

УДК 621.177; 621.314

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

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ НИЖЬОГО ПОЯСА БУДІВЕЛЬНОЇ ЗВАРНОЇ ФЕРМИ

Резюме. Виконано огляд існуючих програмних пакетів та виявлено, що комп'ютерне моделювання в середовищі ПК ANSYS Workbench 14.5 дає можливість комплексно враховувати багато вхідних параметрів системи, а, отже, звести до мінімуму вплив суб'єктивного чинника при проектуванні та підвищити вірогідність отриманих результатів. Вибрано конструкцію та схему навантаження зварної підкрювняної ферми. Виконано моделювання напружено-деформованого стану (НДС) нижнього пояса ферми при дії статичних навантажень різної величини. Отримано значення локальної поздовжньої деформації нижнього пояса ферми вздовж довжини ферми та поперечного прогину ферми вздовж нижнього пояса при різній інтенсивності зовнішнього статичного навантаження. Визначено напруження вздовж нижнього пояса ферми при різних рівнях навантаження. Виявлено координати точок на нижньому поясі ферми, де формуються максимальні напруження, які визначають тримкість ферми в цілому. Запропоновано метод підвищення тримкості ферми шляхом локального зміцнення нижнього пояса в місцях виникнення максимальних напружень.

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

Y. Kovalchuk; N. Shynhera; O. Rybachok

DESIGN OF THE STRESS-STRAINED STATE OF LOWER BELT OF THE WELD-FABRICATED FARM

Summary. The welded building farms are widely applied in modern construction due to their design variety, high ease of manufacturing and great bearing capacity. However, their design is difficult because of combination of many factors (structural, technological, operating, casual, emergency, etc.). Application of the classical methods of the welded farms design allows to take into account, at the same time as a rule, only constructive parameters and operation power factors. That is why the obtained results of classical calculations are of low probability while comparing with the results of operation or experimental studies of the farms. The analysis of the available software packages, which were used by other researchers, has been carried out. Their advantages and disadvantages while studying the stress-strained state (SSS) of the welded farms have been specified. It was revealed that computer modeling in software package ANSYS Workbench 14.5 enables to take into account in complex many input parameters of the system and minimize the influence of the subjective factor when designing and to raise the validity of the obtained results. The design and loading scheme of the weld-fabricated build farm have been chosen. Peculiarity of the computer modeling method in software package ANSYS Workbench 14.5 has been described, which is algorithmically based on the final element method. SSS modeling of the lower belt of the farm under static loadings of different value has been carried out. The value of the local longitudinal deformation of the lower belt of the farm along the length of the farm and transverse sagging of the farm along lower belt under different intensity of the external static loading has been obtained. The stress along lower belt of the farm under different loadings has been found. The SSS values were obtained in both numerical and graphic forms. The point coordinate on the lower belt of the farm, where maximum stresses are formed, which define the bearing capacity of the farm as a whole has been found. The method of raising the farm bearing capacity due to the local strengthening of the lower belt in the places of the maximum stresses initiation has been proposed. The methods of computer modeling for determination of SSS of the welded building farm elements have been applied. The revealed results of the studies can be applied when designing farm building elements or for the estimation of the farm bearing capacity during their operation, taking into account the complex influence of many factors.

Key words: welded farms, stress-strained state, bearing capacity, loss of the farm bearing capacity.

Постановка проблеми. Серед усіх тримких будівельних металоконструкцій зварні ферми знаходять широке застосування при спорудженні промислових об'єктів, спортивно-розважальних та торговельних центрів, мостових конструкцій, башт тощо. Їх проектування ускладнено комплексним поєднанням багатьох чинників упродовж експлуатації, які необхідно враховувати для отримання розрахункових результатів з високим рівнем вірогідності.

Класичні аналітичні методи розрахунку дають можливість враховувати лише якусь обмежену кількість вхідних даних, які, на думку конструктора, є визначальними. Зазвичай це конструктивні параметри ферми і величина експлуатаційних навантажень. Таким чином формується розрахункова схема зварної ферми, завдяки якій можна аналітично визначити показники напружено-деформованого стану (НДС) конструкції під впливом зовнішніх навантажень. Поза увагою залишаються технологічні особливості виготовлення ферми, кліматичні температурні градієнти, поєднання стохастичних чинників (вітер, сніг, сейсмічні впливи, аварійні ситуації), хоча вони суттєво впливають на тримку здатність досліджуваної конструкції, а часто стають причиною пошкодження чи навіть руйнування не лише фермової конструкції, але й споруди в цілому.

Сучасна комп'ютерна техніка й існуючі розрахункові методики, які базуються на прикладних програмних пакетах, дають можливість математично промодельовувати поведінку зварної ферми в цілому і її елементів зокрема, враховуючи комплексний вплив багатьох параметрів (матеріал конструкції, її конфігурацію, конструктивні особливості вузлів, технологію зварювання, пошкоджуючі чинники та ін.), включаючи стохастичні. Сучасні методи проектування дають можливість звести до мінімуму вплив суб'єктивних чинників і максимально наблизити результати розрахунків до показників, отриманих у процесі експлуатації ферм чи їх натурних випробувань.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Система автоматизованого проектування різноманітних типових конструкцій на сьогодні є досить поширеною і базується на різноманітній програмній базі. Розрахунок металевих конструкцій, зокрема зварних ферм, за допомогою програмних комплексів виклали у своїх роботах Дрокін А.В. [1], Алпатов В.Ю. (ПК ПОФСК-Мираж-ПСМК, «Лира-W», SCAD, Cosmos Works, Design Space) [2], Алдушкін Р.В. (ПК SCAD і Mathcad) [3], Дубенець В.Г., Савченко О.В. (ПК APM WinTruss) [4], Шингера Н.Я. (ПК ANSYS) [5] та ін.

При аналізі згаданих робіт виявлено недоліки. При переході від реальної конструкції до розрахункової схеми за методом граничних станів:

- 1) вводять шарнірно-стрижневу безмоментну розрахункову схему;
- 2) розглядають стійкість стиснених елементів конструкції без урахування гнучко-крутильної форми втрати стійкості;
- 3) приймають розрахунковий опір матеріалів меншим від нормативного (для підвищення надійності розрахунку дійсні міцнісні характеристики матеріалів штучно занижуються проектантом);
- 4) при оцінюванні стійкості стиснених стержневих елементів дуже наближено враховують умови їх закріплення.

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

У результаті цих недоліків одні конструкції можуть мати надмірні, а інші – недостатні запаси міцності.

На жаль, більшість робіт обмежена лише математичним моделюванням напружено-деформованих станів в елементах конструкцій за різних умов навантажування і в них не наведено інформації про верифікацію отриманих результатів через відсутність натурних або напівнатурних досліджень відповідних конструкцій.

У роботі [5] отримано порівняння результатів математичного моделювання в середовищі ПК ANSYS і напівнатурного силового експерименту з фізичною моделлю зварної будівельної підкроквяної ферми. Виявлено високий ступінь співпадання характеристик напружено-деформованого стану (НДС) у конструктивних елементах зварних ферми, визначених математичним моделюванням і напівнатурним силовим експериментом для низьких рівнів навантажування (0,96...0,92), та задовільний ступінь співпадання результатів при вищих навантаженнях (на кінці пружної області діаграми деформування) (0,90...0,85). Це свідчить про придатність ПК ANSYS для дослідження НДС зварних ферм та правильні методичні підходи при виборі основних допущень, спрощень та узагальнень.

Метою роботи є визначення показників НДС нижнього пояса зварної підкроквяної ферми при дії статичних навантажень із використанням комп'ютерного моделюючого експерименту в середовищі ПК ANSYS Workbench 14.5.

Постановка завдання (задачі). Для досягнення потавленої мети вирішено такі завдання:

- вибрано конфігурацію зварної будівельної ферми та схеми її навантажування;
- виконано комп'ютерний моделюючий експеримент для вибраної конструкції і схеми її навантажування з використанням прикладного програмного комплексу ANSYS Workbench 14.5;
- визначено показники НДС уздовж нижнього пояса зварної підкроквяної будівельної ферми при дії статичних навантажень.

Результати дослідження. Прийнято рішення дослідження НДС конструкції виконати для зварної підкроквяної ферми (рис.1). Запропоновано схему навантажування дослідного зразка в процесі експерименту (рис.2), яка відповідає умовам експлуатації ферм такого типу.

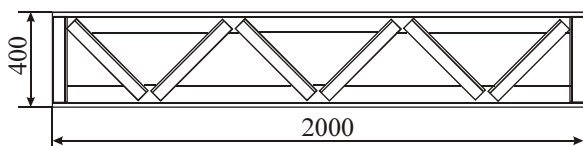


Рисунок 1. Конструкція зварної ферми

Figure 1. Design of the weld-fabricated farm

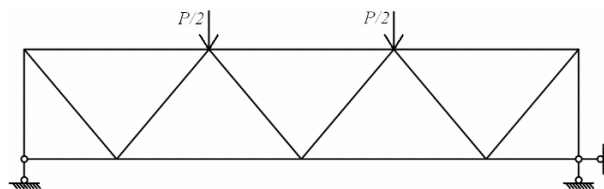


Рисунок 2. Схема навантажування дослідного зразка

Figure 2. Chart of the specimen loading

Таку конструкцію можна розглядати як повномасштабну ферму або як фізичну модель великогабаритної конструкції. Вибір такої ферми зумовлений технологічною можливістю для подальших натурних досліджень зразка і верифікації отриманих результатів комп'ютерного моделювання.

Для конструктивних елементів зварної підкроквяної ферми передбачено виготовлення зі стандартного вальцьованого рівнополічкового кутникового профілю 40×40×4 мм. У вузлах ферми стержні з'єднано за допомогою зварних швів, виконаних напівавтоматичним дуговим зварюванням. Послідовність накладання зварних швів при зварюванні ферми виконано згідно з технологією, яка передбачає отримання мінімальних викривлень, допустимих без подальшого рихтування ферми. Всі елементи досліджуваного зразка виготовлено зі сталі звичайної якості ВСт3пс за ДСТУ 2651:2005, ISO 1052–82. Усі зварні шви на зразку виконано напівавтоматичним дуговим зварюванням постійним струмом прямої полярності дровим електродом діаметром 1,2 мм Св-08Г2С однієї поставочної партії в середовищі CO₂ з дотриманням стандартизованих технологій. Робочий струм зварювання становив 110 А.

Розрахунок НДС нижнього пояса зварної підкрюквяної ферми під дією статичних навантажень виконано комп'ютерним моделюючим експериментом із використанням прикладного програмного пакета ANSYS Workbench 14.5, тому що він має ряд переваг, а саме:

- побудова моделі конструкції або імпорт їх з CAD систем (Solid Wokrs, Auto CAD, Inventor та ін.);
- вивчення реакції конструкції на різні фізичні впливи, такі, як вплив різних навантажень;
- оптимізація геометрії конструкції;
- на базі Workbench реалізовані інструменти для обміну й ефективного керування розрахунковими даними користувачів (ANSYS ЕКМ);
- висока продуктивність.

Програмне забезпечення ANSYS алгоритмічно базується на методі скінчених елементів. Мета скінчено-елементного аналізу – знайти відгук системи на заданий зовнішній вплив. Для розрахунку НДС використовується математична модель, особливостями якої є:

- геометрична модель CAD разом із заданою схемою і режимом навантажування є формалізованою моделлю (рис.3);
- скінчено-елементна сітка є математичним поданням геометричної моделі CAD, що є розрахунковою моделлю (рис.4);
- точність розрахунків визначається припущеннями фізичної моделі й щільністю сітки.

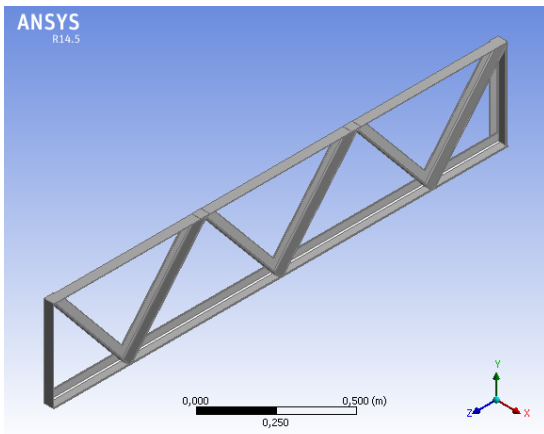


Рисунок 3. CAD – геометрична модель ферми

Figure 3. CAD – geometrical model of the farm

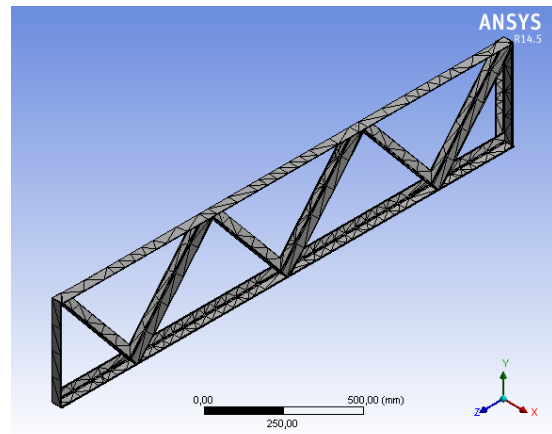


Рисунок 4. CAE – Скінченно-елементна сіткова модель ферми

Figure 4. CAE – complete-element net model of farm

Розв'язок задачі проходить через 4 ступені.

1. Основні допущення:
 - вибір типу аналізу (статичний, динамічний, модальний);
 - вибір контактної моделі;
 - вибір типу елементів (оболонкові або твердотілі).
2. Препроцесинг:
 - побудова геометричної моделі;
 - вибір матеріалу об'єкта і зазначення всіх його необхідних властивостей;
 - генерація сітки;
 - навантаження і закріплення конструкції;

- вибір розрахункових параметрів.
- 3. Розрахунок.
- 4. Постпроцесинг:
 - перегляд сформованого файлу результатів;
 - перевірка достовірності рішення (всі фізичні величини представлені в графічному вікні ANSYS у вигляді картинок, таблиць, графіків, анімацій).

Для розв'язання задачі НДС досліджуваної ферми виконано такі основні кроки конструкційного аналізу:

- 1) транслювання геометричної моделі з CAD системи;
- 2) задавання властивостей матеріалів;
- 3) генерування сітки;
- 4) закріплення моделі;
- 5) прикладання навантаження;
- 6) вибір параметрів вирішувача;
- 7) задавання списку розрахункових результатів і проведення розрахунку;
- 8) перегляд розрахункових результатів;
- 9) генерування звіту.

У Workbench на початку розв'язку задачі вибирається тип інженерного аналізу, після чого програма вставляє в схему проекту відповідний блок, який містить усі необхідні етапи виконання аналізу. На рис.5 наведено блок статичного аналізу, який використано в даному дослідженні.

За допомогою програмного комплексу ANSYS Workbench 14.5 виконано статичний тип аналізу фізичної моделі. Статичний розрахунок ферми полягає у визначенні переміщень вузлів, реакцій опор, зусиль у стержнях, напружень і деформацій стержнів, що виникають у конструкції під дією навантажень. У статичному аналізі передбачено, що всі навантаження і реакції конструкції на навантаження якщо й змінюються в часі, то дуже повільно.

За результатами виконання комп'ютерного моделюючого експерименту отримано величину поздовжньої деформації нижнього пояса ферми, значення прогину ферми та напруження вздовж нижнього пояса ферми при різних рівнях навантаження як у чисельному (табл.1), так і в графічному (рис.6,7,8) вигляді.

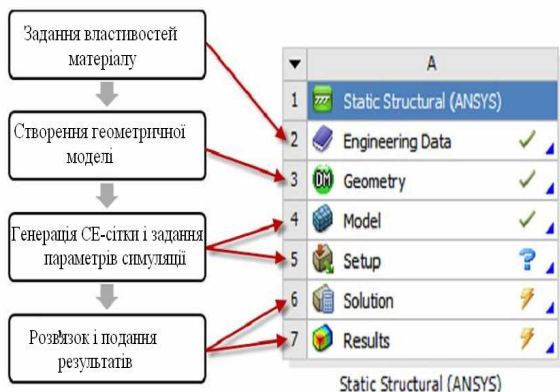


Рисунок 5. Блок статичного аналізу

Figure 5. Block of static analysis

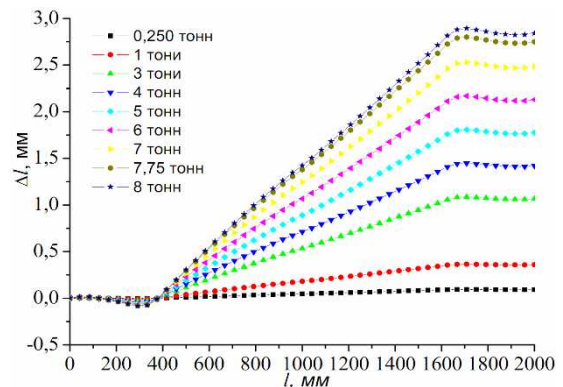


Рисунок 6. Видовження вздовж нижнього пояса ферми при різних рівнях навантаження

Figure 6. Lengthening along the lower belt of the farm under different levels of loading

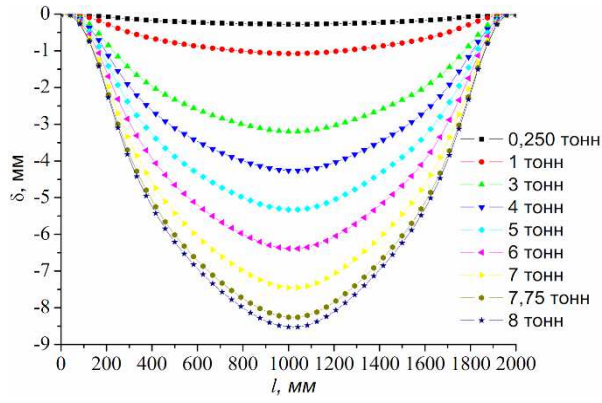


Рисунок 7. Прогин ферми вздовж нижнього пояса при різних рівнях навантаження

Figure 7. Bending of the farm along the lower belt under different levels of loading

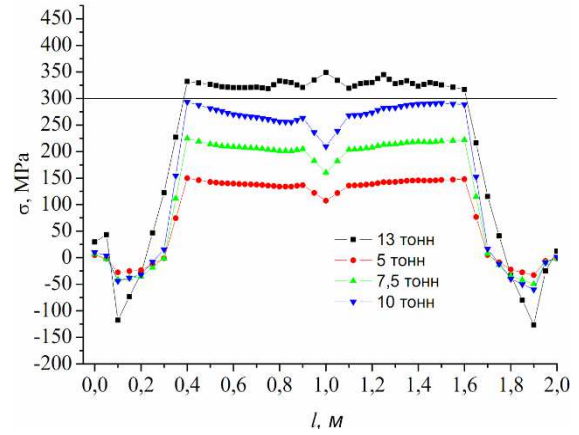


Рисунок 8. Напруження вздовж нижнього пояса ферми при різних рівнях навантаження

Figure 8. Tension along the lower belt of the farm under different levels of loading

Таблиця 1

Параметри НДС зварної ферми, отримані комп'ютерним моделюючим експериментом

№ з/п	Навантаження P , кН	Напруження σ , МПа	Видовж. нижнього пояса Δl , мм	Прогин ферми δ , мм	№ з/п	Навантаження P , кН	Напруження σ , МПа	Видовж. нижнього пояса Δl , мм	Прогин ферми δ , мм
1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
1	5,0	15,7	0,18	0,54	10	45,0	139,4	1,62	4,78
2	10,0	31,2	0,36	1,07	11	50,0	154,8	1,80	5,32
3	15,0	46,6	0,54	1,60	12	60,0	185,7	2,16	6,38
4	20,0	62,1	0,72	2,13	13	70,0	216,7	2,521	7,44
5	25,0	77,6	0,90	2,67	14	80,0	247,9	2,88	8,52
6	30,0	93,0	1,08	3,20	15	90,0	280,6	3,24	9,67
7	35,0	108,5	1,26	3,73	16	100,0	300,8	3,60	11,16
8	40,0	123,9	1,44	4,25	17	110,0	310,6	8,92	26,42
9	5,0	15,7	0,18	0,54	18	130,0	333,6	24,9	58,74

Таким чином, за результатами комп'ютерного моделюючого експерименту виявлено параметри НДС нижнього пояса зварної ферми під дією статичних навантажень. Очевидним є концентрація напружень на нижньому поясі в місці першого й останнього вузла (0,4 м і 1,6 м). За результатами досліджень виявлено, що настання граничного стану конструкції в цілому можна попередити, локально зміцнивши нижній пояс у вказаних місцях. Таким чином можна підвищити загальну тримкість ферми без значних матеріальних витрат, тобто не збільшуючи сортамент металопрокату для всієї конструкції.

Висновки. У виконаних дослідженнях із застосуванням комп'ютерного моделювання використано розрахункові методи будівельної механіки та механіки деформованого твердого тіла, метод скінчених елементів, який реалізовано в програмному комплексі ANSYS Workbench 14.5. Виявлено показники НДС уздовж нижнього пояса підкрюквяної зварної ферми та запропоновано шляхи підвищення тримкості ферми. Описаний комп'ютерний моделюючий експеримент доцільно виконувати при проектуванні зварних будівельних ферм для оцінювання НДС в елементах конструкції. За результатами розрахунків можна суттєво підвищити тримкість проектованої конструкції шляхом локального зміцнення елементів ферми, зокрема нижнього пояса. Описана методика моделювання може бути використана для перевірих розрахунків існуючих зварних будівельних ферм упродовж їх експлуатації й попередження настання граничного стану при дії можливих силових впливів.

Conclusions. Methods of structural mechanics, fracture mechanics and finite element method were used in researches that were performed with the use of computer simulation on ANSYS Workbench 14.5. The values of stress-strain state along the lower belt of welded farm have been found. Ways of increasing bearing capacity of the farm were proposed. Computer-simulated experiment that is described in the article is appropriate to be performed in the design of welded construction of farms for evaluation of stress-strained state in the elements of construction. According to the calculations it is possible to increase the carrying capacity of the designed construction with local strengthening of the elements farm lower belt. The described technique of construction modeling can be used for verification of the available welded farms constructions during their operation and for the prevention of the limit state condition under the action the possible force impacts.

Список використаної літератури

1. Дрокин, А.В. Оптимизация строительных конструкций, подверженных силовым и термическим воздействиям: автореф. дис. ... канд. техн. наук : специальность ВАК 05.23.01 «Строительные конструкции, здания и сооружения» [Текст] / А.В. Дрокин. – Белгород, 2003. – 20 с.
2. 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.
3. 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.
4. Дубенець, В.Г. Практикум з обчислювальної механіки [Текст] / В.Г. Дубенець, О.В. Савченко // Розрахунок і проектування конструкцій ферм на АРМ WinTruss. – К.: Знання, 2007. – 172 с.
5. 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.

Отримано 27.06.2014