.

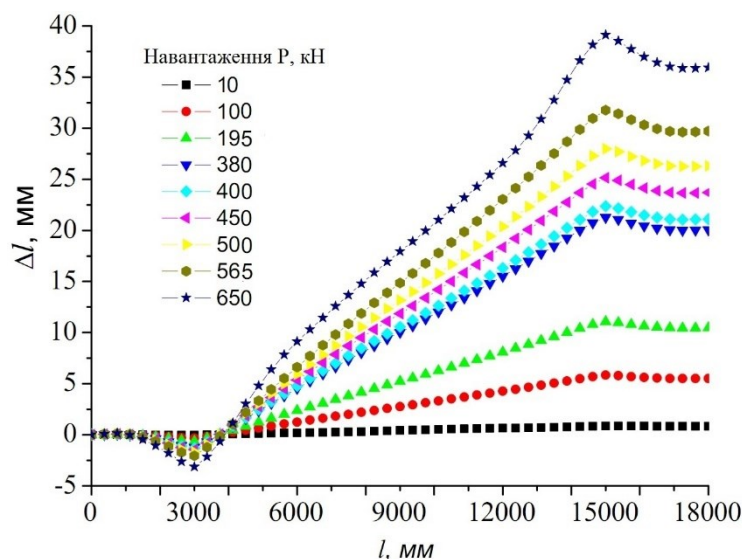


Рисунок 4.15 – Видовження вздовж нижнього пояса ферми 18000x3600 при різних навантаження

З отриманої діаграми очевидний нерівномірний розподіл видовження нижнього пояса. Так від опор до сусідніх вузлів при навантажуванні ферми в нижньому поясові відбувається незначне його стискання. Основна ж частина нижнього пояса розтягується за пружним механізмом деформування. Лише при високих навантаженнях в цій частині нижнього пояса формується пластична деформація. Це помітно на лінії, що відповідає навантаження 650 кН.

Комп'ютерне моделювання поведінки зварної прямокутної ферми дало можливість отримати діаграму прогину δ нижнього пояса ферми 18000x3600 на будь-якій частині довжини його довжини при різних навантаженнях (рис. 4.16). Якщо при навантаженнях до 195 кН деформування відбувається наближено до рівномірного, то при вищих навантаженнях помітно злами в діаграмі деформування, що пояснюється локалізацією напружень в цих місцях.

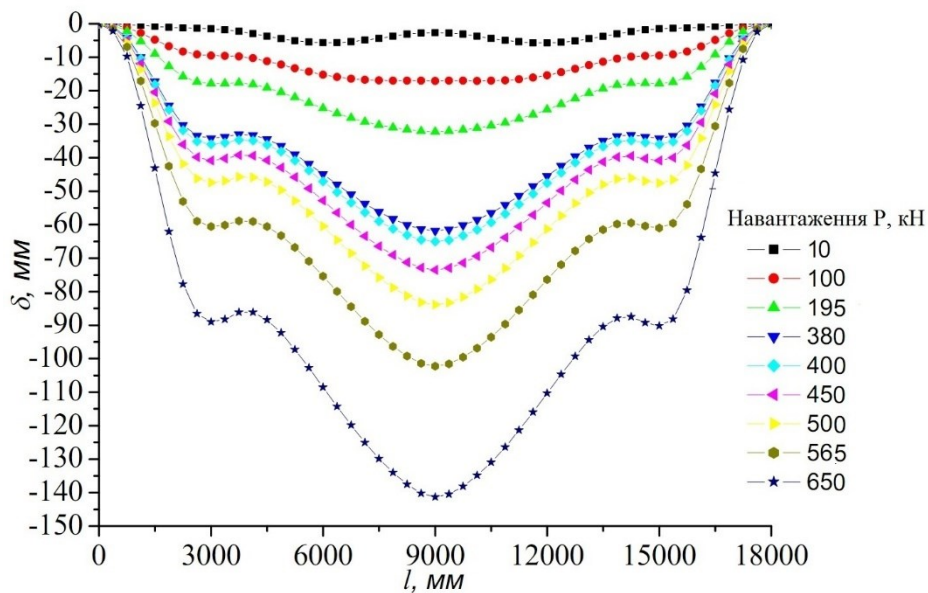


Рисунок 4.16 – Прогини вздовж нижнього пояса ферми 18000x3600 при різних навантаженнях

При візуальному порівнянні отриманих діаграм деформування з аналогічними діаграмами для фізичної моделі 2000x400 зварної ферми (рис. 3.20 і 3.21) очевидним є подібність якісної картини деформування. Це свідчить

про те, що якісно поведінки повномасштабної ферми 18000x3600 і її фізичної моделі 2000x400 при деформуванні співпадають.

За результатами досліджень сформовано чисельну базу деформацій нижнього пояса 18000x3600 при навантажуванні зварної ферми конкретними зусиллями і максимальних напружень, які при цьому формуються (табл. 4.1).

Таблиця 4.1– Чисельна база напружень і деформацій нижнього пояса 18000x3600 при навантажуванні зварної ферми за результатами комп'ютерного моделювання

№	Навантаження P , кН	Напруження по нижньому поясі σ , МПа	Деформації видовження, нижнього пояса Δl , мм	Деформації прогину нижнього пояса δ , мм
1	10	8,3	0,86	5,72
2	100	52,1	5,82	17,06
3	195	98,4	11,06	32,25
4	380	188,5	21,27	61,85
5	400	198,2	21,80	65,05
6	450	222,7	25,14	73,50
7	500	247,6	27,97	83,92
8	565	273,0	31,75	102,26
9	600	298,1	34,12	115,45
10	650	307,0	39,11	141,30
11	750	344,1	268,63	586,32

За експериментально отриманою інформаційною базою побудовано діаграму загального видовження Δl нижнього пояса при різних навантаженнях(рис. 4.17).

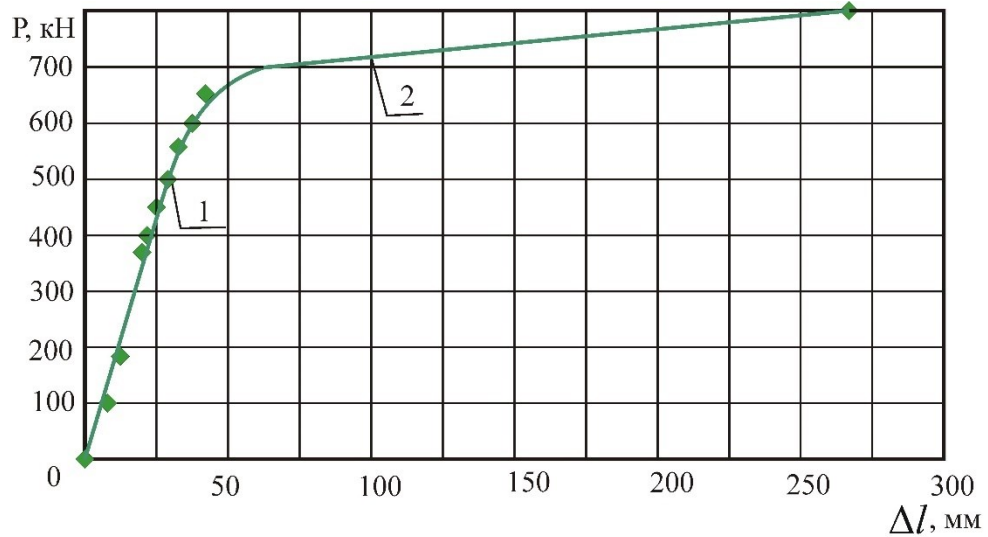


Рисунок 4.17 – Діаграма загального видовження Δl нижнього пояса ферми при різних навантаженнях

За отриманою діаграмою видовження нижнього пояса очевидно, що до навантаження $P=565$ кН видовження відбувається за пружним механізмом деформування, а при вищих навантаженнях – за пластичним.

Аналогічно отримано діаграму прогину δ на середині нижнього пояса при різних навантаженнях (рис. 4.18).

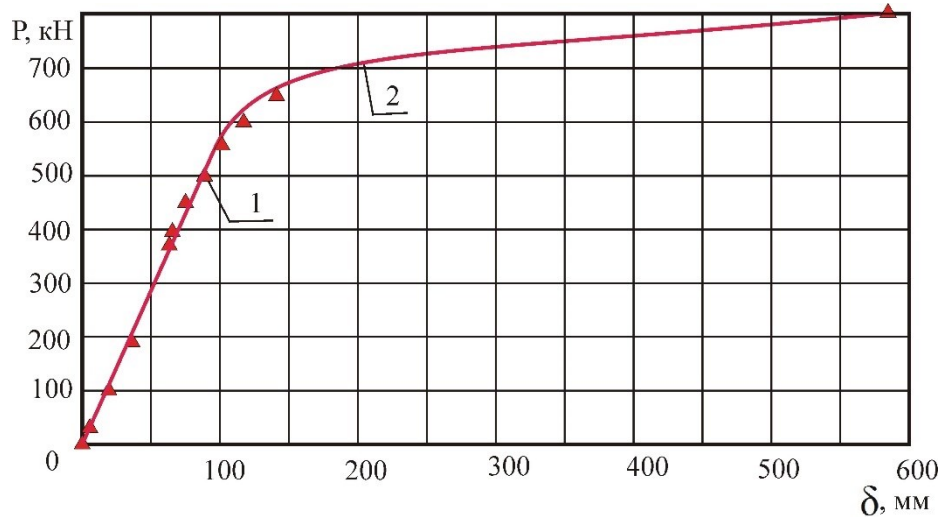


Рисунок 4.18 – Діаграма прогину δ на середині нижнього пояса ферми при різних навантаженнях

Знову ж таки навантаження $P=565$ кН є межею переходу від пружного до пластичного деформування нижнього пояса ферми.

За експериментальними чисельними значеннями максимальних напружень, які формувалися в нижньому поясові (табл. 4.1), побудовано діаграму залежності цих напружень від величини навантажень, які сприймала ферма (рис. 4.19).

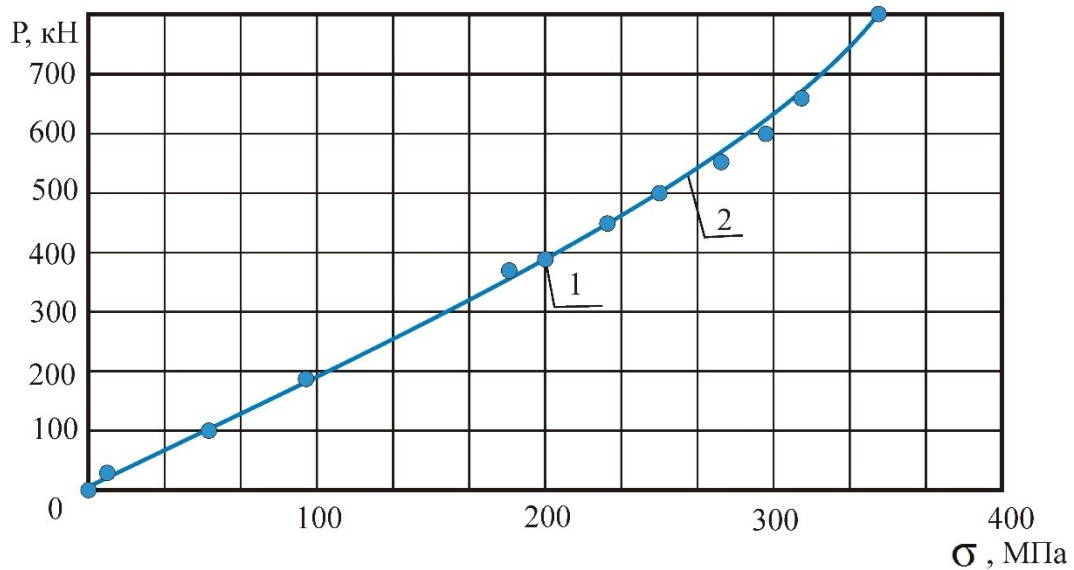


Рисунок 4.19 – Діаграма максимальних напружень σ в нижньому поясові ферми при різних навантаженнях

Отже, результати комп'ютерного моделюючого експерименту показали якісну та кількісну картину поведінки повномасштабної зварної ферми під впливом статичних навантажень різного рівня.

Максимальним допустимим навантаженням без впливу температурних чинників (за умов кімнатних температур) для досліджуваної ферми за результатами комп'ютерного моделюючого експерименту є $P_{max} = 565$ кН.

4.2 Міцність і деформівність зварної ферми при навантажуванні з підвищеною температурою

При дослідженні міцності і деформівності зварної прямокутної ферми за одночасного силового і температурного впливу в якості вхідного інформаційного забезпечення в комп'ютерному моделюванні використано експериментально отримані характеристики міцності сталі ВСт3пс при підвищеній температурі (табл. 4.2).

Таблиця 4.2 – Характеристики міцності сталі ВСт3пс при підвищеній температурі

Температура, °С	Вибіркове середнє значення	
	Межі міцності, $\overline{\sigma}_e$, МПа	Межі текучості, $\overline{\sigma}_T$, МПа
100	372	252
200	334	228
300	286	192
400	255	174
450	240	168
500	224	162
600	155	138

Саме зниження цих показників і визначає, в першу чергу, втрату міцності металоконструкції при підвищенні температури.

За описаною вище методикою комп'ютерним моделюючим експериментом отримано візуалізовану картину розподілу еквівалентних напружень по всіх конструктивних елементах зварної ферми (рис. 4.20) (поясах,

стійках, розкосах) для різних значень статичних навантажень при нагріванні до температури 200°C.

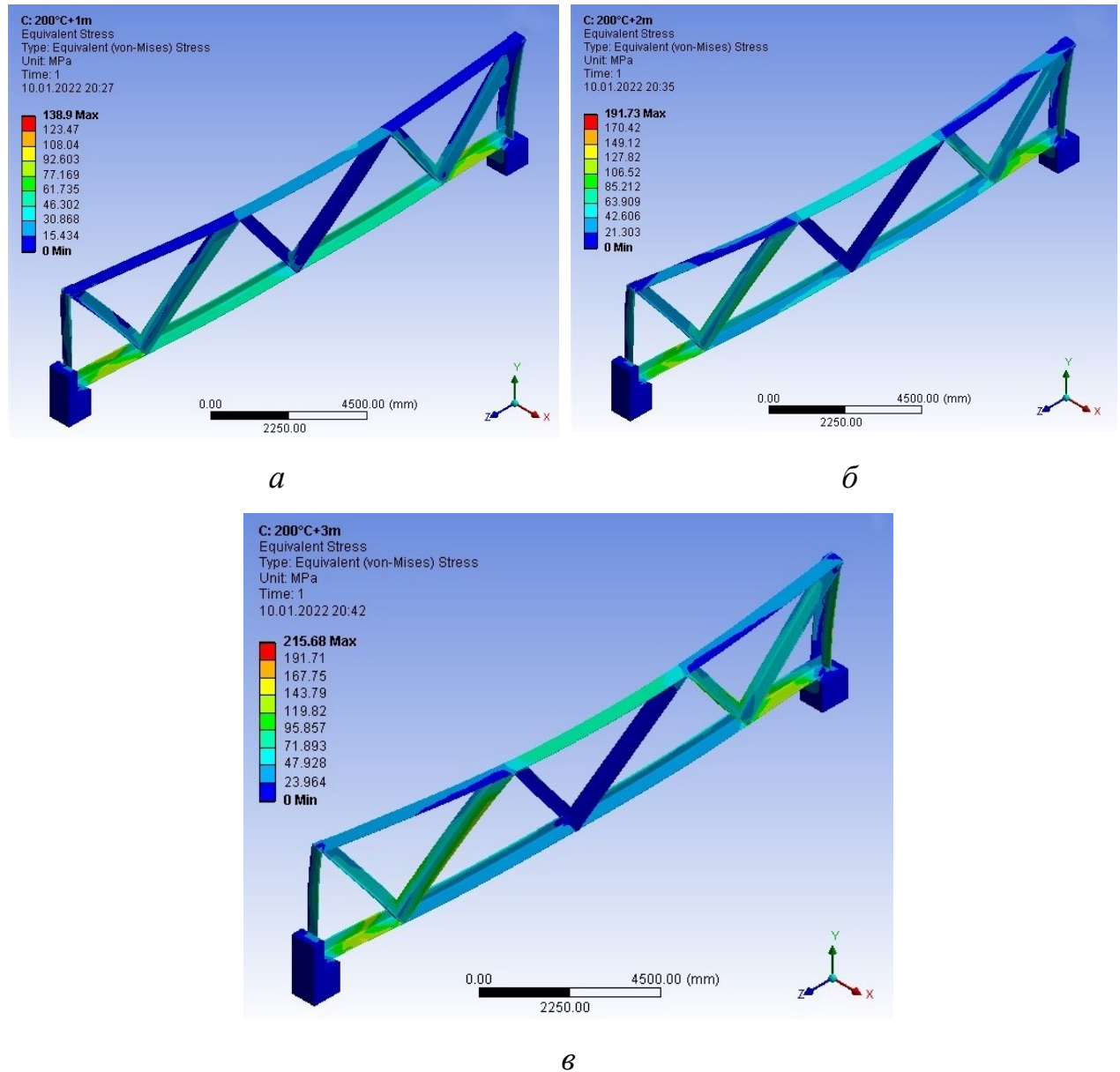


Рисунок 4.20 – Візуалізація розподілу еквівалентних напружень по елементах зварної ферми при нагріванні до 200°C та дії навантаження:

a – 100 кН; *б* – 200 кН; *в* – 300 кН

Аналогічним чином отримано візуалізовану картину розподілу нормальних напружень по всіх конструктивних елементах зварної ферми

(рис. 4.21) (поясах, стійках, розкосах) для різних значень статичних навантажень при нагріванні до температури 200°C.

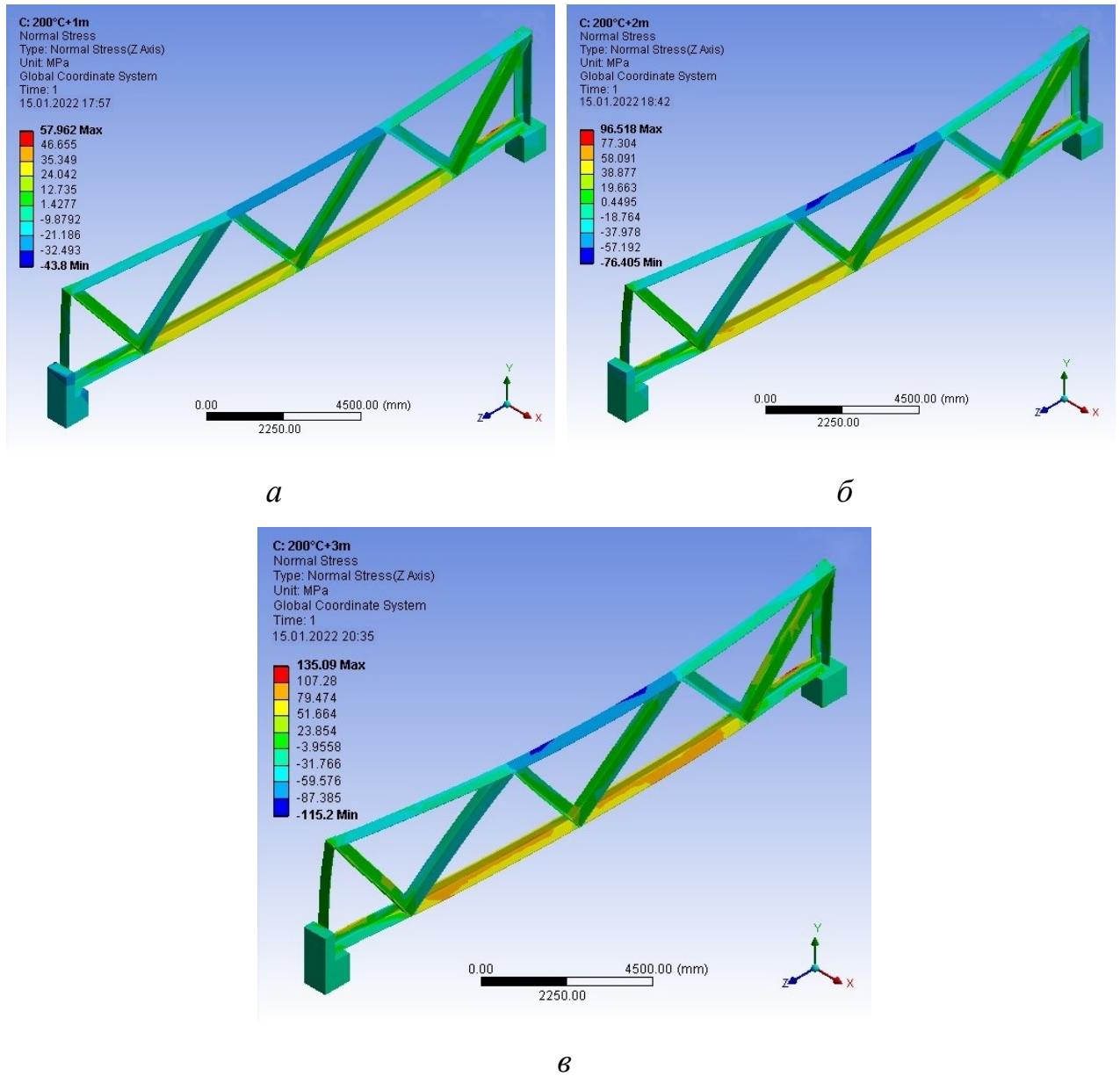


Рисунок 4.21 – Візуалізація розподілу нормальних напружень по елементах зварної ферми при нагріванні до 200°C та дії навантаження:

а – 100 кН; *б* – 200 кН; *в* – 300 кН

Для кількісного оцінювання показників НДС в конструктивних елементах ферми отримано розподіл нормальних напружень вздовж поясів, розкосів і

стійок ферми за різних статичних навантажень при підвищенні експлуатаційної температури до 200°C (рис. 4.22...4.31)

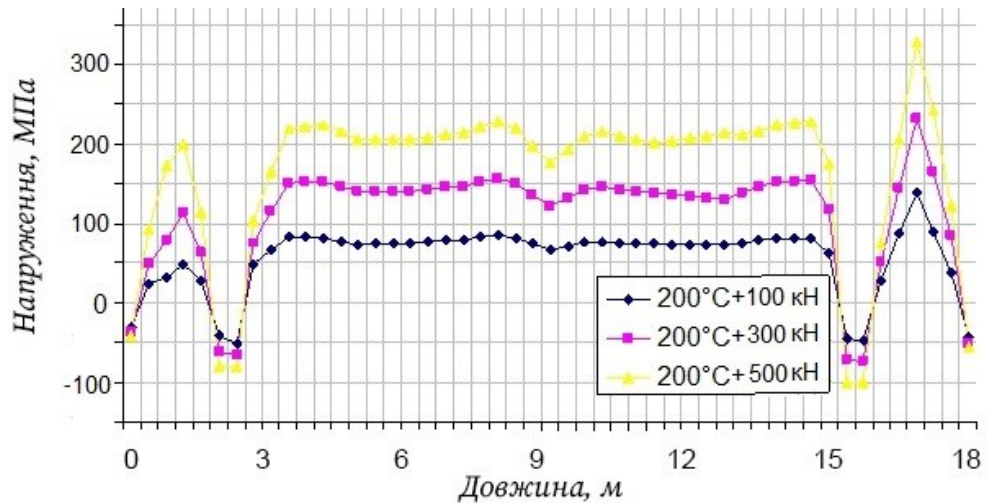


Рисунок 4.22 – Розподіл нормальних напружень вздовж нижнього пояса ферми за різних статичних навантажень при підвищенні експлуатаційної температури до 200°C

За рис. 4.22 очевидно, що місце формування максимальних напружень для нагрітої ферми не змінилося в порівнянні з холодною конструкцією (див. рис. 4.4)

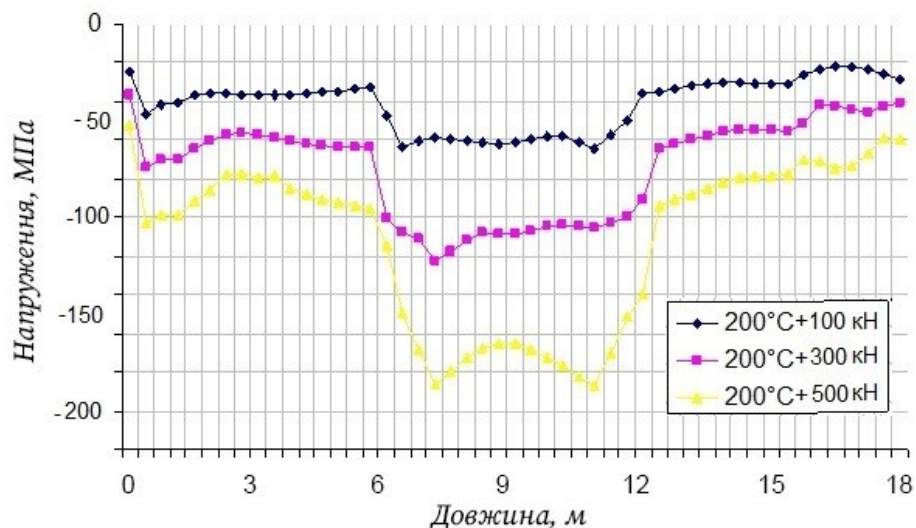


Рисунок 4.23 – Розподіл нормальних напружень вздовж верхнього пояса ферми за різних статичних навантажень при підвищенні експлуатаційної температури до 200°C

Аналогічна якісна картина спостерігається і при порівнянні розподілу напружень вздовж верхнього пояса (див. рис. 4.5).

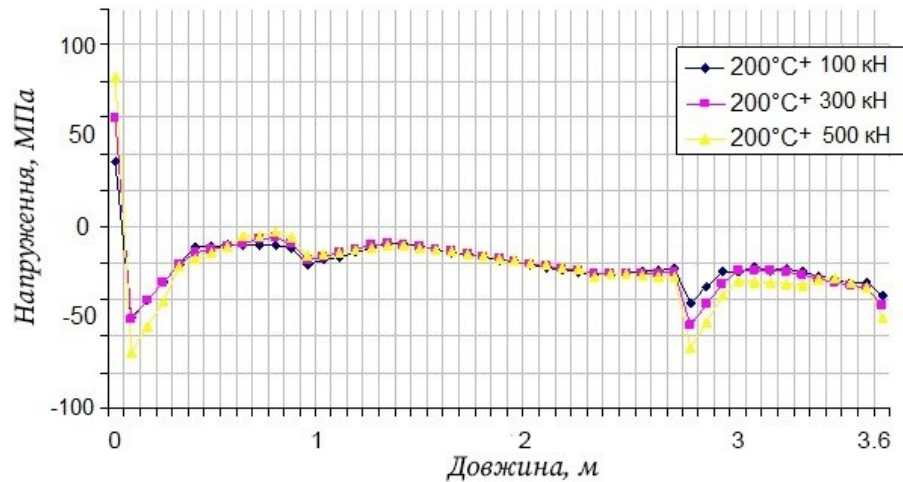


Рисунок 4.24 – Розподіл нормальних напружень вздовж лівої стійки ферми за різних статичних навантажень при підвищенні експлуатаційної температури до 200°C

При аналізі визначених в процесі моделювання напружень вздовж лівої стійки ферми (рис. 4.24) очевидно, що вони суттєво менші від границі текучості матеріалу і розглянуті навантаження не становлять загрози для міцності конструкції.

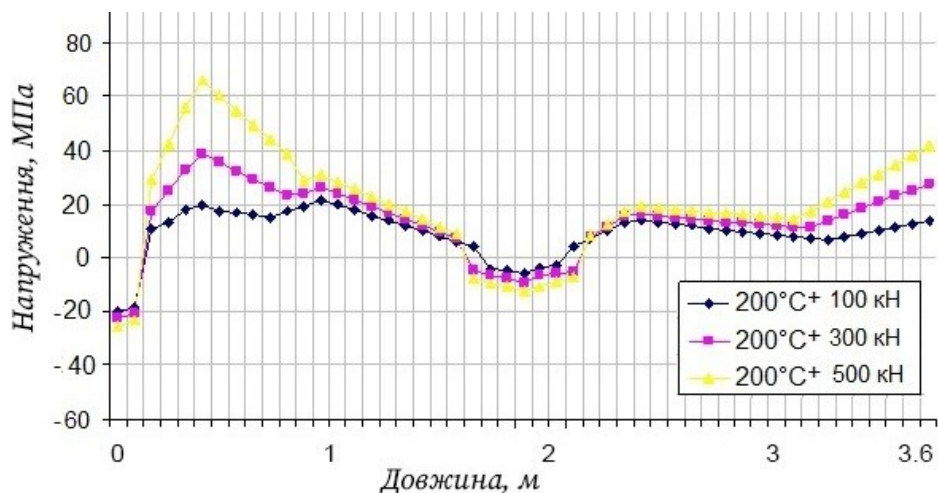


Рисунок 4.25 – Розподіл нормальних напружень вздовж правої стійки ферми за різних статичних навантажень при підвищенні експлуатаційної температури до 200°C

Аналогічні висновки можна зробити за рис. 4.25 щодо НДС вздовж правої стійки ферми за різних статичних навантажень при підвищенні експлуатаційної температури до 200°C.

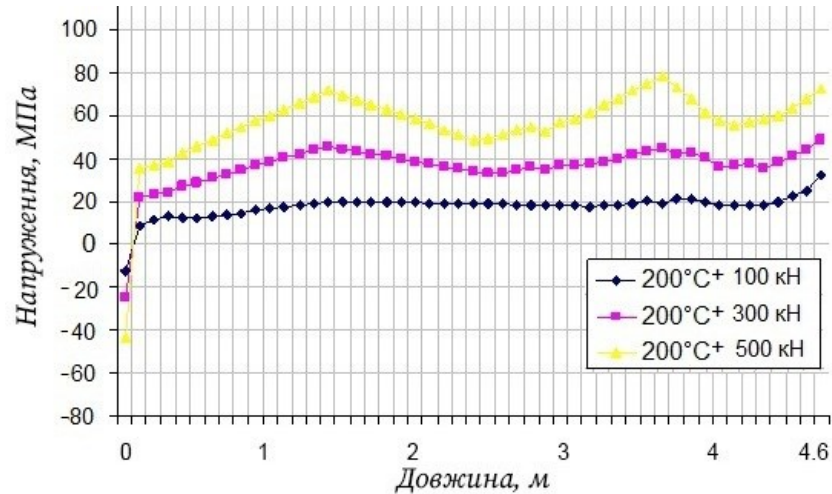


Рисунок 4.26 – Розподіл нормальних напружень вздовж 1-го розкосу ферми за різних статичних навантажень при підвищенні експлуатаційної температури до 200°C

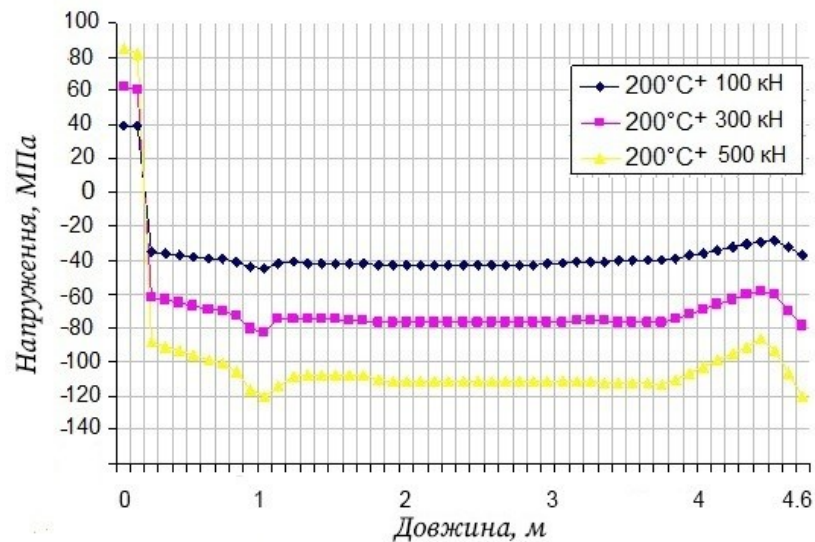


Рисунок 4.27 – Розподіл нормальних напружень вздовж 2-го розкосу ферми за різних статичних навантажень при підвищенні експлуатаційної температури до 200°C

Для формування напружень вздовж 1 і 2 розкосів напруження практично однакові по всій довжині за винятком при вузлових ділянках (рис. 4.26, 4.27).

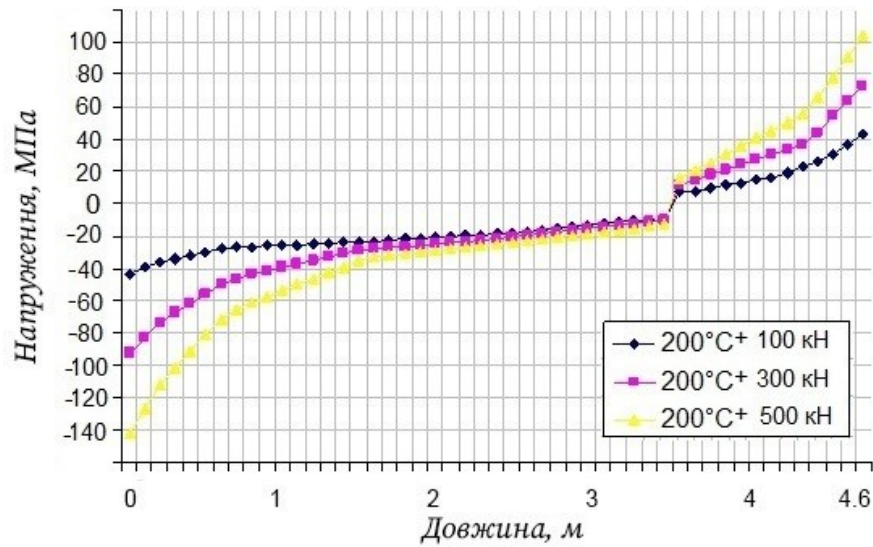


Рисунок 4.28 – Розподіл нормальних напружень вздовж 3-го розкосу ферми за різних статичних навантажень при підвищенні експлуатаційної температури до 200°C

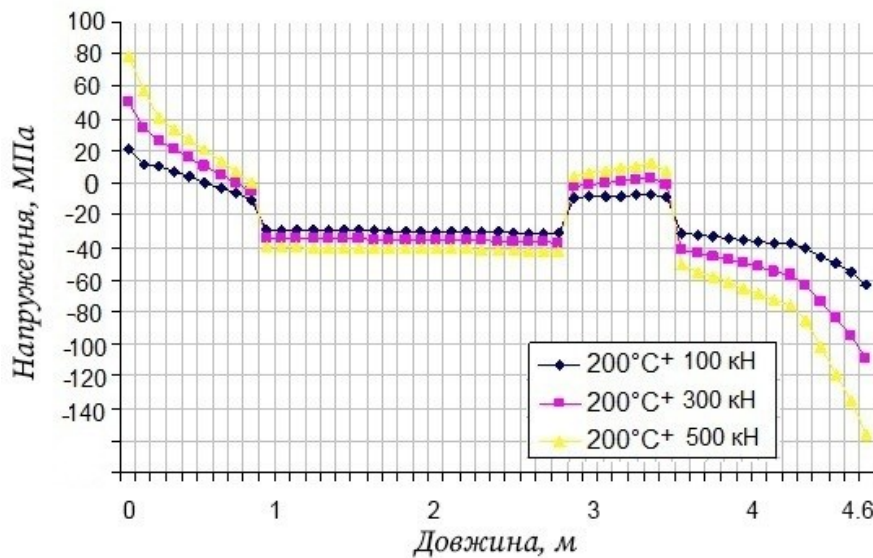


Рисунок 4.29 – Розподіл нормальних напружень вздовж 4-го розкосу ферми за різних статичних навантажень при підвищенні експлуатаційної температури до 200°C

Дещо складнішим є розподіл НДС вздовж 3 і 4 розкосів (рис. 4.28, 4.29). Однак напруження, які формуються в цих елементах, також є нижчими від границі текучості матеріалу ферми.

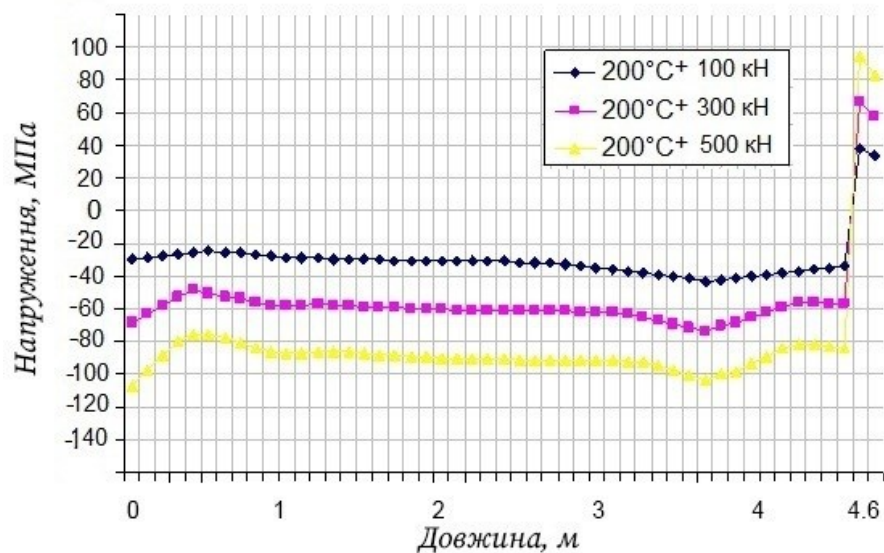


Рисунок 4.30 – Розподіл нормальних напружень вздовж 5-го розкосу ферми за різних статичних навантажень при підвищенні експлуатаційної температури до 200°C

Розподіл нормальних напружень вздовж 5-го розкосу ферми за різних статичних навантажень при підвищенні експлуатаційної температури до 200°C (рис. 4.30) аналогічний такому ж розподілу для 2 розкосу, лише обернений відносно вертикальної осі, як і розкоси 2 і 5 між собою. Отримані високі напруження в привузлових ділянках не виходять за границі текучості матеріалу при навантаженнях до 500 кН і не створюють небезпеки руйнування ферми.

Зовсім іншу ситуацію виявлено при порівнянні симетричних розкосів 1 і 6 (рис. 4.26 і 4.30). При геометричній симетричності самих конструктивних елементів, картина розподілу нормальних напружень вздовж цих розкосів за різних статичних навантажень при підвищенні експлуатаційної температури до 200°C є різною. Причиною цього, очевидно, є вибрана схема базування

конструкції, де один опорних вузол забезпечує горизонтальні переміщення, а інший їх не допускає.

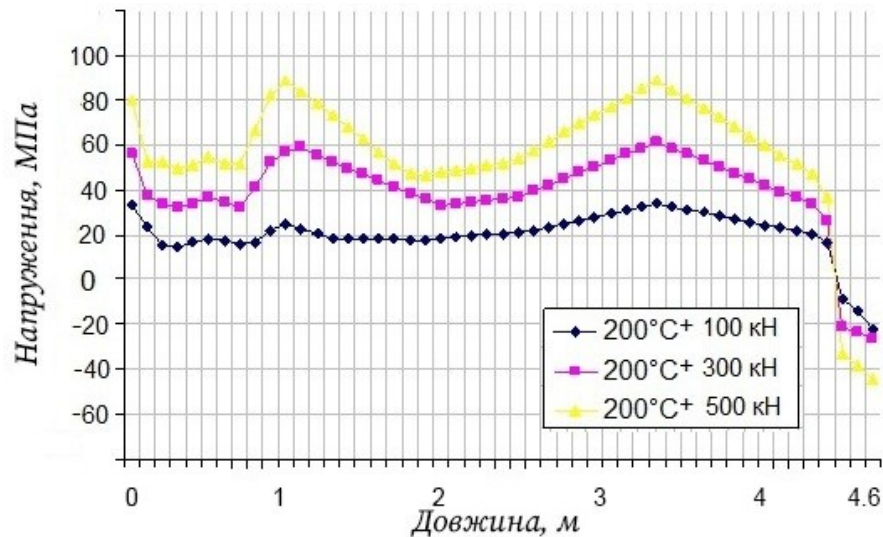


Рисунок 4.31 – Розподіл нормальних напружень вздовж 6-го розкосу ферми за різних статичних навантажень при підвищенні експлуатаційної температури до 200°C

Для всіх розглянутих конструктивних елементів якісна картина щодо параметрів міцності й деформівності співпадають з відповідними елементами холодної ферми. Звичайно, що граничні навантаження зменшуються, оскільки при нагріванні знижується границя текучості матеріалу і до напружень від зовнішніх навантажень додаються напруження від температурних деформацій за рахунок лінійного теплового розширення стержнів.

4.3 Міцність і деформівність навантаженої зварної ферми при пожежно-аварійній температурі

Для всієї зварної прямокутної ферми виконано комп'ютерний моделюючий експеримент за умов пожежно-аварійної температури 425 °C і

одночасно прикладеного навантаження згідно передбаченої схеми (рис. 2.3) величинами 100 кН і 230 кН та з врахуванням власної ваги конструкції.

За результатами моделювання отримано візуалізовану якісну картину розподілу еквівалентних напружень по конструктивних елементах ферми (рис. 4.32).

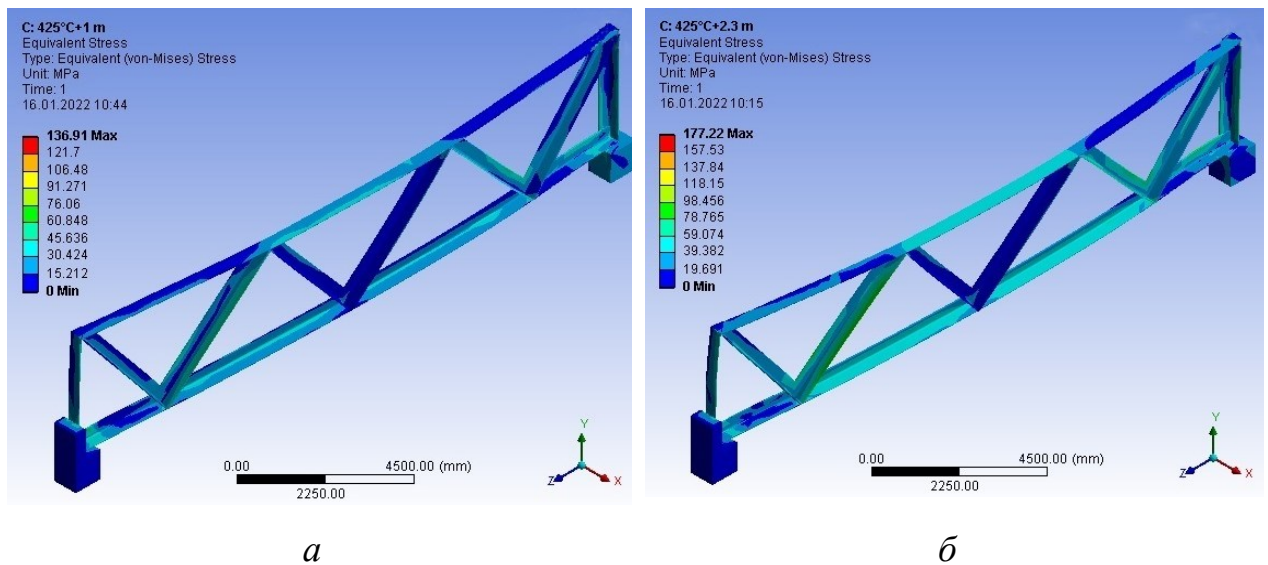


Рисунок 4.32 – Візуалізація розподілу еквівалентних напружень по елементах зварної ферми при нагріванні до 425^oC та дії навантаження:

a – 100 кН; *б* – 230 кН

Очевидним є факт локалізації максимальних розтягуючих напружень вздовж нижнього пояса ферми і стискаючих в середній частині верхнього пояса.

Подібну візуальну картину отримано і для розподілу нормальних напружень по елементах зварної ферми при нагріванні до 425^oC та дії навантажень 100 кН і 230 кН (рис.4.33) . Однак тут вже виділяється ділянка з максимальними напруженнями на нижньому поясові між правим опорним і проміжним вузлами.

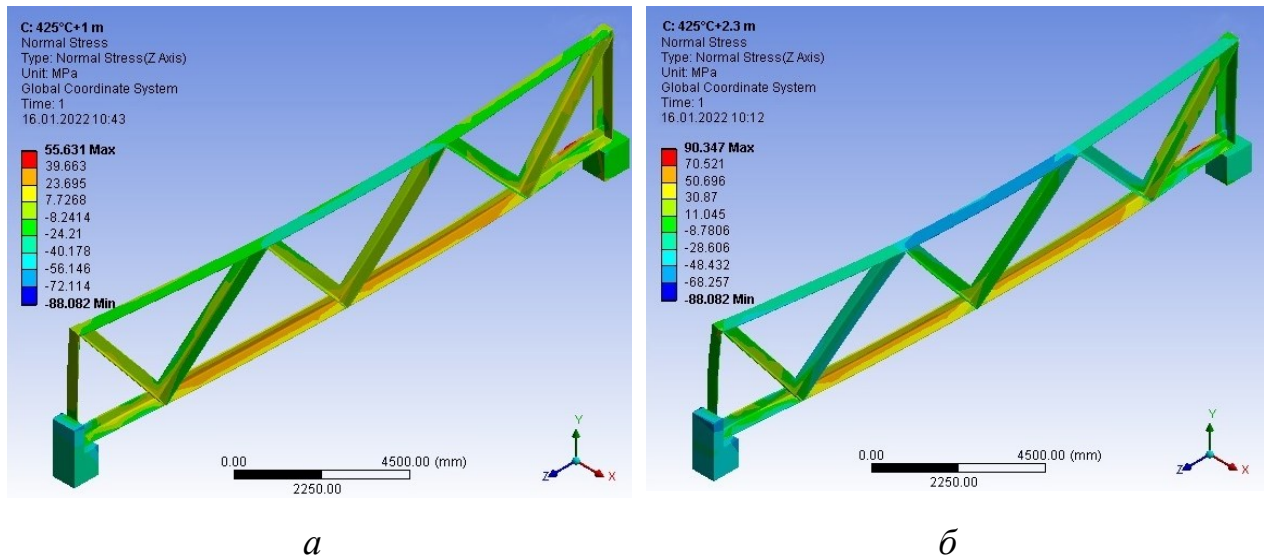


Рисунок 4.33 – Візуалізація розподілу нормальних напружень по елементах зварної ферми при нагріванні до 425^oC та дії навантаження:
 а – 100 кН; б – 230 кН

Детально продемонстровано нормальні напруження у вигляді графіків (рис. 4.34...4.43) для кожного елемента зварної прямокутної ферми (поясів, стійок, розкосів).

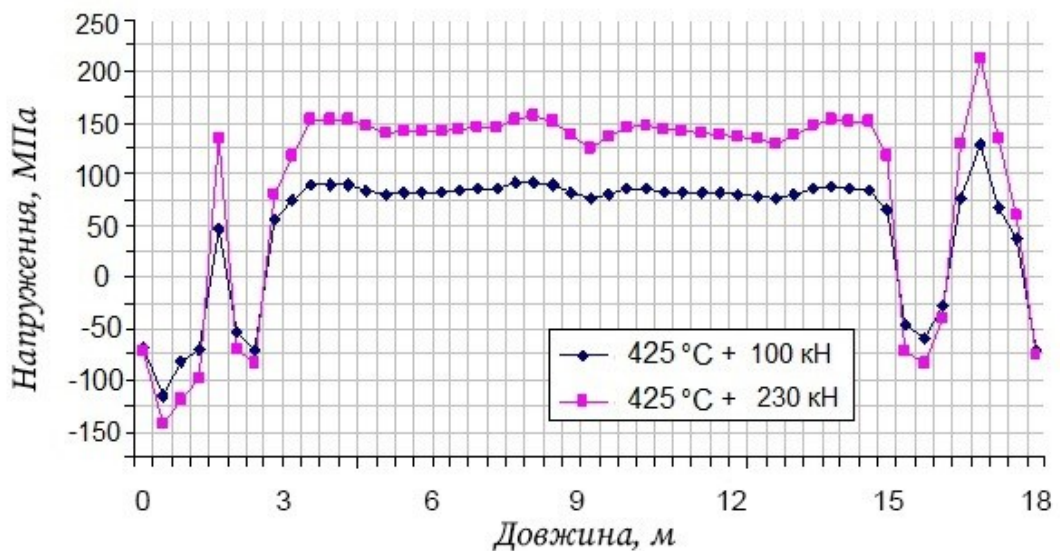


Рисунок 4.34 – Розподіл нормальних напружень вздовж нижнього пояса ферми за різних статичних навантажень при пожежно-аварійній температурі 450^oC

Як і у випадку візуалізації розподілу напружень (рис. 4.33) так і за чисельним розподілом нормальних напружень вздовж нижнього пояса ферми за різних статичних навантажень при пожежно-аварійній температурі 450°C (рис. 4.34) виявлено, що максимальні напруження локалізуються в нижньому поясові на ділянці між опорним і проміжним вузлами з боку шарнірно-рухомої опори. Причому їх чисельні значення перевищують границю міцності матеріалу і формуватимуть настання граничного стану для досліджуваної конструкції.

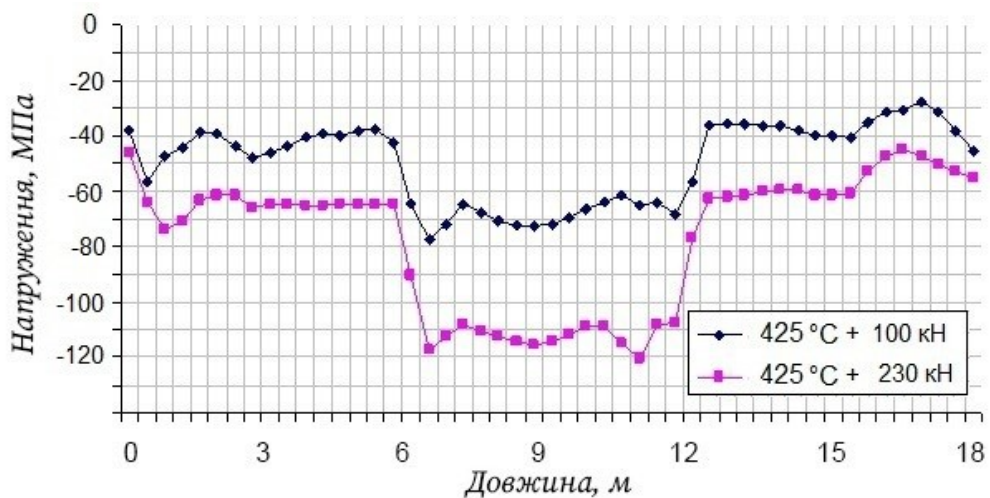


Рисунок 4.35 – Розподіл нормальних напружень вздовж верхнього пояса ферми за різних статичних навантажень при пожежно-аварійній температурі 450°C

Отримано розподіл нормальних напружень вздовж лівої (рис. 4.36) і правої (рис. 4.37) стійок ферми за різних статичних навантажень при пожежно-аварійній температурі 450°C . Візуально розподіли відрізняються між собою, але за амплітудними значеннями розтягуючих і стискаючих напружень вони близькі. Рівень напружень, які формуються в стійках при навантажуванні ферми зусиллям 230 кН, не є небезпечним для конструкції з точки зору її міцності.

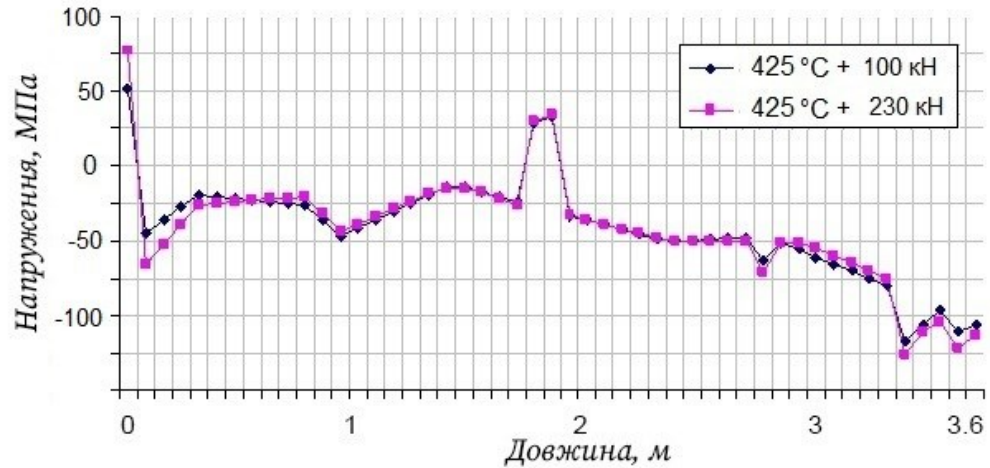


Рисунок 4.36 – Розподіл нормальних напружень вздовж лівої стійки ферми за різних статичних навантажень при пожежно-аварійній температурі 450°C

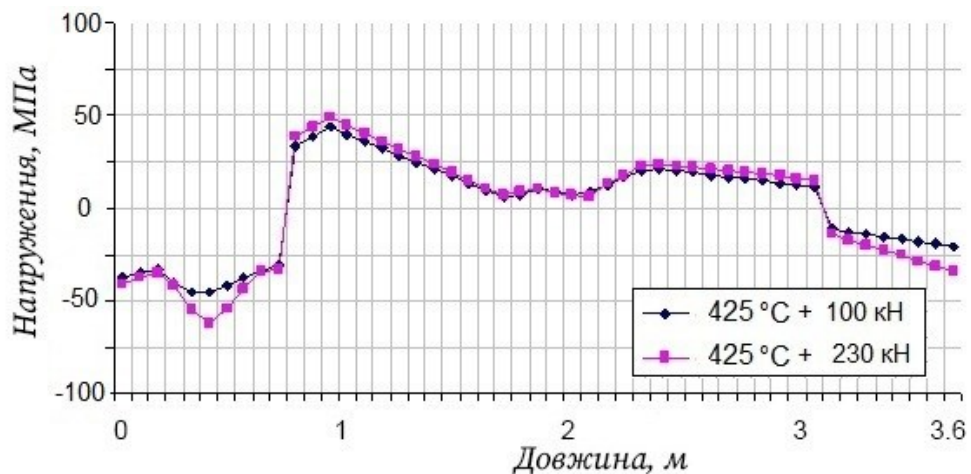
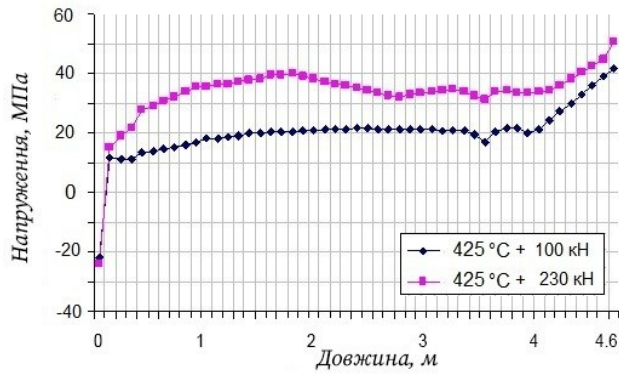
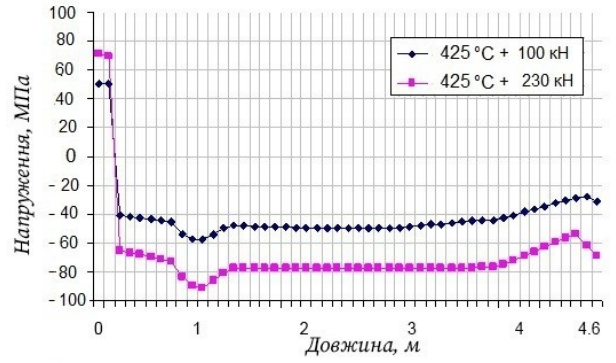


Рисунок 4.37 – Розподіл нормальних напружень вздовж правої стійки ферми за різних статичних навантажень при пожежно-аварійній температурі 450°C

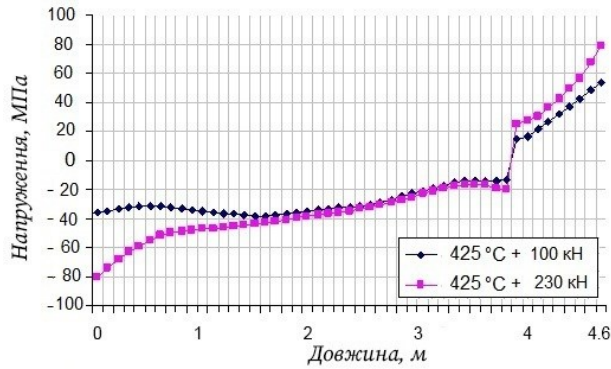
Виявлено розподіл нормальних напружень вздовж кожного з шести розкосів ферми за статичних навантажень 100 і 230 кН при пожежно-аварійній температурі 450°C (рис. 4.38). В усіх розкосах мають місце як розтягуючі, так і стискаючі напруження, але, як і у випадку зі стійками, значення їх суттєво нижчі за границю текучості матеріалу і вони не формують пошкоджуючого впливу на ферму.



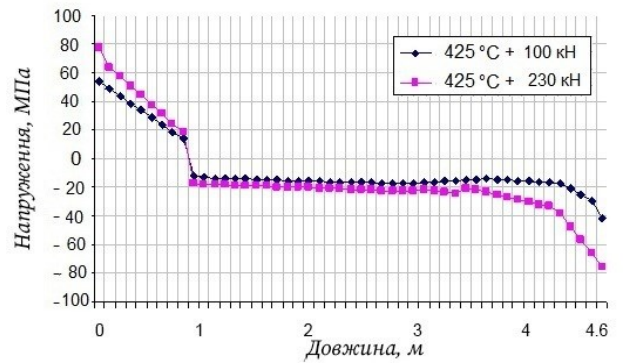
а



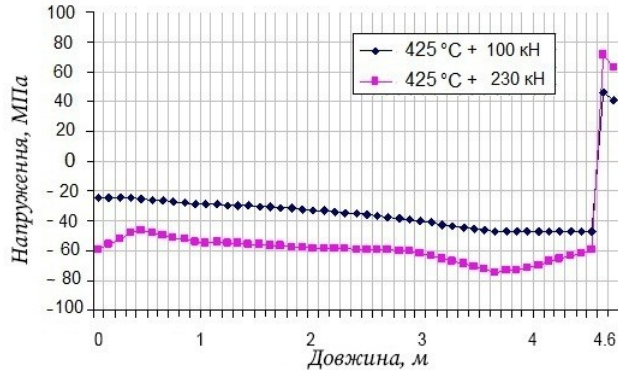
б



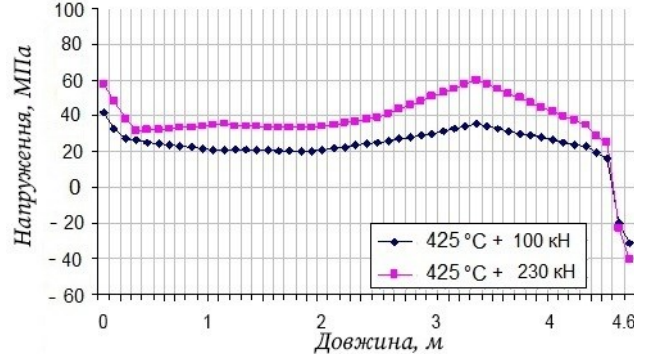
в



г



д



е

Рисунок 4.38 – Розподіл нормальних напружень вздовж розкосів ферми за різних статичних навантажень при пожежно-аварійній температурі 450°C :

а – першого; б – другого; в – третього; г – четвертого; д – п'ятого; е – шостого

Отримані результати підлягають аналізу і узагальненню.

4.4 Вплив температури на міцність і деформівність зварної ферми 18000x3600

За результатами аналізу отриманих розподілів напружень виявлено, що максимальні їх значення локалізуються в нижньому поясові. Саме нижній пояс для досліджуваної ферми визначає міцність і деформівність конструкції в цілому. Для виявлення особливостей деформування нижнього пояса зварної прямокутної ферми при різних температурах за результатами моделювання побудовано діаграму загального видовження Δl нижнього пояса ферми (рис. 4.39) та прогину δ на його середині (рис. 4.40) при статичному навантаженні за умов 20°C, 200°C і 450°C.

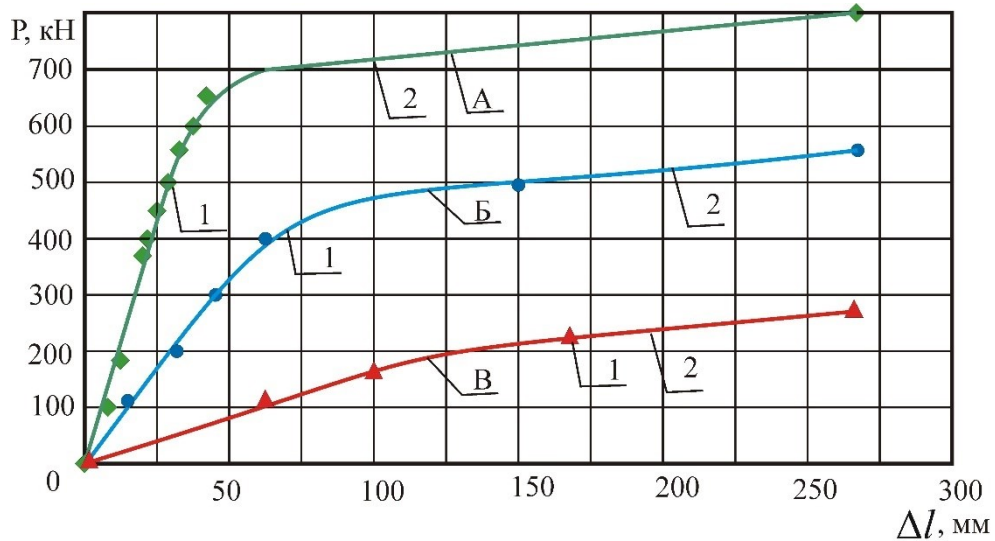


Рисунок 4.39 – Діаграма загального видовження Δl нижнього пояса ферми при навантаженні за умов: А – 20°C; Б – 200°C; В – 450°C

На цих і наступних діаграмах: 1 – експериментальні точки, 2 – результат лінійної апроксимації експериментальних даних. За діаграмами виділяються ділянки пружного й пластичного деформування нижнього пояса для кожної з розглянутих температур.

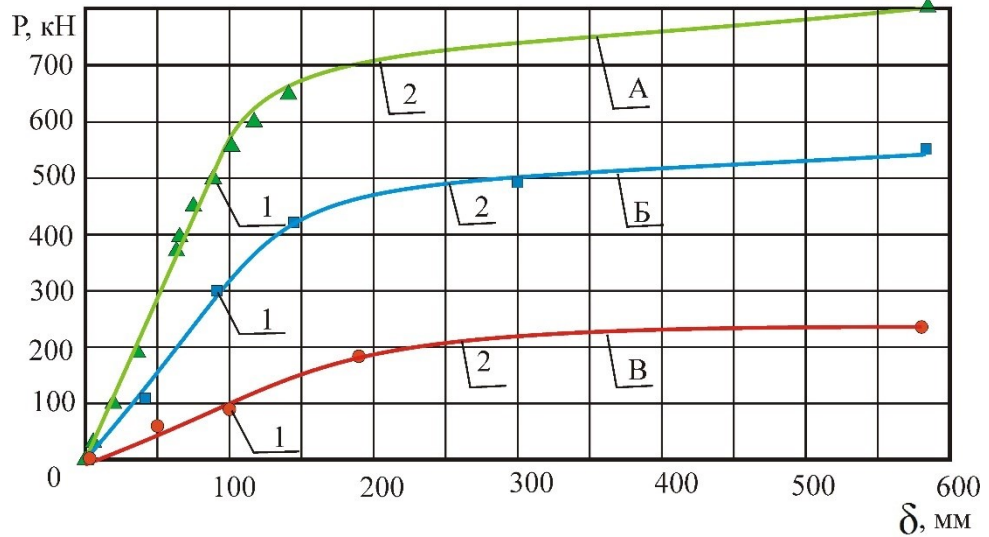


Рисунок 4.40 – Діаграма прогину δ на середині нижнього пояса ферми при навантажуванні за умов: А – 20°C; Б – 200°C; В – 450°C

Побудовано діаграму максимальних напружень σ в нижньому поясові ферми при навантажуванні за умов 20°C, 200°C і 450°C (рис. 4.41), а на підставі неї залежності міцності зварної прямокутної ферми 18000x3600 від температури (рис. 4.42).

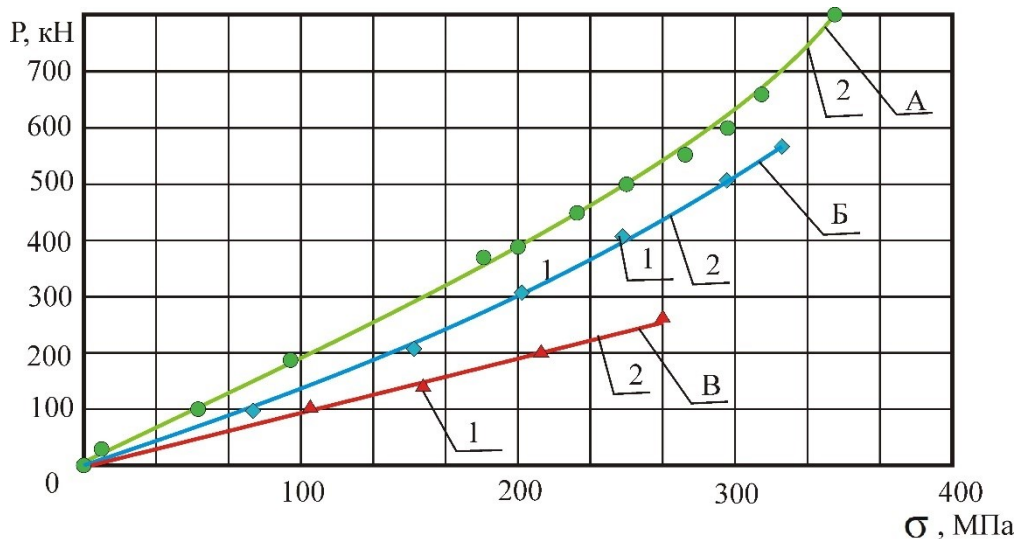


Рисунок 4.41 – Діаграма максимальних напружень σ в нижньому поясові ферми при навантажуванні за умов: А – 20°C; Б – 200°C; В – 450°C

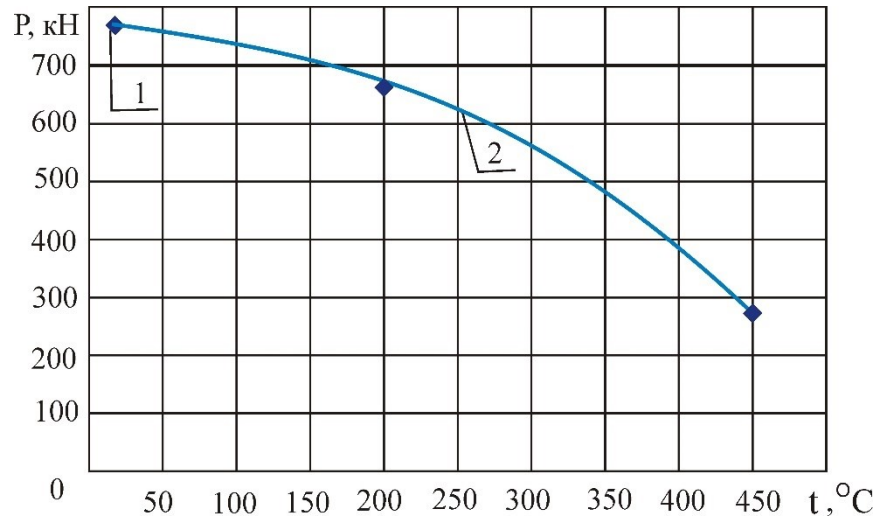


Рисунок 4.42 – Вплив температури на міцність зварної прямокутної ферми 18000x3600

Для умов експлуатації важливим буде залежність, за якою змінюється несуча здатність зварної прямокутної ферми 18000x3600 в межах її пружного деформування при підвищенні температури від кімнатної аж до пожежної (рис. 4.43).

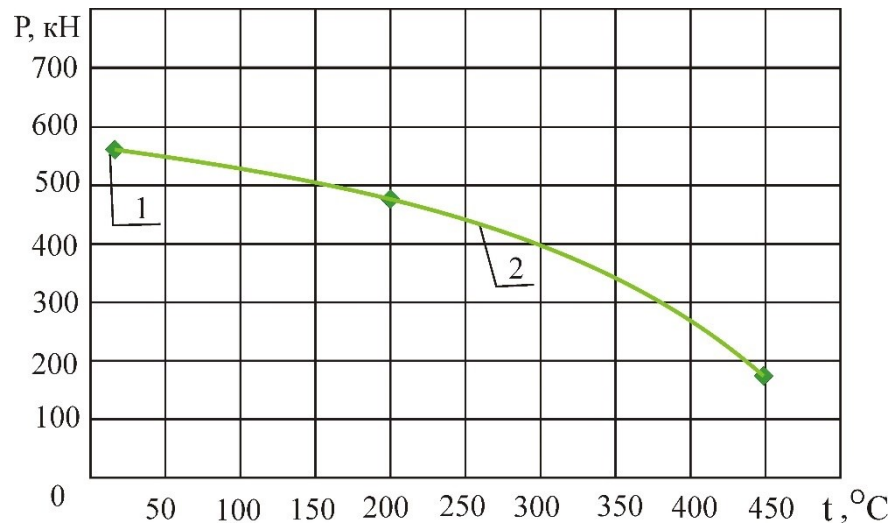


Рисунок 4.43 – Вплив температури на несучу здатність зварної прямокутної ферми 18000x3600 в межах її пружного деформування

Очевидно, що ця залежність не є лінійною. Для практичного застосування зручнішою була б не графічна, а аналітична залежність, яка б давала можливість передбачити максимальне навантаження на ферму на межі її граничного стану.

4.5 Аналітичний опис міцності ферми при дії силових і температурних впливів

З точки зору прогнозування умов експлуатації ферми до настання граничного стану з отриманих графічних залежностей найбільше заслуговує уваги вплив температури на несучу здатність зварної прямокутної ферми 18000x3600 в межах її пружного деформування (рис. 4.43). Саме вичерпування пружної деформації і зумовлює настання граничного для цієї конструкції. При вищих навантаженнях пластична деформація стає незворотною, а це, в свою чергу, формує втрату стійкості стержнів і руйнування ферми.

Для практичного застосування при проектуванні такого типу ферм та для прогнозування поведінки існуючих ферм при сумісній дії навантаження і температури (технологічної чи пожежної) за результатами виконаних досліджень розроблено аналітичну залежність у вигляді емпіричної формули. При розробленні цієї формули взято до уваги отриману графічну залежність на рис. 4.43. За її конфігурацією очевидно, що в загальному вигляді її можна описати показниковою функцією типу

$$y=A - BC^x, \quad (4.1)$$

де x і y – змінні значення аргументу і функції, A , B і C – константи для даної залежності.

Для нашого випадку аргументом x буде значення температури t , а функцією y – навантаження P , яке формує граничний стан ферми при цій температурі.

При обробці результатів моделювання за рис. 4.43 і загального аналітичного опису (4.1) визначено константи A , B і C . В результаті цього загальна залежність (4.1) набула конкретного вигляду (4.2):

$$P_{max(t)} = P_{max20} + 55,25 - 50 \cdot 1,005^t, \text{ кН}, \quad (4.2)$$

де $P_{max(t)}$ – максимальне навантаження, яке здатна витримати ферма при температурі t в діапазоні від 20 до 450°C; P_{max20} – максимальне навантаження, яке здатна витримати ферма при силовому впливі за умов кімнатної температури; t – значення температури в діапазоні від 20 до 450°C, для якої визначають тримкість ферми.

Значення максимальних навантажень, які здатна витримати ферма при температурі t в діапазоні від 20 до 450°C, визначені за залежністю (4.2) для дискретних температур подано в табл. 4.4.

Таблиця 4.4 – Максимальні навантаження, які здатна витримати ферма при різних температурах t , визначені за залежністю (4.2)

Температура t , °C	20	100	200	300	400	450
Навантаження $P_{max(t)}$, кН	565	538	485	397	252	149

Побудовано суміщений графік результатів (рис. 4.44) комп'ютерного моделюючого експерименту (рис. 4.43) і аналітичних розрахунків за залежністю (4.2), зведених в табл. 4.4.

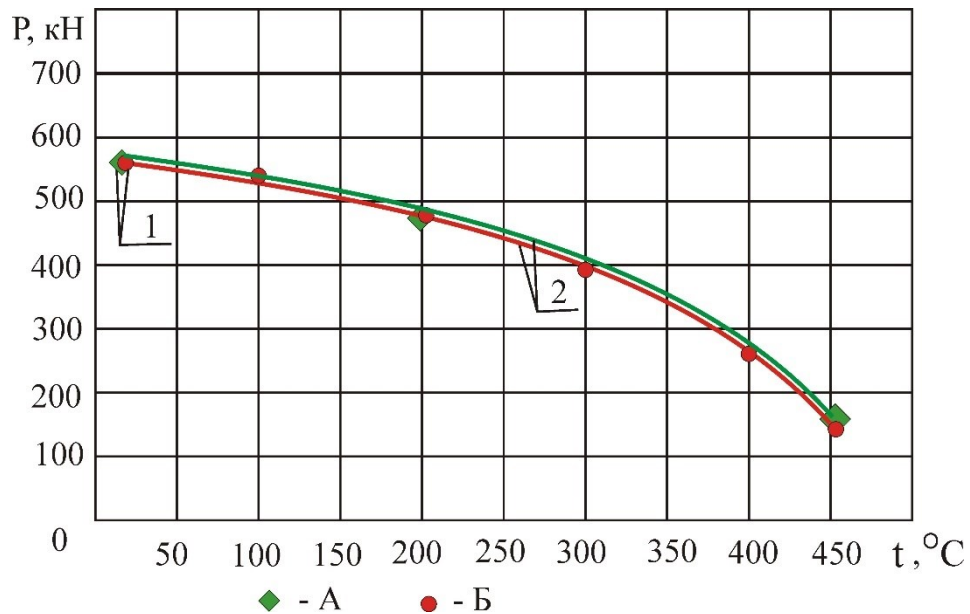


Рисунок 4.44 – Суміщені графіки результатів комп'ютерного моделюючого експерименту (точки А) і аналітичних розрахунків (точки Б) для визначення максимально допустимого навантаження на зварну ферму при дії силових і температурних впливів: 1 – розрахункові точки; 2 – лінійна апроксимація результатів

При побудові суміщених графіків результатів комп'ютерного моделюючого експерименту і аналітичних розрахунків для визначення максимально допустимого навантаження на зварну ферму при дії силових і температурних впливів (рис. 4.44) відбулося практично повне співпадання ліній. Однак для візуалізації процесу суміщення умовно лінії розведено на мінімальну віддаль. При кількісному порівнянні значень $P_{max(t)}$, визначених комп'ютерним моделюючим експериментом і аналітичним розрахунком за запропонованою залежністю (4.2) отримано співпадання результатів на рівні 97,6...98,2%.

Отриману залежність (графічну чи аналітичну) доцільно використовувати при проектуванні чи експлуатації ферм для визначення максимально допустимих навантажень на конструкцію за умов підвищених температур.

4.6 Висновки до розділу 4

Для виявлення міцності і деформівності зварної прямокутної ферми при дії силових і температурних впливів виконано комп'ютерний моделюючий експеримент для повномасштабної ферми 18000x3600. За результатами експерименту:

- отримано візуальну і чисельну інформацію про розподіл напружень для всіх конструктивних елементів ферми;
- виявлено, що максимальні напруження при навантажуванні ферми локалізуються в нижньому поясов тому саме його поведінка визначає поведінку ферми в цілому;
- побудовано серію графічних залежностей, які характеризують міцність і деформівність ферми при її навантажуванні за різних температур;
- розроблено аналітичну залежність, яка дає можливість визначити значення гранично допустимого навантаження на ферму при температурах до 450⁰С за відомим значенні цього навантаження для умов кімнатної температури;
- дано рекомендації для практичного застосування результатів досліджень.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Для виявлення особливостей деформування і руйнування зварної прямокутної ферми при дії силових і температурних впливів виконано комплексне дослідження, яке включало напівнатурні і комп'ютерні моделюючі експерименти. При цьому:

- для дослідження розроблено конструкцію прямокутної зварної ферми 18000x3600 мм та її фізичних моделей 600x120 і 2000x400;
- розроблено методики і проведено напівнатурні експериментальні дослідження для визначення поведінки зварної підкрюв'язної ферми при сумісному силовому і температурному впливові;
- розроблено методики і виконано серію комп'ютерних моделюючих експериментів і виявлено кінетику деформування та умов настання граничного стану зварної підкрюв'язної ферми при різних рівнях силових і температурних впливів з використанням програмного пакету Ansys;
- виконана верифікація результатів комп'ютерного моделюючого експерименту і отримано ступінь співпадання для отриманих показників не нижче за 90%;
- отримано інформаційні масиви для значень міцності і деформівності зварної ферми в залежності від температури в графічному і табличному вигляді;
- розроблено аналітичну залежність для визначення тримкості ферми при температурах до 450^oC при відомій тримкості за кімнатних умов;
- сформульовано рекомендації для практичного застосування результатів досліджень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Khdeir A. A. Thermal effects on the response of crossply laminated shallow shells. *Int. J. Solids and Struct.* –1992. – 29, No5. – P. 653-667.
2. Lin T.J, Huang C.W, and Yang, Y.B .”Inelastic Thermal Analysis of Preloaded Steel Trusses Undergoing Heating and Cooling Stages.” *J. Eng. Mech.* – 2012. – 138(5). – P468–477.
3. Chen L.-W. ,Chen L.-Y. .Thermal deformation and stress analysis of composite laminated plates by finite element method. *.Comput. and Struct.* – 1990. – 35, No 1. – p.41.
4. Rand O., Givoli D. Thermal analysis of space trusses including threedimensional, *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, Vol. 2 Iss: 2. – P.115 – 125..
5. Лобанов Л.М. Зварювальні будівельні конструкції / Лобанов Л.М., Махненко В.І., Труфяков В.І. – К.: Наук. Думка, 2005 – 416 с.
6. Нілов О.О., Пермяков В.О., Шимановський О.В., Білик С.І., Лаврінченко 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.
7. Nussbaumer A. Size effects in the fatigue behavior of welded steel tubular bridge joints (2008). A. Nussbaumer, A. L. Costa Borges. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*. №10. P. 740–748.
8. Fatigue life evaluation of welded joints in steel bridge considering residual stress (2019). C. Chuang, Z. Qinghua, B. Yi et al.. // *Journal of Constructional Steel Research* Volume. №153. P. 509–518.
9. Fatigue life assessment of large scale T-jointed steel truss bridge components (2017). C. Shun Yao, C. Weizhen, M. Mohammad et al. *Journal of Constructional Steel Research*. №153. P. 499–509.
10. Kattis M.A. Thermoelastic plane problems with curvilinear boundaries. *Acta mech.* –1991. – 87, No1-2. – P.93-103.

11. F. Hart, W. Henn, H. Sontag «Stahl bau atlas»: Institut für Internationale Architektur-Dokumentation. München, 1974. — 399 s.
12. D.D. Özberk, Cost Comparative Analysis of Passive Fire Protection Methods in Steel Structures Systems (MSc thesis), Pamukkale University, Science Institute, Denizli, Turkey, 2010.
13. Стороженко Л.І., Клименко Ф.Є., Барабаш В.М. Металеві конструкції / Ф.Є. Клименко: Підручник. – 2-е вид., випр. і доп. – Львів: Світ, 2002. – 312 с.: 320 іл.
14. Adelman H.M., Narayanaswami R. Resizing procedur for optimum design of structures under combined mechanical and thermal loading // NASA TM X — 72816, Van.-1976.
15. Семко О.В., Пашинський В.В. Методика експериментальних досліджень впливу температури атмосферного повітря на елементи відкритих металевих конструкцій // Науково-технічний збірник № 90. – Донецьк, 2009. – С. 164-168
16. Schumacher, A. and Nussbaumer, A., (2006). Experimental study on the fatigue behavior of welded tubular k-joints for bridges. Engineering Structures and Designing Procedures Of The Tubular Truss Beams Welded Joints According With En 1993-1-8. Vol. 28, P. 745–755..
17. Югов А.М., Москаленко В.І., Іхно Г.В., Миронов А.М. Дослідження параметрів НДС металевого каркасу ванної скловарної печі під час впливу підвищених температур // Вісник ДонНАБА: Будівельні конструкції будівель та споруд: проектування, виготовлення, реконструкція та обслуговування. - 2009. - № 3, т. 15.
18. H. Remes. Influencing factors on fatigue strength of welded thin plates based on structural stress assessment. Engineering, Materials Science. - 18 Jan. 1998
19. Lin T.J, Huang C.W, and Yang, Y.B . "Inelastic Thermal Analysis of Preloaded Steel Trusses Undergoing Heating and Cooling Stages." J. Eng. Mech. – 2012. – 138(5). – P468–477.

20. Chen L.-W., Chen L.-Y. Thermal deformation and stress analysis of composite laminated plates by finite element method. *Comput. and Struct.* – 1990. – 35, No 1. – p.41.
21. Rand O., Givoli D. «Thermal analysis of space trusses including three-dimensional», *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, Vol. 2 Iss: 2. – P.115 – 125.
22. Ковальчук Я. О., Шингера Н. Я., Качка О. І. Моделювання напружено-деформованого стану кроквяної ферми: «Прогресивні матеріали та технології в машинобудуванні, будівництві та транспорті»: тези доп. III наук.-техн. конф. мех.-техн. ф-ту Тернопільського нац. тех. ун-ту ім. І. Пулюя (м. Тернопіль, 21 трав. 2015 р.). Тернопіль, 2015. С. 17.
23. 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. Тернопіль, 2012. 166 с.
24. Басара М.А. «Пошкодження і руйнування К-подібних вузлів плоских зварних ферм». – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису. дис. 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.
25. Шингера Н., Ковальчук Я. Статистична оцінка властивостей сталі ВСтЗпс на ділянці термічного впливу від зварного шва: тези доп XIV наук. конф. Тернопільського нац. тех. ун-ту ім. І. Пулюя (27–28 жовт. 2010 р.). Тернопіль, 2010. С. 59.
26. Ковальчук Я. О., Шингера Н. Я., Рибачок О. І. Деформування зварної будівельної ферми при статичних навантаженнях. *Вісник ТНТУ ім. Івана Пулюя*. 2014. № 1. С. 28–34.
27. Ясній П. В. Ковальчук Я. О., Шингера Н. Я., Рибачок О. І. Верифікація результатів моделювання напружено-деформованого стану зварної ферми.

Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій: зб. наук. статей / за заг. ред. Лучка Й. Й. Львів: Каменяр, 2014. Вип. 10. С. 461–471.

28. 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

29. Watkinson F. The fatigue strength of welded joints in high-strength steels and methods for its improvement', Proc. Conf. on Fatigue of Welded Structures'. TWI, Abington, Cambridge, 1991.

30. Basara M., Kovalchuk Y., Shynhera N., 2017. Construction of welded truss nodes using Ansys Software complex. Scientific Journal of TNTU. 82(2). 44–48.

31. Shved Y., Kovalchuk Y., Shynhera N., Voronchak V., 2020. Fatigue damage of the heel joint of welded roof truss. Scientific Journal of TNTU. 99(3). 28–33.

32. Blom A., 1995. Spectrum fatigue behaviour of welded joints. Int. J. of Fatigue. 17(7). 485-491.

33. Dawe J., Liu Y., Li J., 2010. Strength and behaviour of cold-formed steel offset trusses. Journal of Constructional Steel Research, 66(4).556-565.

34. Dubey S., Sangamnerkar P., Soni P., 2012. Analysis of steel roof trusses under normal permeability condition, International Journal of Advanced Engineering Research and Studies. 1(4). 8-12. Garg V, Pathak U., 2015.

35. Optimization and rationalization of truss design. International Research Journal of Engineering and Technology. 2(5). 624–636.

36. Haichao W., Hairong F., Zhongtao H., 2014. Study on present situation and prospect of fatigue strength and fatigue life of welded structures. Welding, 7. 26-31.

37. Клименко Ф.Є., Барабаш В.М., Стороженко Л.І. Металеві конструкції Львів: Світ, 2002 р. - 312с.

38. Hobbacher A., 2016. Recommendations for fatigue design of welded joints and components IIW Collection, Springer International Publishing.

39. Moddox S., 2002. Hot-spot stress design curves for fatigue assessment of welded structures. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*. 12(2). 134-141.
40. Müller E, Klashorst E., 2017. A quantitative comparison between size, shape, topology and simultaneous optimization for truss structures. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 14(12). 2221-2242.
41. Reda M., Sharaf T., ElSabbagh A., ElGhandour M., 2019. Behavior and design for component and system of cold-formed steel roof trusses. *Thin-Walled Structures*, 135. 21-32.
42. Gurney T R: 'Fatigue of welded structures', 2nd Edition, Cambridge University Press, Cambridge, 1979.
43. Fisher J W: 'Fatigue and fracture in steel bridges', Wiley Interscience, 1984.
44. Maddox S J: 'Fatigue strength of welded structures', Abington Publishing, Abington, Cambridge, 1991.
45. Eurocode 3: 'Design of steel structures', prENV 1993, European Committee for Standardisation, Brussels, 1992.
46. European Convention for Constructional Steelwork: 'European recommendations for aluminium alloy structures - fatigue design', Publication No. 68, ECCS, Brussels, 1992.
47. American Welding Society: 'Structural Welding Code - Steel', ANSI/AWS D.1., AWS, Miami, 1996.
48. Jozef Kul'ka, Martin Mantič, Vierošlav Molnar. Failure analysis of the foundry crane to increase its working parameters, *Engineering Failure Analysis*, Feb2018, 88.
49. Hobbacher A: 'Fatigue design of welded joints and components', IIW, Abington Publishing, Abington, Cambridge, 1996.
50. Haagensen P J: 'Fatigue of tubular joints and fatigue improvement methods', *Progress in Structural Engineering and Materials*, Sept.1997, 1 (1), 96-106.
51. Gurney T R and Maddox S J: 'A re-analysis of fatigue data for welded joints in steel', *Welding Research International*, 1973 3 (4), 1-54.

52. Brozzetti J, Chabroline B and Raoul J: 'Background document on fatigue design rules in Eurocode 3, Part 2: Bridges', CTICM Report No.10.003-7, Sept.1992.
53. Draft Unfired Pressure Vessel Standard, Part 3: 'Design', European Committee for Standardisation, Doc. No. CEN/TC54, Brussels, 1996.
54. Fisher J W: 'Improved performance through large scale dynamic testing of structures', IIW Intl. Conf. on Performance of Dynamically Loaded Welded Structures, Welding Research Council, New York, 1997.
55. Ohta A, Suzuki N and Maeda Y: 'Effect of residual stresses on fatigue of weldment', IIW Intl. Conf. on Performance of Dynamically Loaded Welded Structures, Welding Research Council, New York, 1997.
56. Jaccard R, Kosteas D and Ondra E: 'Background document to fatigue design curves for welded aluminium components', IIW Doc. XIII-1588-95, 1995.
57. Gurney T R: 'The influence of thickness on the fatigue behaviour of welded joints'. Proc. 2nd Intl. Conf. in Behaviour of Offshore Structures, BOSS'79, London, 1979.
58. Maddox S J: 'The effect of plate thickness on the fatigue strength of fillet welds', Abington Publishing, Abington, Cambridge, 1987.
59. Maddox S J: 'Scale effect in fatigue of fillet welded aluminium alloys', Proc. 6th Intl. Conf. on Aluminium Weldments, American Welding Society, Miami, FL, 1995, 77-94.
60. Signes F S, Baker R G, Harrison J D and Burdekin F M: 'Factors affecting the fatigue strength of welded high strength steels', Br. Weld. J, March 1967, 14 (3) 108.
61. Haagensen P J: 'Weld improvement methods - applications and implementations in design codes', Intl. Conf. on Fatigue of Welded Components and Structures, les Editions de Physiques, les Ulis, France.
62. Bigonnet A: 'Improving the fatigue strength of welded structures', Steel in Marine Structures, Elsevier, Amsterdam, 1987.

63. Maddox S J: 'Developments in fatigue design codes and fitness-for-service assessment methods', IIW Intl. Conf. on Performance of Dynamically Loaded Welded Structures, Welding Research Council, New York, 1997.
64. Razmjoo G. R. Design guidance on fatigue of welded stainless steel joints, Proc. of Offshore Mechanics and Arctic Engineering Conference (OMAE'95), Vol.3 Materials Engineering, ASME, 1995, 163-171.
65. Maddox S J: 'Fatigue design of welded aluminium alloys structures', Proc. 2nd Intl. Conf. on Aluminium Weldments, Aluminium-Verlag, Dusseldorf, 1982.
66. Razmjoo G.R. 'Fatigue tests on large girth welded steel tubes', Offshore Mechanics and Arctic Engineering Conference (OMAE'98), Vol.3, Materials Engineering, ASME, 1998.
67. Muller F: 'Fatigue of weathering steels in as-received and welded material states within a weathering period of six years', IIW Doc. No. XIII-1479-93, 1993.
68. Niemi E: 'Stress determination for fatigue analysis of welded components', IIW, Abington Publishing, Abington, Cambridge, 1995.
69. Dexter R J, Tarquinio J E and Fisher J W: 'Application of hot spot stress fatigue analysis to attachments on flexible plates', Offshore Mechanics and Arctic Engineering Conference (OMAE'94), Vol.3, Materials Engineering, ASME, 1994.
70. Sonsino C M: 'Multiaxial and random loading of welded structures', IIW Intl. Conf. on Performance of Dynamically Loaded Welded Structures, Welding Research Council, New York, 1997.
71. Brown M W and Miller K J (Ed): 'Biaxial and Multiaxial Fatigue', EGF Publication 3, Mechanical Engineering Publications Limited, London, 1989.
72. Marquis G B, Backstrom M and Siljander A: 'Multiaxial fatigue damage parameters for welded joints: design code and critical plane approaches', Proc. Conf. on Welded High Strength Steel Structures', NESCO, Stockholm 1997, 127-141.
73. Gurney T R and Maddox S J: 'An alternative to Miner's rule for cumulative damage calculations', IASBSE Workshop Remaining Fatigue Life of Steel Structures, IABSE Report No. 59, 1991, 189-198.

74. Marquis G: 'Long life spectrum fatigue of carbon and stainless steel welds', *Fat. Fract. Engng. Mater. Struct.*, 1996 19 (6), 739.
75. Niemi E: 'Random loading behaviour of welded components', *Proc. IIW Conf. on Performance of Dynamically Loaded Welded Structures*, Welding Research Council, New York, 1997.
76. PD6493:1991: 'Guidance on methods for assessing the acceptability of flaws in fusion welded structures', *British Standard Published Document*, BSI, London, 1991.
77. Ogle M H: 'Production weld quality standards for steel and aluminium structures' *Welding in the World*, 1991, 29 (11/12), 341-362
78. Steinhausen, R.; Pientschke, C.; Strauss, A *Moderne bildgebende Ultraschall-Verfahren zur zerstörungsfreien Prüfung von Schweißnähten im Stahlbau* in: U. Kuhlmann [Ed.] *Stahlbau-Kalender 2017*. Berlin: Ernst & Sohn, pp. 271–312.
79. Sedlacek, G.; Hobbacher, A.; Nussbaumer, A.; Stötzel, J.; Schäfer, D. *Commentary to Eurocode 3 EN 1993 Part 1-9: Fatigue*. Institute of Steel Construction/Chair for Steel & Lightweight Metal Construction, RWTH Aachen University.
80. You B.R. and Lee S.B. (1997). "Fatigue crack growth behavior of SM45C steel under cyclic mode I with superimposed static mode II loadings", *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, Vol. 20, No. 7, pp. 1059–1074.
81. Stanzl S.E., Czegley M., Mayer H.R. and Tschegg E.K. (1989). "Fatigue crack growth under combined mode I and mode II loading", *Fracture Mechanics: Perspectives and Directions (Twentieth Symposium)*, ASTM STP 1020, West Conshohocken, PA, USA, pp. 479–496.
82. Schumacher A. and Nussbaumer A. (2006). "Experimental study on the fatigue behavior of welded tubular K-joints for bridges", *Engineering Structures*, Vol. 28, No. 5, pp. 745–755.
83. Newman J.C. (1984). "A crack opening stress equation for fatigue crack growth", *International Journal of Fracture*, Vol. 24, No. 4, pp. 131–135.

84. Mashiri F.R., Zhao X.L. and Grundy P. (2000). “Crack propagation analysis of welded thin-walled joints using boundary element method”, *Computational Mechanics*, Vol. 26, No. 2, pp. 157–165.
85. Liu H.B., Zhao X.L. and Al-Mahaidi R. (2009). “Boundary element analysis of CFRP reinforced steel plates”, *Composite Structures*, Vol. 91, No. 1, pp. 74–83.
86. Kainuma S., Kamamoto Y., Takamatsu D. and Yamada K. (1999). “Fatigue test of load-carrying fillet welded cruciform joints with root gap”, *Proceeding of the Seventh East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering & Construction*, Kochi, Japan, August, pp. 213–218.
87. Hourlier F., d'Hondt H., Truchon M. and Pineau A. (1985). “Fatigue crack path behavior under polymodal fatigue”, *Multiaxial Fatigue*, ASTM STP 853, pp. 228–247.
88. Bjorhovde R. (2005). “Realistic performance requirements for steel in structures”, *Advances in Structural Engineering*, Vol. 8, No. 3, pp. 203–216.
89. Balasubramanian V. and Guha B. (1999). “Assessment of some factors affecting fatigue endurance of welded cruciform joints using statistical techniques”, *International Journal of Fatigue*, Vol. 21, No. 8, pp. 873–877.
90. Aliabadi M.H., Niku S. and Adey R.A. (1995). “Crack growth simulation and life predicting using BEM”, *International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition*, Texas, USA.
91. Ü. Arpacioğlu, System installation and material use in protection against the effect of fire in high building systems, 2nd National Building Materials Congress, October 6–8, 2004, 2004.
92. A.H. Buchanan, A.K. Abu, *Structural Design for Fire Safety*, Second edition, Wiley, 2017.
93. Дослідження деформаційної поведінки зварної будівельної ферми при температурному впливі / Ковальчук Я., Шингера Н., Швед Я. // Міжнародна студентська науково-технічна конференція „Природничі та гуманітарні науки.

Актуальні питання“, 27-28 квітня 2023. — Т. : ТНТУ, 2023. — С. 261–262. — (Механічна інженерія).

94. Formation of input information arrays for computer simulation of welded trusses behavior under thermal force effects / Yaroslav Kovalchuk, Natalya Shynhera, Yaroslav Shved // Scientific Journal of TNTU. — Tern.: TNTU, 2023. — Vol 110. — No 2. — P. 118–124.

95. Kramar H., Kovalchuk Y., Shynhera N., Bodrova L., Shved Y., 2022. Material consumption optimization of a welded rafter truss made of angle profiles. Procedia Structural Integrity. 1st Virtual International Conference on In service Damage of Materials: Diagnostics and Prediction, VDMDP 2021 Ternopil. 11 October 2021 до 13 October 2021. Том 36,2022. С. 10 — 16.

96. Welded truss deformation under thermal influence / Yaroslav Shved; Yaroslav Kovalchuk; Natalya Shynhera // Scientific Journal of TNTU. — Tern.: TNTU, 2022. — Vol 105. — No 1. — P. 13–18.

97. Ковальчук Я. О. Локалізація напружень і втомне пошкодження зварної ферми / Ярослав Олексійович Ковальчук, Наталія Ярославівна Шингера, Я. Швед // Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції „Міцність і довговічність сучасних матеріалів та конструкцій“, 10-11 листопада 2022 року. — Т. : ФОП Паляниця В. А., 2022. — С. 109–110.

98. Ковальчук Я.О. Моделювання поведінки двосхильної симетричної зварної ферми при дії циклічних навантажень / Ковальчук Я.О., Шингера Н.Я., Швед Я.Л. // Збірник тез доповідей X Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених та студентів "Актуальні задачі сучасних технологій" 2021/11/24 С. 13-13

99. Ковальчук Я.О. Пошкодження і руйнування зварних ферм для транспортно-технологічних машин / Ковальчук Я.О., Шингера Н.Я., Швед Я.Л. // Збірник тез доповідей Міжнародної науково-технічної конференції присвяченої пам'яті професора Гевка Богдана Матвійовича "Проблеми теорії

проектування та виготовлення транспортно-технологічних машин" 2021/9/23 С. 104-104

100. Ковальчук Я., Шингера Н., Швед Я., Ворончак В. Fatigue damage of the heel joint of welded roof truss. Вісник Тернопільського національного технічного університету. Том 99. Випуск 3. 2020 С. 28-33

101. Патент на корисну модель №153171 . К-подібний вузол зварної ферми зі спареною фасонкою . Номер заявки: u202202743 . Дата подання заявки: 28.07.2022 . Дата, з якої є чинними права: 01.06.2023 . Винахідник: Ковальчук Ярослав Олексійович; Шингера Наталія Ярославівна; Швед Ярослав Леонідович . Власник: тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. Бюл. № 22/2023.

102. Патент на корисну модель №153333. К-подібний вузол зварної ферми з прорізною фасонкою. Номер заявки: u202202883. Дата подання заявки: 05.08.2022. Дата, з якої є чинними права: 22.06.2023. Винахідник: Ковальчук Ярослав Олексійович ; Шингера Наталія Ярославівна; Швед Ярослав Леонідович. Власник: тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. Бюл. № 25/2023.

103. Ковальчук Я.О., Шингера Н.Я., Швед Я.Л. Статична міцність сталі ВСтЗпс зі зварним швом // Матеріали Міжнародна науково-технічна конференція «Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій» до 60 річчя з дня заснування ТНТУ імені Івана Пулюя та 175 річчя з дня народження Івана Пулюя. 14-15 травня 2020 року Т. : ТНТУ, 2020. — С. 87.

104. Ковальчук Я.О., Шингера Н.Я., Швед Я.Л. Фізичне моделювання при дослідженні зварних ферм // Матеріали Міжнародної наукової конференції «Іван Пулюй: життя в ім'я науки та України» (до 175-ліття від дня народження). 28-30 вересня 2020 року Т. : ТНТУ, 2020. — С. 57.

ДОДАТКИ

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

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

02 травня 2024 р.

№3/19

Про практичне впровадження
результатів дисертаційної роботи

Д О В І Д К А

видана Шведу Ярославу Леонідовичу про те, що результати його дисертаційної роботи на тему: «Міцність і деформівність зварної підкроквяної ферми при дії силових і температурних впливів», представлену на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 131 – Прикладна механіка розглянуто, схвалено і рекомендовано до впровадження науково-технічною радою підприємства ТОВ «Смарттехбуд» 12.03.2024 р.

Отримані автором інформаційні масиви, інші результати досліджень і сформульовані рекомендації впроваджено при проєктуванні 8 зварних ферм 18000x3600 мм, які призначені для роботи при дії статичних навантажень від дахової конструкції. Важливим аргументом згідно з технічним завданням замовника є тримкість конструкції при температурному впливі до 370⁰С. На даний час конструкція виготовлена, змонтована і проходить експлуатаційні випробування в штатному режимі. Вважаю, що тему наукової роботи розкрито, сформульовані задачі виконано, поставленої мети досягнуто.

Директор технічний



Богдан КАСПРУК