

Ковальчук Я. Деформування зварної будівельної ферми при статичних навантаженнях / Я. Ковальчук, Н. Шингера, О. Рибачок // Вісник ТНТУ — Тернопіль : ТНТУ, 2014. — Том 74. — № 2. — С. 77- 83. — (механіка та матеріалознавство).

УДК 621.177; 621.314

**Я. Ковальчук, канд. техн. наук;  
Н. Шингера, канд. техн. наук; О. Рибачок**

*Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя*

## **ДЕФОРМУВАННЯ ЗВАРНОЇ БУДІВЕЛЬНОЇ ФЕРМИ ПРИ СТАТИЧНИХ НАВАНТАЖЕННЯХ**

**Резюме.** Досліджено деформування нижнього пояса зварної підкроквяної будівельної ферми при дії на конструкцію зовнішніх статичних навантажень. Експериментальні дослідження виконано на фізичній моделі прямокутної підкроквяної зварної ферми з розмірами 2000×400 мм, виготовленої з кутникового профілю 40×40×4 мм зі сталі ВСт3пс за ДСТУ 2651:2005. Конструкцію фізичної моделі розроблено з дотриманням класичних принципів теорії подібності. За результатами напівнатурного силового експерименту отримано чисельну та графічну інформації про рівень позовжньої деформації розтягом нижнього пояса досліджуваної конструкції при її зовнішньому навантажуванні від 2,5 кН до 45 кН, тобто в діапазоні експлуатаційних навантажень ферми. Виявлено, що при таких навантаженнях деформування нижнього пояса досліджуваної конструкції є в лінійній залежності з прикладеними до ферми зусиллями. Отримані результати досліджень доцільно використати для оцінювання напружено-деформівного стану фермових конструкцій як у процесі їх проектування, так і їх експлуатації. Результати виконаних експериментальних досліджень можна взяти за основу для верифікації розрахункових деформацій ферми, отриманих із використанням сучасних прикладних програмних пакетів системи автоматизованого проектування зварних ферм.

**Ключові слова:** зварна ферма, напружено-деформівний стан, несуча здатність, втрата тримкості ферм.

**Y. Kovalchuk; N. Shynhera; O. Rybachok**

## **DEFORMATION OF THE WELD-FABRICATED BUILDING FARM UNDER STATIC LOADINGS**

**Summary.** Deformation of lower belt of the weld-fabricated build farm under external static loadings has been analysed. Experimental research is executed on the physical model of the rectangular 2000×400 mm size weld-fabricated farm made of VSt3ps type steel 40×40 ×4 mm angle profile after ISO 1052-82. A welded construction was produced by the semi-automatic arc welding. Model research of construction makes possible to eliminate human factors, which calculation methods are not deprived of, and to take into account completely the complex influence of stochastic factors (structural, technological, operating). The construction of physical model is developed with the observance of classic principles of similarity theory. Statistical test plan was developed and the required minimum number of the experiment duplications, which will provide limit relative results error  $\delta=0,1$  with confidence level  $\gamma=0,9$  and predictable variation coefficient  $v=0,3$  was found. According to the results of semi-model power experiment numeral and graphic information on the level of longitudinal stretching deformation of lower belt of the tested construction under its external loading from 2,5 kN to 45 kN with discret 2,5 kN was obtained, that is, within the operating loadings of farm. Testing stand in whole and reading device for determination of deformations of the lower belt are structurally made so, that their own rigidity does not influence on the accuracy of the obtained results. Numeral informative arrays were got experimentally, which are tested according to the Irvin criterion. It is discovered that such loadings of deformation of lower belt of the tested construction are in the linear dependence on the applied to the farm efforts, that is, the farm element operates within the limits of elastic deformation. Obtained results of research are worth being used for evaluation of the stress-strained state of farm constructions both in the process of their designing and during their operation. The results of the obtained experimental research can be the basis for verification of calculation deformations of structural elements of farms, got with the use of the modern applied software packages of computer-aided farm design.

**Key words:** welded farms, stress-strained state, supporting ability, loss of the farm supporting ability.

**Постановка проблеми.** Зварні будівельні ферми (балкові, підкроквяні, кроквяні та ін.) знаходять широке застосування в будівництві завдяки їх високій міцності й жорсткості при нижчій масі й вартості в порівнянні з суцільними металоконструкціями.

Під дією різних стохастичних чинників (експлуатаційні навантаження, сніг, вітер, температура, сейсмічні впливи, аварійні ситуації тощо) в елементах зварних ферм відбуваються пошкодження їх суцільності аж до руйнування.

Сучасна комп'ютерна техніка й існуючі розрахункові методики, які базуються на прикладних програмних пакетах, дають можливість промоделювати поведінку зварних ферм із урахуванням багатьох факторів (матеріал конструкції, конфігурація ферми, технологія зварювання, пошкоджуючі чинники та ін.). Однак отримати високу вірогідність результатів комп'ютерним моделюванням не вдається через комплексне поєднання стохастичних чинників (конструктивних, технологічних, експлуатаційних) для конкретної ферми за певних умов навантажування. Тому наслідком застосування сучасних розрахункових методик є те, що одні конструкції можуть мати надмірні, а інші – недостатні фактичні запаси міцності.

Отримати точну й об'єктивну інформацію про поведінку зварної ферми можна лише за результатами її експлуатації або натурального експерименту. Однак такий підхід для проектування ферм є економічно не виправданим. Натурний експеримент застосовують лише для оцінювання вірогідності результатів математичного моделювання й для внесення відповідних коректив у сучасні розрахункові методики з метою отримання оптимального співвідношення конструктивних параметрів зварних ферм на етапі їх проектування.

Виходячи з високої вартості дослідних зразків, випробувального обладнання та необхідності високих рівнів навантажень упродовж експерименту, в літературі зустрічається досить мало інформації про результати натурних досліджень зварних ферм.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Результати досліджень НДС зварних ферм класичними розрахунковими методами висвітлено в роботах Недосеки А.Я. [1], Козлова С.В. [1], Кирсанова М.Н. [3] та інших учених. Загальним недоліком класичних методів розрахунків є висока трудомісткість проектно-конструкторських робіт і суттєвий вплив суб'єктивного чинника при виборі емпіричних коефіцієнтів, які враховують конструктивні, технологічні та експлуатаційні особливості зварної ферми.

У сучасній науці та інженерній практиці використовується велика кількість прикладних програмних комплексів. Розрахунок зварних ферм за допомогою програмних комплексів виклали у своїх роботах Алпатов В.Ю. (ПК ПОФСК-Мираж-ПСМК, «Лира-W», SCAD, Cosmos Works, Design Space) [4], Алдушкін Р.В. (ПК SCAD і Mathcad) [5], Шингера Н.Я. (ПК ANSYS) [6] та ін. Кожен із використаних програмних комплексів має свої принципи моделювання напружено-деформівного стану зварної ферми та ступені наближення до реальної роботи конструкції. Застосування цих програмних продуктів дає можливість суттєво скоротити тривалість розроблення проектно-конструкторської документації, однак не виключає впливу суб'єктивних чинників на результати розрахунків.

За результатами експлуатації та натурних випробувань зварних ферм дослідники виявили ряд недоліків розрахункових методик як класичних, так і сучасних, які алгоритмічно базуються на методиці математичного моделювання. Виявлено, що при переході від реальної конструкції до розрахункової схеми за методом граничних станів:

- 1) допускається при малих погонних жорсткостях стрижнів введення шарнірно-стрижневої безмоментної розрахункової схеми;
- 2) стійкість стиснених елементів конструкції розглядається без урахування гнучко-крутильної форми втрати стійкості;
- 3) розрахунковий опір матеріалів завжди менший нормативного, тобто з метою підвищення надійності розрахунку дійсні міцнісні характеристики матеріалів штучно занижуються;
- 4) при оцінюванні тримкості стиснених елементів дуже наближено враховують умови їх закріплення й т. д.

Багато з цих спрощень можуть призвести до істотного відхилення розрахункових характеристик НДС від дійсних, особливо для стрижневих систем, елементи яких мають просторові геометричні недосконалості.

При переході від реальної конструкції до розрахункової схеми за методом допустимих напружень дослідники виявили такі недоліки:

- 1) застосування єдиного коефіцієнта запасу міцності, який не оцінює мінливості різних видів навантаження;
- 2) застосування єдиного коефіцієнта запасу міцності не досить чітко враховує мінливість міцності матеріалу;
- 3) застосування єдиного коефіцієнта запасу міцності не досить чітко враховує умови роботи конструкції.

Як наслідок, одні конструкції можуть мати надмірні, а інші – недостатні запаси міцності. Для оцінювання достовірності отриманих розрахункових результатів доцільно виконати їх верифікацію на підставі експлуатації конструкції або її натурних випробувань [7]. Однак у літературі наведено досить мало таких результатів через високу трудо- і матеріаломісткість таких досліджень.

**Метою роботи** є визначення особливостей деформування зварної підкроквяної ферми при дії статичних навантажень методом напівнатурного силового експерименту.

**Постановка завдання (задачі).** Для досягнення поставленої мети потрібно вирішити такі завдання:

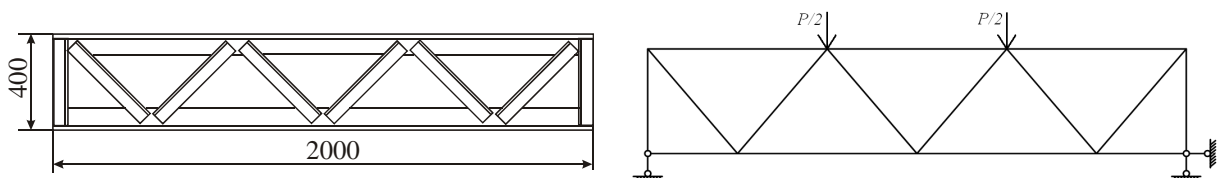
- вибрати конфігурацію зварної ферми та схему її навантажування;
- розробити конструкцію фізичної моделі зварної ферми для дослідження;
- виготовити дослідний зразок фізичної моделі зварної ферми для напівнатурного силового експерименту.
- розробити методика напівнатурних досліджень НДС ферми при статичних навантаженнях;
- виконати напівнатурне експериментальне дослідження НДС зразка при статичних навантаженнях;
- проаналізувати отримані результати напівнатурних експериментів.

**Результати дослідження.** З метою виявлення придатності прикладного програмного пакета для вирішення завдань науково-дослідного та проектно-конструкторського характеру при дослідженні зварних будівельних ферм необхідно проаналізувати ступінь співпадання розрахункових показників НДС конструкції з результатами натурного експерименту чи практичної експлуатації ферми.

У роботі виконано натурні дослідження фізичної моделі зварної ферми (напівнатурні дослідження) (рис.1), що суттєво підвищує економічні показники експерименту, залишивши високу точність отриманих результатів, які враховують усі конструктивні та технологічні особливості ферми й повністю виключають вплив суб'єктивних чинників на результати досліджень.

При розробленні конструкції для дослідження використано класичні принципи теорії подібності [8], які визначають співвідношення між параметрами моделі й реальної конструкції, а також правила перерахунку досліджуваних величин з моделі на реальну конструкцію та навпаки.

Для виконання досліджень запропоновано схему навантажування експериментального зразка (рис.2), яка відповідає реальним умовам експлуатації конструкції.



**Рисунок 1.** Конструкція фізичної моделі зварної ферми

**Figure 1.** Design of physical model of the weld-fabricated farm

**Рисунок 2.** Схема навантажування дослідного зразка в процесі експерименту

**Figure 2.** Chart of the specimen loading during the experiment

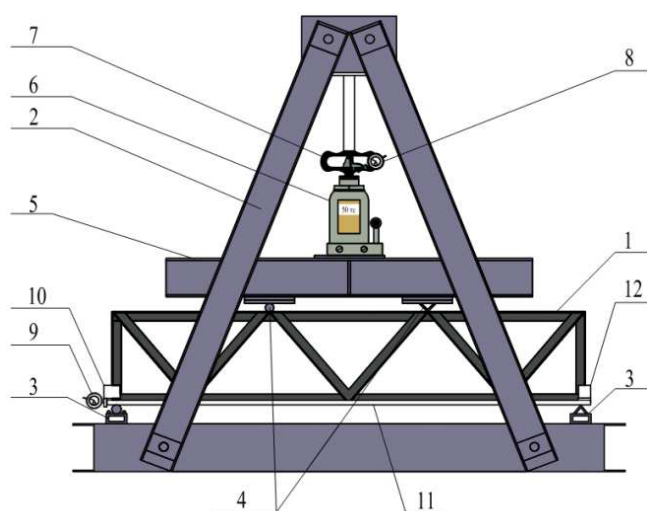
Усі конструктивні елементи зварної підкороквяної ферми виготовлено зі стандартного вальцьованого рівнополічкового кутникового профілю 40×40×4 мм зі сталі звичайної якості ВСт3пс за ДСТУ 2651:2005, ISO 1052-82. У вузлах ферми стержні з'єднуються за допомогою напусткових зварних швів. Усі зварні шви на зразку виконано напівавтоматичним дуговим зварюванням постійним струмом прямої полярності дровим електродом діаметром 1,2 мм Св-08Г2С однієї поставної партії в середовищі CO<sub>2</sub> з дотриманням стандартизованих технологій. Робочий струм зварювання становив 110 А. Послідовність накладення зварних швів при виготовленні ферми прийнято з урахуванням технологічних вимог, які забезпечують формування мінімальних внутрішніх напружень. Таким чином отримано експериментальний зразок фізичної моделі ферми з найменшими викривленнями її конструктивних елементів і з можливістю її дослідження чи експлуатації без попереднього рихтування.

Перед виконанням експерименту розроблено статистичні плани випробувань. Метою розроблення статистичних планів випробувань є визначення мінімального необхідного об'єму (кількості) випробувань для отримання результатів з вибраною точністю й вірогідністю. Мінімальну кількість експериментальних навантажень дослідного зразка при виконанні випробувань визначають за рекомендаціями [9].

Для дослідження прийнято мінімально допустиму кількість експериментальних навантажень  $n=15$  разів, що задовольняє умови:

- гранична відносна похибка  $\delta=0,1$ ;
- довірна ймовірність  $\gamma=0,9$ ;
- передбачуваний коефіцієнт варіації  $v=0,3$ .

Дослідження НДС фізичної моделі зварної ферми по запропонованій схемі навантажування (рис.2) виконано на випробувальному стенді (рис.3).



**Рисунок 3.** Методика напівнатурного дослідження ферми на випробувальному стенді

**Figure 3.** Method of semi-model research of the farm on the testing stand

Досліджуваний зразок 1 встановлено у випробувальний стенд 2 згідно зі схемою навантаження (рис.2) на нижні опори 3. Навпроти верхніх вузлів встановлено опори 4 на траверсі 5. Навантаження створювали гідродомкратом 6 з максимальним зусиллям 50 тс. Величину навантаження визначали за показами відлікового пристрою 7 на динамометрі 8. Величину поздовжньої деформації нижнього пояса визначали за показами індикатора 9, встановленого у затискачі 10 у лівому кінці пояса ферми.

Відлік деформації визначався за переміщенням лівого торця вимірювального штока 11, правий кінець якого закріплений до затискача 12, встановленому на правому кінці нижнього пояса.

Відлікова схема для визначення абсолютного видовження нижнього пояса прийнята таким чином, що власна жорсткість випробувального стенда 2 (рис.3) не впливає на точність досліджуваного параметра.

При виконанні експерименту згідно зі статистичними планами випробувань виконано п'ятнадцятиразове статичне навантажування й розвантажування конструкції з інтервалом 24 години між одиничними циклами. Дослідження виконано в межах пружної деформації конструкції, що унеможливорює вплив накопичених малоциклових пошкоджень на результати експерименту.

Напівнатурним силовим експериментом отримано 15 інформаційних масивів величини видовження нижнього пояса зварної підкрюквяної ферми  $\Delta l$  при дії різних значень статичних навантажень  $P$  в інтервалі від 2,5 до 45 кН з дискретністю 2,5 кН.

Для кожного з 15 експериментальних циклів навантажування виконано опрацювання результатів випробувань для перевірки інформаційних масивів на наявність випадкових даних та для виявлення, чи не випадають із загального закону розподілу досліджуваної характеристики окремі експериментальні результати. Оскільки закон розподілу невідомий, то перевірку як крайніх, так й інших суміжних точок на їхню належність до вибірки здійснено за критерієм Ірвіна (критерій  $\lambda$ ). Для обсягу інформації  $N=18$  при довірчій імовірності  $\gamma=0,9$   $\lambda_T = 1,1$  [9]. Якщо для отриманого експериментального значення  $x_i$  розрахункове значення критерію Ірвіна  $\lambda_p < 1,1$ , то таке значення залишено, в іншому випадку повинно бути виключено з подальшого розгляду. За результатами перевірки всі експериментально отримані значення деформації нижнього пояса узгоджуються з критерієм Ірвіна.

Визначено усереднені значення деформації нижнього пояса ферми для кожного значення навантажень (табл. 1).

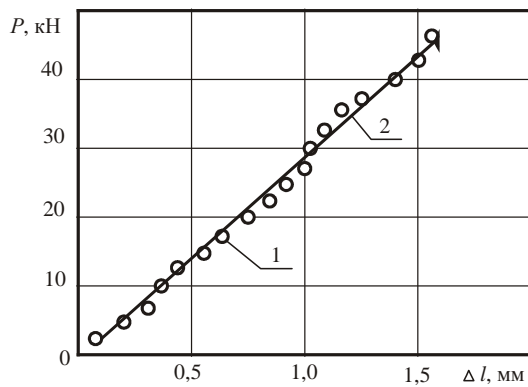
**Таблиця 1**

Видовження нижнього пояса зварної ферми при статичних навантаженнях

$P$ , кН	$\Delta l$ , мм	$P$ , кН	$\Delta l$ , мм	$P$ , кН	$\Delta l$ , мм
2,5	0,09	17,5	0,63	32,5	1,10
5,0	0,18	20,0	0,72	35,0	1,17
7,5	0,27	22,5	0,81	37,5	1,25
10,0	0,36	25,0	0,88	40,0	1,39
12,5	0,44	27,5	0,97	42,5	1,46
15,0	0,54	30,0	1,02	45,0	1,55

Достовірність експериментальних результатів забезпечено застосуванням для визначення величини навантаження ферми динамометра, який пройшов метрологічну повірку, та для визначення величини лінійної деформації нижнього пояса індикатора часового типу протарованого від аналогічного сертифікованого приладу. Крім того, впродовж експерименту в приміщенні забезпечено постійну температуру повітря.

На підставі сформованого інформаційного масиву, отриманого за результатами напівнатурного силового експерименту й наведено в табл.1, побудовано діаграму деформування нижнього пояса досліджуваного зразка зварної підкрюквяної будівельної ферми (рис. 4).



**Рисунок 4.** Діаграма деформування нижнього пояса ферми за результатами напівнатурного експерименту

**Figure 4.** Diagram of the farm lower belt deformation according to the of semi-model experiment

наведено експериментальні результати деформування нижнього пояса ферми, отримані при навантажуванні дослідного зразка. Лінія 2 отримана за результатами лінійної апроксимації експериментальних результатів.

Як свідчать результати виконаних досліджень, у межах експериментальних навантажень деформація розтягу нижнього пояса зварної підкрюквяної ферми має лінійний характер, тобто деформування відбувається в межах пружного діапазону.

Саме цей діапазон викликає найбільшу зацікавленість дослідників, оскільки саме в ньому відбувається експлуатація зварних ферм.

Характерним результатом досліджень є висока повторюваність результатів при багаторазовому дублюванні навантажування.

Зрозумілим є те, що якісна картина для відносного видовження нижнього пояса досліджуваної ферми для виконаного експерименту буде такою ж, як і для абсолютного видовження.

**Висновки.** Розроблено конструкцію фізичної моделі зварної підкрюквяної будівельної ферми і методику її експериментальних досліджень. За результатами напівнатурного силового експерименту отримано чисельну й графічну інформації величини поздовжньої деформації розтягом нижнього пояса ферми при різних рівнях навантажування. Виявлено лінійну залежність величини деформації нижнього пояса зварної ферми при зовнішньому навантажуванні конструкції статичними зусиллями від 2,5 кН до 45 кН, тобто в межах її експлуатаційних навантажень. Отримані результати досліджень доцільно використати для оцінювання напружено-деформівного стану фермових конструкцій як у процесі їх проектування, так і їх експлуатації. Результати виконаних експериментальних досліджень можна взяти за основу для верифікації розрахункових деформацій ферми, отриманих із використанням сучасних прикладних програмних пакетів системи автоматизованого проектування зварних ферм.

**Conclusions.** The construction of physical model of the weld-fabricated farm and the method of experimental research have been developed. According to the results of semi-model power experiment numeral and graphic information of size of longitudinal deformation of the farm lower belt under different loadings has been found. Linear dependence of deformation size of the lower belt of the weld-fabricated farm under external loading of construction by static force from 2,5 kN to 45 kN, that is, within the limits of its operating regimes, has been found. Obtained results of research are worthy being used for the evaluation of stress-strained state of farm constructions both in the process of their designing and operating. The results of the executed experimental researches can be the basis for verification of calculation deformations of the farm obtained taking advantage of modern applied software packages of computer-aided farms design.

#### Список використаної літератури

1. Недосека, А.Я. Основы расчета и диагностики сварных конструкций [Текст] / А.Я. Недосека. – К.: ИНДПРОМ, 2001. – 815 с.
2. Козлов, С.В. Повышение устойчивости сжатых элементов ферм из уголкового профиля локальными термическими воздействиями: дис. ... канд. тех. наук: 05.23.01. [Текст] / Козлов Сергей Васильевич. – К., 2004. – 168с.

3. Кирсанов, М.Н. Оптимизация пространственной фермы с учетом ползучести материала // Известия вузов. Строительство. – 2001. – №10. – С.11–15.
4. Алпатов, В.Ю. Оптимальное проектирование металлических структур: автореф. дис. ... канд. техн. наук: специальность ВАК 05.23.01 «Строительные конструкции, здания и сооружения» [Текст] / А.В. Дрокин. – Самара, 2002. – 23 с.
5. Алдушкин, Р.В. Развитие и совершенствование рациональных методов усиления и регулирования усилий в металлических конструкциях балочного типа и фермах : автореф. дис. ... канд. техн. наук : специальность ВАК 05.23.01 «Строительные конструкции, здания и сооружения» [Текст] / Р.В. Алдушкин. – Орел, 2008. – 20 с.
6. Шингера, Н.Я. Статистична модель для визначення залишкового ресурсу типової зварної ферми при циклічних навантаженнях: дис. ... канд. техн. наук : 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи [Текст] / Н.Я. Шингера. – Тернопіль, 2012. – 166 с.
7. Еремин, К.И. Оценка остаточного ресурса строительных металлоконструкций по результатам натурных испытаний [Текст] / К.И. Еремин, С.А. Ницета // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 1997. – №3. – С. 39–41.
8. Седов, Л. И. Методы подобия и размерности в механике [Текст] / Л.И. Седов. – М. : Наука, 1987. – 432 с.
9. Методы определения показателей надежности по экспериментальным данным : РД 50-690-89 Надежность в технике. – М. : Изд-во стандартов, 1990. – 95 с.
10. Степнов, М.Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний. Справочник [Текст] / М.Н. Степнов. – М.: Машиностроение, 1985. – 231 с.

*Отримано 01.04.2014*