

АНОТАЦІЯ

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

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

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

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

У першому розділі зроблено огляд праць за темою дисертації, проаналізовано наявні конструкції К-подібних вузлів виявлено особливості їх пошкодження й руйнування за різних умов. Виявлено, що серед усіх досліджень питома вага натурних експериментів досить низька, а

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

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

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

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

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

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

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

стандартними фасонками, з оригінальними фасонками, фасонками власної конструкції).

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

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

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

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

Наукова новизна одержаних результатів:

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

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

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

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

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

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

SUMMARY

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

A computer simulation test was performed for a semi-scale sample of a welded truss with butt joints. The diagram of fatigue failure was constructed. The acceptable coincidence of the number of cycles to the moment of initiation of

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

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

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

Scientific novelty of the obtained results.

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

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

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

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

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

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

Список публікацій здобувача

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

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

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

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

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

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

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

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

15. Басара М.А. «Деформування верхнього поясу фізичної моделі зварної ферми» *IX Міжнародна науково-технічна конференція молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“* 25-26 листопада 2020 р. Тернопіль, С.25.