

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МАЛОЕЛЕМЕНТНОЇ СТАЛЕВОЇ ФЕРМИ ПОКРИТТЯ З ДВОТАВРОВИМ ВЕРХНІМ ПОЯСОМ ЗМІННОЇ ЖОРСТКОСТІ ПРОЛЬОТОМ 18 М

EXPERIMENTAL STUDIES OF A SMALL-ELEMENT STEEL FRAMING FLOOR WITH A TWO-LAYER UPPER BELT OF VARIABLE RIGIDITY WITH A SPAN OF 18 M

Налепа О.І., к.т.н., доцент, [ORCID.ORG/0009-0008-0749-5663](https://orcid.org/0009-0008-0749-5663), Романюк Є.В., аспірант, orcid.org/0009-0005-6097-9788; Романюк В.В., к.т.н., доцент, orcid.org/0000-0002-2539-4654; Мишко С.В., аспірант (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне, Україна)

O.I. Nalepa, Ph.D., associate professor, [ORCID.ORG/0009-0008-0749-5663](https://orcid.org/0009-0008-0749-5663), E.V. Romanyuk, graduate student, orcid.org/0009-0005-6097-9788; Romanyuk V.V., Ph.D., associate professor, orcid.org/0000-0002-2539-4654; Myshko S.V., PhD student (National University of Water Management and Nature Management, Rivne, Ukraine)

Аналіз ефективності різних конструктивних форм показав, що в найбільшій мірі критерію раціональності з врахуванням витрат на виготовлення відповідає стержень верхнього поясу півферми у вигляді перфорованого двотавра зі змінною висотою стінки, у якого максимально розвинутий переріз розміщений в середині півпрольоту і сприймає найбільше значення згинаючого моменту за відповідних значень геометричних параметрів розрахункової схеми. Для підтвердження теоретичних висновків щодо конструктивної форми розробленої ферми покриття виконані експериментальні дослідження.

One of the ways to reduce the material consumption of steel trusses is the use of initial systems with a minimum number of elements, the concentration of material in the main bearing elements, the use of highly efficient profiles. The researched truss in the form of a sprenkel system, which consists of a two-sloped upper belt, a lower broken belt and two risers connecting the belts, can correspond to such design directions. The upper belt in the areas between the support and ridge nodes is a rigid, inseparable rod that receives all three types of internal forces: bending moment M , longitudinal force N and transverse force Q . The main role here is played by the bending moment, the value of which along the belt varies from zero values to certain extreme values. The possibility of using perforated I-beams of constant and variable stiffness in the

upper belt has been studied. The characteristic curves of the bending moment in the upper belt and the structural solutions of the rods for each of the given stiffness change schemes are considered. The final proposed constructive solution of the upper belt of the truss with a span of 18 meters in the form of a perforated I-beam of variable height. The permissible range of changes in the values of the bending moment is obtained. A geometric interpretation of the area of possible moment values is established. The method of finding rational parameters of a truss with a perforated upper belt of variable stiffness is described. The regularities of the process of changing internal forces in the upper belt and the dependence between them have been established. Such a combination of the bending moment plot and the cross-section scheme of the original I-beam was obtained, which satisfies all strength and design constraints with the minimum possible weight of the truss. To confirm the theoretical studies, experimental tests of a steel small-element roof truss with a span of 18 m in natural size were carried out.

Ключові слова:

Балка, ферма, двотавр, тавр, різка, експеримент.
 Beam, truss, H-beam, tee-beam, cutting, experiment

Вступ. Одними з напрямків зменшення матеріаломісткості сталевих кроквяних ферм є використання вихідних систем з мінімальною кількістю елементів, концентрація матеріалу в основних несучих елементах, використання високоєфективних профілів. Таким напрямком при проектуванні може відповідати досліджувана в [1, 2, 3, 4] ферма у вигляді шпренгельної системи, яка складається з двосхилого верхнього поясу, нижнього ламаного поясу та двох стояків, що з'єднують пояси (рис. 1).

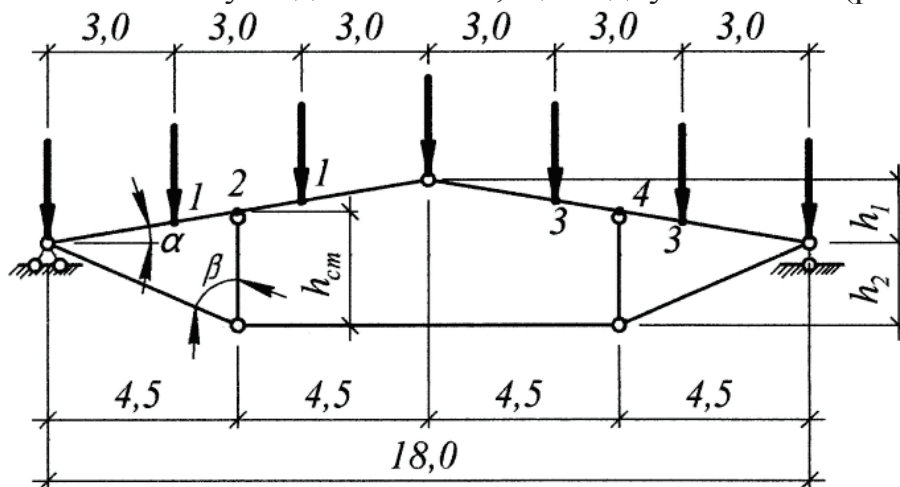


Рис.1. Вихідна система ферми

Викладена методика пошуку раціональних параметрів ферми з перфорованим верхнім поясом (перфорованим двотавром) змінної жорсткості. Характер зміни жорсткості вздовж пояса завдяки зміні висоти перфорованого двотавра досліджений у [3]. Аналіз ефективності різних конструктивних форм показав, що в найбільшій мірі критерію раціональності з врахуванням витрат на виготовлення відповідає стержень верхнього поясу півферми у вигляді перфорованого двотавра зі змінною висотою стінки, у якого максимально розвинутий переріз розміщений в середині півпрольоту і сприймає найбільше значення згинаючого моменту за відповідних значень геометричних параметрів розрахункової схеми.

Для підтвердження теоретичних висновків щодо конструктивної форми розробленої ферми покриття виконані експериментальні дослідження.

До теперішнього часу проведена невелика кількість експериментальних досліджень перфорованих елементів, але, на жаль, результати цих досліджень не завжди відображені в літературі, а іноді суперечать один одному і теоретичним передумовам самих авторів досліджень. До того ж, експериментальні дослідження в основному проводились на моделях у вигляді згинальних однопролітних балок з метою встановлення ступеню точності різних методик розрахунку. Експериментальні дослідження натурних зразків конструкцій покриття в сучасній практиці є рідкістю, а експерименти з комбінованими системами ферм покриття, до складу яких входять перфоровані елементи, представлені недостатньо.

Враховуючи, що напружено-деформований стан реальних конструкцій має більшу розбіжність з теоретичними розрахунками, ніж відповідних моделей, а також цінність результатів дійсної роботи реальних конструкцій, виникла необхідність проведення самостійних експериментальних досліджень натурних зразків розроблених ферм прольотом 18 м.

Відповідно до поставленої мети експериментальні дослідження включали такі завдання:

- визначення фактичних значень виникаючих в елементах ферми напружень, порівняння їх з теоретичними даними та виявлення ступеня розбіжності;
- виявлення граничної несучої здатності, форми і характеру руйнування конструкції;
- виявлення достатньої кількості в'язів в перерізі стояків.

Методика експериментальних досліджень. Відповідно до завдань експериментальних досліджень були запроєктовані та виготовлені на Житомирському заводі металоконструкцій дві ферми прольотом 18 м. Верхній пояс ферм був виконаний з вихідного двотавра 23Б2 за ТУ14-2-24-72, нижній пояс з двох спарених кутиків 75x6, стояків - з двох спарених кутиків 63x5. Конструктивне рішення ферм наведено на рис. 2.



Рис. 2. Зовнішній вигляд малоелементної кроквяної ферми прольотом 18 м з перфорованим верхнім поясом змінної жорсткості

Відповідно до поставленої мети - вивчення дійсної роботи конструкції, була запроектована та виготовлена спеціальна установка, яка дозволяла б провести такі випробування. В цілому експериментальна установка включала в себе дослідну конструкцію, систему розкріплення, систему створення навантаження, систему передачі навантаження на конструкцію і систему контролю стану конструкції.

Випробувана ферма збиралася в горизонтальному положенні з трьох відправних марок (рис. 3) і встановлювалася вертикально на колони. Для розкріплення з площини дії зовнішнього навантаження досліджувана ферма встановлювалася в блоці з аналогічною зв'язуючою фермою і з'єднувалася з нею за допомогою в'язів (рис. 4).

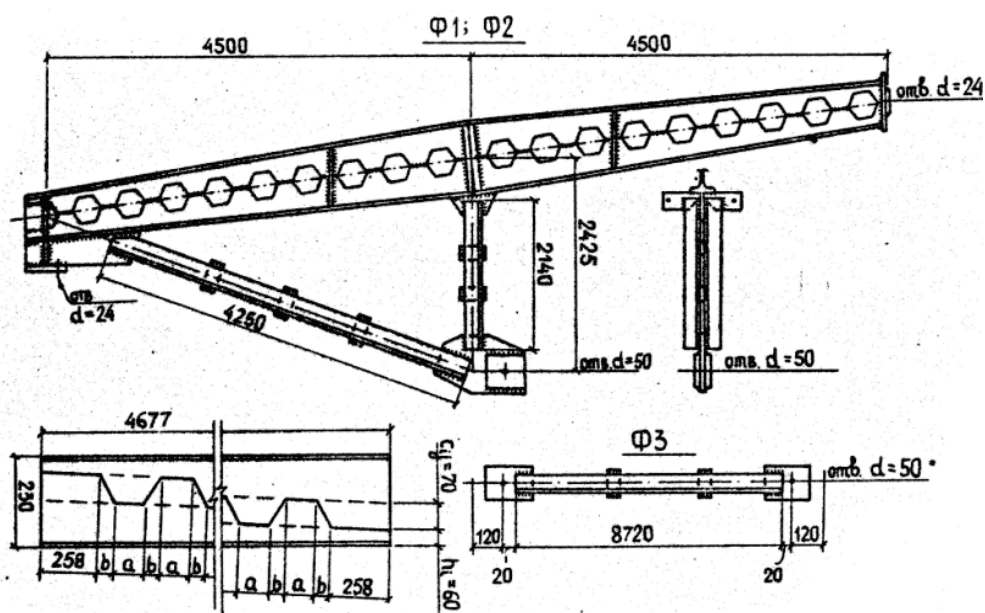


Рис. 3. Відправні марки ферми

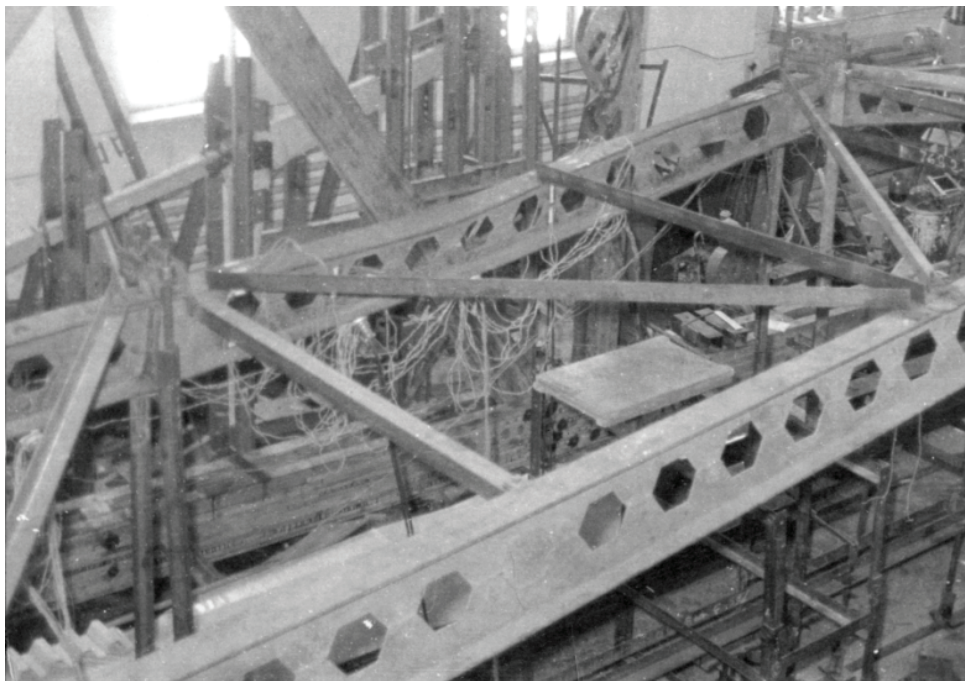


Рис. 4. Експериментальний блок з двох ферм

Імітація жорсткого торцевого блоку, наявного в типовій будівлі, здійснювалася за допомогою з'єднання верхнього поясу зв'язуючої ферми з нерухомими конструкціями в трьох точках: в коньковому вузлі та у верхніх вузлах стояків. В'язі виконувалися з одинарних кутиків. Їх з'єднання з фермами здійснювалося: в горизонтальній площині - у вигляді листових шарнірів; у вертикальній - у вигляді одноболтових з'єднань, що не перешкоджало вільному переміщенню випробуваної ферми у вертикальній площині та знімало вплив зв'язуючої ферми на випробувану.

Система створення навантаження складалася з основної та двох допоміжних маслостанцій з манометрами, контрольних домкратів в жорстких рамках з динамометрами для здійснення контролю за величиною навантаження, основних домкратів ДГ-25, створюючих навантаження безпосередньо на конструкцію, і маслопроводів, які з'єднують домкрати з маслостанціями. Основна маслостанція використовувалася для створення симетричного навантаження, при цьому всі домкрати створювали однакове навантаження. Допоміжні маслостанції в сукупності з основною призначались для створення несиметричного навантаження, при цьому домкрати лівої, правої півферм та конькового вузла створювали різні сили. Система передачі навантаження складалась з ряду траверс і тяжів, з допомогою яких навантаження від домкратів через шарові опори передавалась на верхній пояс випробуваної ферми, при цьому нижні вузли тяжів закріплювались в силовій підлозі за допомогою анкерних пристроїв (рис. 5).

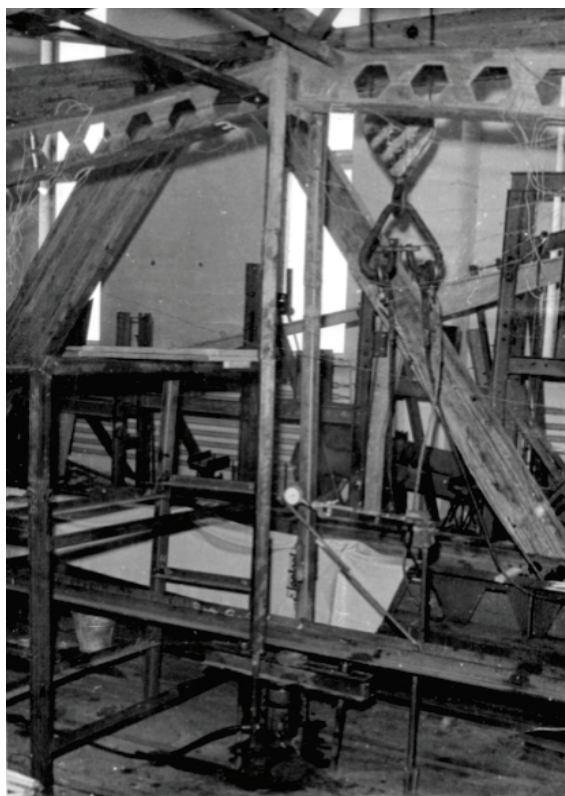


Рис. 5. Система передачі навантаження на коньковий вузол

Навантаження прикладалось до верхнього поясу випробуваної ферми в місцях обпирання огорожувальних конструкцій покриття (а саме, ребер передбачуваних залізобетонних плит покриття розміром 3х6 м), тобто в прольоті ферми розміщувалося п'ять навантажувальних пристроїв на відстані 3 м один від одного.

Система контролю стану конструкції включала апаратуру для вимірювання фібрових деформацій елементів за допомогою тензорезисторів, а також прогиноміри для визначення переміщень вузлів конструкції. Вимірюванню підлягали прогини конькового вузла і нижніх вузлів стояків, вузлів прикладання зовнішнього навантаження, а також деяких проміжних вузлів (рис. 6).

Загальна схема експериментальної установки наведена на рис.7.

Проведення тензометричних вимірів. В експериментальних дослідженнях використовувались стандартні прилади, які призначені для статичних випробувань, двох типів: 1) для вимірювань переміщень вузлів ферми; 2) для вимірювань деформацій волокон матеріалу окремих елементів. З другого типу приладів використовувались тензорезистори з базою 20 мм, які під'єднувались до електронно-цифрового тензометричного комплекту. На елементах випробуваної ферми було встановлено 250 тензорезисторів. Схеми розміщення тензорезисторів поділялись на три типи: 1) схеми розміщення

тензорезисторів в поперечних перерізах двотавра верхнього пояса; 2) схеми розміщення тензорезисторів в перерізах стояків та нижнього поясу; 3) схеми розміщення тензорезисторів на листових елементах.

Матеріал стояків і нижнього поясу знаходився в одноосно-напруженому стані, тому задача полягала у визначенні поздовжніх деформацій (нормальних до поперечних перерізів елементів). Бази тензорезисторів були орієнтовані за напрямком вимірюваних деформацій.

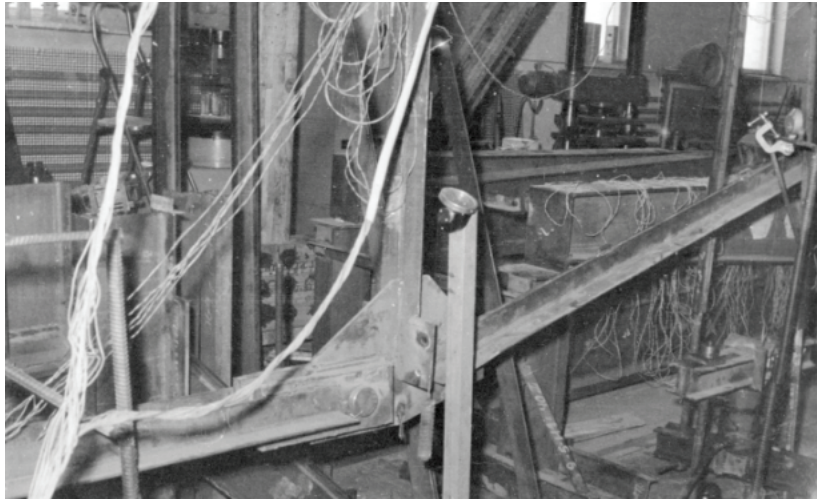


Рис.6. Вузол нижнього поясу ферми з встановленим прогиноміром

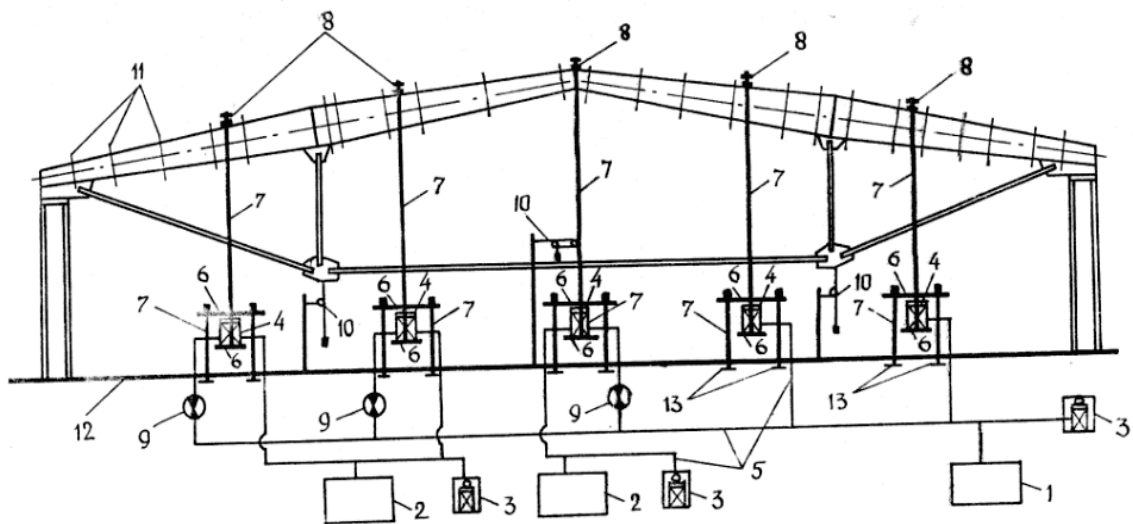


Рис. 7. Загальна схема експериментальної установки: 1 - основна маслостанція; 2 - додаткові маслостанції; 3 - контрольні домкрати; 4 - основні домкрати; 5 - система маслопроводів; 6 - траверси; 7 - тяжі; 8 - шарові опори; 9 - маслоперекриваючі вентиля; 10 - прогиноміри; 11- перерізи з наклеєними тензорезисторами; 12 - силова підлога; 13 - анкери

Стержні верхнього поясу працювали як стиснуто-зігнуті елементи. В певних перерізах з метою визначення напружень по висоті перерізу та контуру отвору розміщення тензорезисторів здійснювалось за різними напрямками у вигляді розетки з трьох датчиків. Напруження визначались в найбільш небезпечних, а також проміжних перерізах верхнього поясу, нижнього поясу та стояків. Перерізи з встановленими тензорезисторами наведені на рис. 8.

Організація випробувань. Випробування конструкції виконувалось за трьома схемами навантаження: симетричному, несиметричному та монтажному. Навантаження ферми виконувалось п'ятьма зосередженими силами за схемою, яка б забезпечувала імітацію навантаження ферми залізобетонними плитами покриття розміром 3x6 м з відповідною покрівлею.

Симетричне навантаження включало в себе вагу типових покрівельних матеріалів, огорожувальних конструкцій та снігу для II снігового району. Розрахункове навантаження на ферму складало $3,92 \text{ кН/м}^2$ або $23,52 \text{ кН/м}$. Зосереджена вузлова сила при цьому дорівнювала $70,56 \text{ кН}$.

Несиметричне навантаження розглядалось для випадку відсутності снігового навантаження на половині прольоту. Тут діяло навантаження лише від власної ваги огорожувальних конструкцій та покрівлі. Розрахункове навантаження на правій половині ферми складало $2,94 \text{ кН/м}^2$ або $17,64 \text{ кН/м}$. Зосереджена вузлова сила дорівнювала $52,92 \text{ кН}$. На лівій половині ферми навантаження залишалось тим же. Коньковий вузол навантажувався силою, середньою за величиною між силами лівої та правої півферм.

Перед безпосереднім випробуванням ферми виконувалось попереднє її навантаження, яке було початковим контрольним етапом. Перевірялася готовність та належна дія всіх підготовчих пристосувань, в першу чергу навантажувальних, а також надійність кріплення та правильність показів встановлених прогиномірів і тензометричної апаратури. Інтенсивність контрольного навантаження приймалась рівною 10% від максимальної розрахункової. При цьому відмічена поява деяких остаточних переміщень і деформацій, обумовлених обминанням з'єднань, місць обпирання, взаємними зміщеннями елементів і т.п. Неповорнення приборів на нуль після зняття контрольного навантаження не розглядалося як показник дефектності їх установки.

Навантаження в процесі випробувань прикладалися ступенями, рівними 10% від максимального навантаження, з подальшим зменшенням величини ступеня до 5% по мірі наближення до максимального значення. Витримка після прикладання навантаження для з'ясування закономірності прирощення переміщень та деформацій складала 15 хвилин.

Навантаження на ферму при випробуванні за кожною з прийнятих схем доводилося до розрахункового його значення, після чого знімалося. На кожному етапі випробувань знімалися показники прогиномірів і

тензометричної апаратури. В процесі випробувань були зняті поздовжні в'язі по нижнім вузлам стояків з метою визначення можливих їх переміщень в напрямку з площини ферми.

Руйнування ферми відбувалося за симетричного навантаження.

Результати експериментальних досліджень. Експериментальні дослідження ферми підтвердили, в цілому, розрахункові передумови та її придатність для використання в будівництві. Експериментом встановлено, що при досягненні рівня розрахункового навантаження видимих руйнувань в елементах ферми не спостерігалось. Отримані експериментально напруження не перевищили як розрахункового опору сталі, так і значень напружень, обчислених теоретично. Фактичні вертикальні переміщення вузлів ферми не перевищували $1/250$ прольоту. При вузловому навантаженні, рівному 88,60 кН, відбулася втрата стійкості верхнього поясу півферми між стояком і коньковим вузлом. Форма втрати стійкості наведена на рис. 8. Запас несучої здатності ферми склав 1,26, що є достатнім для даного виду конструкцій. Нижні вузли стояків в процесі всіх випробувань показали високу стійкість положення, тому був зроблений висновок про відсутність необхідності розкріплення в'язями цих вузлів.



Рис. 8. Форма втрати стійкості верхнім поясом

Аналіз результатів експериментальних досліджень та порівняння з теоретичними розрахунками. Обробка результатів експериментальних досліджень з побудовою епюр напружень виконувалась для кожного етапу навантаження ферми. В роботі отримані результати вимірювань при розрахунковому навантаженні за симетричною та несиметричною схемами його прикладання. X- координати розміщення перерізів верхнього пояса з встановленими тензорезисторами та номери окремих елементів пояса наведені на рис. 9. Їх підрахунок виконувався від конькового і опорних вузлів по напрямку до стояків.

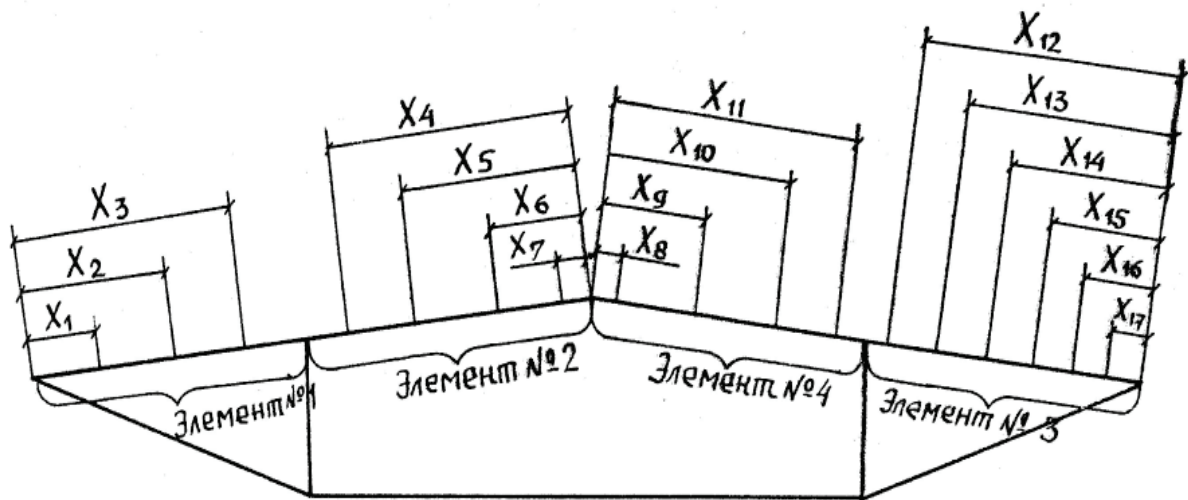


Рис. 9. X-координати перерізів верхнього пояса з встановленими тензорезисторами

Значення внутрішніх зусиль в перерізах, теоретичні та експериментальні значення напружень в крайніх фібрах верхньої та нижньої полиць двотавра верхнього пояса наведені в табл. 1.

Середнє відхилення теоретичних значень напружень від експериментальних склало 17%. Щодо розподілення напружень по висоті ослаблених перерізів, то порівняння експериментальних і теоретичних даних виконувалось шляхом порівняння площ епюр нормальних напружень за допомогою коефіцієнтів заповнення епюр ($K_z = A_{теор.} / A_{експ.}$). Середнє значення коефіцієнта склало 1,17.

Нормальні напруження в перерізах з суцільностінчастою ділянкою розподіляються аналогічно напруженням у звичайних балках.

Деформативність ферми в експериментальних дослідженнях оцінювалася за прогинами конькового вузла та нижніх вузлів стояків. Теоретичні розрахунки прогинів визначались за обчислювальним комплексом "Ліра". Оскільки жорсткість верхнього пояса мала змінний характер, то він при

розрахунку розбивався проміжними вузлами на 48 ділянок. В межах кожної такої ділянки жорсткість стержня вважалася постійною.

Таблиця 1

Внутрішні зусилля в перерізах верхнього пояса і значення напружень за симетричного зовнішнього навантаження

№ елемента	№ перерізу	Значення внутрішніх зусиль			Верхня полиця		Нижня полиця	
		M_x , кНм	N_x , кН	Q_x , кН	$\sigma_{теор.}$, МПа	$\sigma_{експер.}$, МПа	$\sigma_{теор.}$, МПа	$\sigma_{експер.}$, МПа
1	x_1	-18,05	-323,21	9,26	-54,29	-34,34	-184,57	-155,36
	x_2	-10,94	-323,21	9,26	-77,48	-71,74	-155,09	-127,34
	x_3	2,15	-323,21	9,26	-121,00	-103,51	-100,82	-82,98
2	x_4	-46,88	-330,20	65,92	32,71	17,20	-250,41	-239,16
	x_5	11,15	-321,56	-4,12	-142,39	-120,16	-78,01	-77,62
	x_6	5,16	-321,56	-4,12	-133,85	-112,96	-97,53	-83,36
	x_7	1,51	-321,56	-4,12	-127,62	-102,00	-11,72	-84,38
3	x_8	4,33	-321,56	4,12	-132,45	-116,50	-100,55	-90,58
	x_9	8,32	-321,56	4,12	-138,68	-117,12	-86,77	-81,94
	x_{10}	11,31	-321,56	4,12	-139,32	-117,86	-81,37	-66,48
	x_{11}	-33,55	-330,20	-65,92	1,29	-12,64	-220,94	-198,16
4	x_{12}	-52,47	-314,57	60,78	49,46	40,28	-256,59	-228,68
	x_{13}	-8,26	-314,57	60,78	-59,00	-49,92	-152,96	-132,54
	x_{14}	2,15	-323,21	-9,26	-112,55	-101,76	-109,27	-91,74
	x_{15}	-6,83	-323,21	-9,26	-89,45	-75,74	-139,63	-117,14
	x_{16}	-13,89	-323,21	-9,26	-68,32	-62,44	-166,20	-133,38
	x_{17}	-18,05	-323,21	-9,26	-54,29	-26,96	-184,57	-148,14

Таблиця 2

Порівняння теоретичних та експериментальних значень прогинів вузлів

Схема навантаження	№ вузла	Теоретичне значення $f_{теор.}$, см	Експеримен. значення $f_{експер.}$, см	$f_{експер.}/f_{теор.}$	f/l
Симетрична	1	6,48	5,66	0,87	1/318
	2	1,47	1,22	0,83	1/1475
	3	1,47	1,22	0,83	1/1475
Несиметрична	1	5,67	5,06	0,89	1/355
	2	3,11	2,56	0,82	1/703
	3	-0,53	-0,39	0,74	1/4615

Шляхом постановки достатньої кількості проміжних вузлів такий стержень добре апроксимувався системою кінцевих елементів з постійними по довжині жорсткісними параметрами. До того ж, значення жорсткості обчислювалися в ослаблених перерізах. Як показав експеримент, прийнята кількість заміняючих прямолінійних кінцевих елементів дозволяє з достатньою для практики точністю апроксимувати стержень з перемінною висотою перерізу.

Результати теоретичного розрахунку прогинів вузлів і порівняння їх з експериментальними результатами напередодні настання руйнування ферми наведені в табл. 2. Експериментальні значення прогинів не перевищили гранично допустимих, рівних $1/250$ прольоту, тобто 7,2 см.

Висновок. Проведені експериментальні дослідження підтвердили можливість використання розроблених ферм в реальному будівництві. Зокрема, сталеві кроквяні ферми прольотом 18 м з перфорованим верхнім поясом змінної жорсткості використані при будівництві експериментального матеріального складу на заводі залізобетонних виробів в м. Житомирі (рис.10).



Рис. 10 . Монтаж покриття матеріального складу на заводі залізобетонних виробів в м. Житомирі

Виявлено, що розходження фактичних значень нормальних напружень з теоретичними в пружній стадії роботи сталі склало до 20%, що відповідає результатам інших досліджень.

Встановлений запас несучої здатності ферми склав 1,26. Руйнування конструкції відбулося у вигляді втрати стійкості верхнього пояса з площини ферми в середній четверті прольоту, що відповідає характерним формам руйнування кроквяних сталевих ферм.

1. Жербін М.М., Дробязко Л.Є. Эффективность замены железобетонных конструкций особо легкими стальными. - Строительство и архитектура, 1984, №2, с. 17-19.

Zherbin M.M., Drobiazko L.Ie. Effektivnost zameny zhelezobetonnykh konstruktsiyi osobo lehkyumu stalnyumu. - Stroytelstvo y arkhytektura, 1984, №2, s. 17-19.

2. Налепя О.І., Чернолоз В.С. Ефективні металеві конструкції виробничих будівель з використанням перфорованих двотаврів змінної жорсткості та одинарних профілів. Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Збірник наукових праць. – Рівне: НУВГП, 2018. – Випуск 36. – С. 203 – 211.

Nalepa O.I., Chornoloz V.S. Efektyvni metalevi konstruktsii vyrobnychykh budivel z vykorystanniam perforovanykh dvotavriv zminnoi zhorstkosti ta odyarnykh profiliv. Resursoekonomni materialy, konstruktsii, budivli ta sporudy: Zbirnyk naukovykh prats. – Rivne: NUVHP, 2018. – Vypusk 36. – S. 203 – 211.

3. Налепя О.І., Філіпчук С.В., Шолота Т.Ю. Дослідження раціональної конструктивної форми сталеві малоелементної ферми прольотом 18 м. Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Збірник наукових праць. – Рівне: НУВГП, 2022. – Випуск 41. - С. 159 - 172.

Nalepa O.I., Filipchuk S.V., Sholota T.Iu. Doslidzhennia ratsionalnoi konstruktyvnoi formy stalevoi maloelementnoi fermy prolutom 18 m. Resursoekonomni materialy, konstruktsii, budivli ta sporudy: Zbirnyk naukovykh prats. – Rivne: NUVHP, 2022. – Vypusk 41. - S. 159 - 172.

4. Налепя О.І., Філіпчук С.В., Мисливий Т.А., Крейч М.М. Дослідження раціональності використання перфорованих двотаврів змінної жорсткості в сталевій малоелементній фермі. Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Збірник наукових праць. – Рівне: НУВГП, 2022. – Випуск 42. - С. 141 - 149.

Nalepa O.I., Filipchuk S.V., Myslyvyi T.A., Kreich M.M. Doslidzhennia ratsionalnosti vykorystannia perforovanykh dvotavriv zminnoi zhorstkosti v stalevii maloelementnii fermi. Resursoekonomni materialy, konstruktsii, budivli ta sporudy: Zbirnyk naukovykh prats. – Rivne: NUVHP, 2022. – Vypusk 42. - S. 141 - 149.

5. ДБН В.2.6–198:2014. Сталеві конструкції. Норми проектування. – Київ, 2014. – 199 с.

DBN V.2.6–198:2014. Stalevi konstrukciyi. Normi proektuvannya. – Kiyiv, 2014. – 199 s.

6. Билык С.И. Стальные колонны с перфорированной стенкой переменной высоты для бескрановых производственных зданий: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. - Киев, 1987, - 18 с.

Bilyk S.I. Stalnye kolonny s perforirovannoj stenkoj peremennoj vysoty dlya beskranykh proizvodstvennykh zdaniy: Avtoref. dis. ... kand. tehn. nauk. - Kiev, 1987, - 18 s.