

УДК 621.177; 621.314

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

*Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя*

## **МОДЕЛЮВАННЯ ПОВЕДІНКИ ЗВАРНОЇ КРОКВЯНОЇ ФЕРМИ ПРИ РОЗПОДІЛЕНИХ НАВАНТАЖЕННЯХ**

**Резюме.** Досліджено поведінку типової сталеваної зварної кроквяної ферми 36 x 9 м при дії на її верхній пояс рівномірно розподіленого статичного навантаження. Виконано комп'ютерний моделюючий експеримент із використанням програмного пакета ANSYS Workbench 14.5. При формуванні вхідної інформаційної бази для математичної моделі враховано конструктивні, технологічні та експлуатаційні особливості конкретної досліджуваної ферми. Параметри скінчено-елементної моделі отримано з попередніх експериментальних досліджень авторів, які передбачали верифікацію результатів комп'ютерного моделюючого експерименту на підставі паралельно виконаних напівнатурних силових експериментів. Такий методичний підхід забезпечив високий рівень вірогідності отриманих результатів моделювання. На підставі рекомендацій нормативних документів отримано значення граничного розподіленого статичного навантаження на верхній пояс ферми  $q=70$  кН/м, яке враховує власну вагу ферми і дахового накриття, дію вітрового, дощового та снігового впливу. Виявлено, що при цьому верхній пояс ферми працює за умов пружної деформації з можливістю довантаження на 42,8%. Однак у нижньому поясі ферми на ділянках вузлів формуються напруження, які на 12,9% перевищують межу пружності конструкційної сталі ВСт3, з якої виготовлена досліджувана ферма. Для безпечної експлуатації кроквяної ферми рекомендовано знизити рівень розподіленого навантаження до  $q=62$  кН/м. Досягти цього можна зменшенням кроку між фермами або шляхом локального зміцнення конструкції. Описані дослідження доцільно виконувати при проектуванні нових зварних ферм, їх реконструкції або для перевірочних розрахунків зварних кроквяних ферм, які експлуатуються.

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

**Y. Kovalchuk, N. Shynhera, O. Kachka**

## **SIMULATION OF THE WELDED ROOF TRUSS BEHAVIOUR UNDER DISTRIBUTED LOADINGS**

**Summary.** The paper deals with the typical 36x9m size welded steel roof truss behavior under the influence of evenly distributed static load of different intensity on its top chord. Computer simulation is performed taking advantage of ANSYS Workbench 14.5 software that is algorithmically based on finite element method. Structural, technological and operational features of the investigated truss are considered during the formation of input information base for mathematical model. Finite-element model parameters were received from the earlier experimental researches of the authors who predicted the computer simulation experiment results verification as the result of simultaneously performed semi natural load-bearing experiments. Such methodical approach provided high validity of the modeling results to be obtained.

The value of the distributed static yield load on the truss top chord  $q = 70$  kN/m was obtained taking into account the weight of truss and roof covering themselves, the wind, rain and snow effect, and basing on the standard regulations recommendations. According to the simulation results the stress-strain state parameters of the construction were obtained.

The welded roof truss behavior under the extreme operating loading was evaluated. It was discovered that the top chord of the truss operates under elastic deformation conditions the possibility of additional loading being 42.8%.

However, in the joint areas of bottom chord tension emerge, which exceed the elasticity yield of S235J2G3 steel by 12.9% of which the frame is made. In order to ensure the safe operation of the roof truss it is recommended to reduce the distributed load from  $q=70$  kN/m to  $q=62$  kN/m that is by 12.9%. It can be achieved by reducing the distance between trusses. It is recommended to reduce the tension in the bottom chord of the

*truss to the elasticity yield level by the local strengthening of the construction. These researches are worth being conducted while designing new welded trusses, their reconstruction, or for the verifying calculations of welded roof trusses under operation.*

**Key words:** *welded truss, stress-strain state, bearing capacity, truss strength failure.*

**Постановка проблеми.** Кроквяні ферми призначені для утримування конструкції покрівлі й спираються на колони безпосередньо або опосередковано через підкроквяні ферми, якщо крок колон більший за крок кроквяних ферм. Елементи ферми сприймають навантаження від власної ваги, конструкції накриття, вітрового, дощового та снігового впливу і передають їх на фундамент через опорні колони. Міцність і жорсткість кроквяних ферм повинна забезпечуватися на етапі проектування конструкції.

При невеликих навантаженнях та великих прогонах ферми застосовувати доцільніше, ніж суцільні балки, завдяки раціональному використанню матеріалу стержнів – при осьових зусиллях нормальні напруження розподіляються по перерізу рівномірно, в той час як при згині найбільш напруженими є тільки крайні волокна.

Зазвичай кроквяні ферми розраховують, виходячи з граничного стану під впливом зовнішніх навантажень.

Класичні розрахункові методики передбачають ряд припущень. Вони не враховують рівномірне розподілення зовнішніх навантажень на верхній пояс кроквяної ферми, а приводять їх до вузлових сил. Розрахункову довжину всіх стержнів ферми вважають рівною відстані між центрами вузлів. Такі розрахункові припущення знижують вірогідність отриманих результатів, а, отже, для забезпечення надійності конструкції, передбачають використання завищених коефіцієнтів запасу міцності й матеріаломісткості.

Особливістю сучасних досліджень зварних ферм є застосування потужної обчислювальної техніки і наявних програмних пакетів для комп'ютерного моделювання поведінки ферм різного ступеня складності при комплексному впливові конструктивних, технологічних, експлуатаційних, аварійних та стохастичних чинників. Таким чином забезпечується вища вірогідність отриманих результатів, підвищується надійність конструкції, знижується її матеріаломісткість, а, отже, і вартість.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** 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) [1], Алдушкін Р.В. (ПК SCAD і Mathcad) [2], Шингера Н.Я. (ПК ANSYS Workbench 14.5) [3] та ін. Кожен з використаних програмних комплексів дає можливість виявити поведінку зварних ферм та визначити показники напружено-деформівного стану (НДС) в елементах конструкції при різноманітних зовнішніх впливах.

Проблемним питанням у відомих дослідженнях є оцінювання ступеня вірогідності результатів, отриманих комп'ютерним моделюючим експериментом. Однак у літературі подано досить мало таких результатів через високу трудо- і матеріаломісткість натурних досліджень зварних ферм. Відомі результати натурних силових досліджень зварних ферм [4] та паралельного дослідження показників НДС зварних ферм комп'ютерним моделюючим експериментом у середовищі ПК ANSYS Workbench 14.5 і напівнатурним силовим експериментом [5]. Так в роботі [5] виявлено вірогідність результатів комп'ютерного моделювання за величиною поперечної деформації ферми на рівні 0,96...0,98, що свідчить про правильно вибрані параметри скінченно-елементної моделі й методику моделювання. Однак описані дослідження виконано лише для підкроквяної зварної ферми.

Висока продуктивність проектних розрахунків і точність отримуваних результатів зумовлюють доцільність застосування ПК ANSYS Workbench 14.5 для

дослідження поведінки зварних кроквяних ферм при розподілених навантаженнях на верхній пояс.

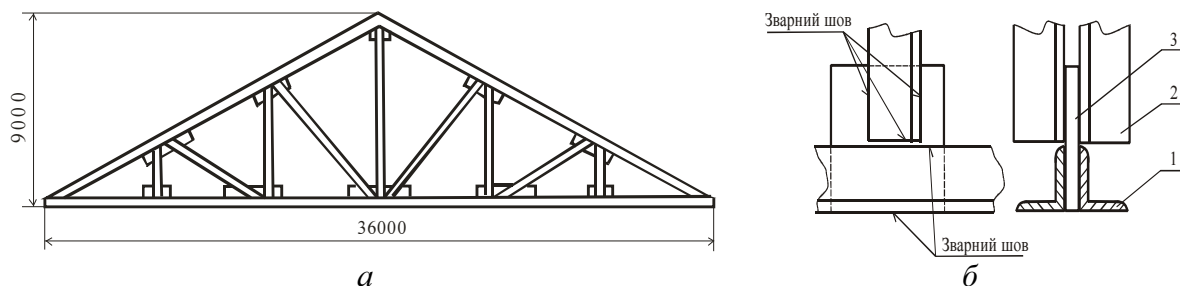
**Метою роботи** є визначення показників НДС зварної кроквяної ферми при дії статичних навантажень за рівномірно розподіленою вздовж верхнього пояса схемою, що відповідає навантаженню кроквяної ферми в реальних умовах експлуатації.

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

- вибрати конструкцію зварної ферми та схему її навантажування;
- визначити величину і характер дії силових чинників на ферму;
- вибрати конструктивні, технологічні, експлуатаційні, аварійні та стохастичні параметри, які будуть враховані в комп'ютерному моделюючому експерименті;
- розробити скінченно-елементну модель для дослідження конструкції;
- виконати комп'ютерний моделюючий експеримент для різної інтенсивності силових впливів із використанням прикладного програмного комплексу ANSYS Workbench 14.5;
- виявити параметри НДС кроквяної ферми для різних рівнів рівномірно розподіленого навантаження;
- зробити аналіз отриманих результатів моделювання та дати рекомендації щодо підвищення тримкості досліджуваної конструкції.

**Результати дослідження.** Функціонально в будівлі кроквяна ферма входить до складу тримкої дахової конструкції. Опорними кінцями ферму встановлено на закладні елементи бетонних підкrokвяних балок, які в свою чергу, закріплено на верхніх торцях бетонних колон.

Для виявлення поведінки кроквяної ферми за методикою комп'ютерного моделюючого експерименту запропоновано типову плоску зварну кроквяну ферму, основні конструктивні особливості якої подано на рис. 1.



**Рисунок 1.** Конструкція досліджуваної ферми: а – головний вигляд; б – тригілковий вузол на нижньому поясі

**Figure 1.** Construction of examined truss: a – general appearance; b – three branch junction on the bottom chord

Ферму виготовлено зі спареного сталюого вальцьованого кутникового профілю 120x120 мм з товщиною стінки 12 мм (рис. 1) як для поясів (поз. 1 на рис. 1б), так і розкосів (поз. 2 на рис. 1б). Ферма має різні типи вузлів – три-, чотири- і п'ятигілкові. Вузли виконано зі вставними сталюими пластинами товщиною 16 мм (поз. 3 на рис. 1б). Усі елементи досліджуваного зразка виготовлено зі сталі звичайної якості ВСт3пс ДСТУ 2651:2005, ISO 1052 – 82. Механічні й технологічні властивості цієї сталі вказано у вхідній інформаційній базі математичної моделі ферми.

Серед конструктивних особливостей в моделі враховано, що для підвищення осьової жорсткості поясів, стійок і розкосів між спареними стержнями вздовж всіх конструктивних елементів ферми з кроком 1 м приварені вставні пластини товщиною 16 мм. Розмір цих пластин 120x120 мм.

Серед технологічних особливостей в моделі враховано, що з'єднання елементів ферми виконано ручним дуговим зварюванням за стандартизованими технологіями електродом АНО-21 діаметром 5 мм постійним струмом величиною 350 А. Катет зварного шва 8 мм.

Для визначення фактичного експлуатаційного навантаження  $q$  на  $1 \text{ м}^2$  покриття використано методику [6].

Для виконання досліджень запропоновано схему навантажування експериментального зразка (рис. 2), яка відповідає реальним умовам експлуатації конструкції. Для цієї ферми виконано перевірочний розрахунок і виявлено її поведінку при різній інтенсивності зовнішнього навантаження. Виходячи з розмірів ферми і поздовжнього кроку встановлення сусідніх ферм, визначено значення розрахункового експлуатаційного рівномірно розподіленого навантаження на верхній пояс ферми  $q$ , яке становитиме  $70 \text{ кН/м}$ . Воно включає навантаження від власної ваги зварної кроквяної ферми, дахового накриття та критичного снігового навантаження для кліматичних умов західного регіону України. Ферма не застосовується для утримування кранових шляхів чи інших конструкцій, які зумовлюють додаткові силові впливи, тому при моделюванні їх не враховують.

Внаслідок такого навантаження на краях ферми (в місцях А і В) (рис. 2) виникають опорні реакції відповідно  $R_A$  і  $R_B$ . У конструктивних елементах ферми (поясах, розкосах, стояках та вузлах) формуються внутрішні напруження, а під їх впливом настають деформації, величини яких визначаються параметрами НДС цих елементів.

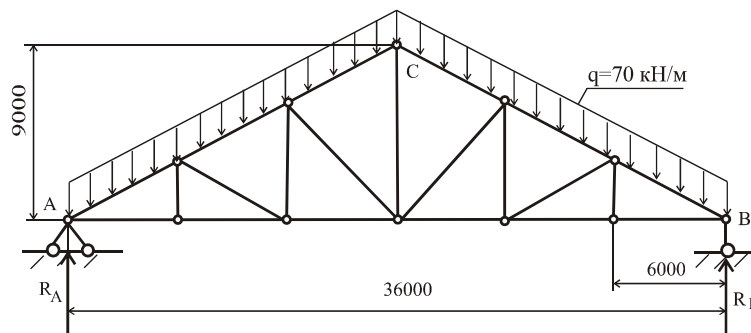


Рисунок 2. Схема навантажування досліджуваної ферми

Figure 2. Loading scheme of examined truss

Значення цих параметрів і поведінку зварної кроквяної ферми при розподілених статичних навантаженнях на верхній пояс досліджуваної конструкції виявлено комп'ютерним моделюючим експериментом із використанням прикладного програмного пакета ANSYS Workbench 14.5, який алгоритмічно базується на методі скінчених елементів. При цьому враховано конструктивні й технологічні особливості конкретної досліджуваної ферми.

Комп'ютерне моделювання поведінки кроквяної ферми при дії розподілених навантажень включає такі основні кроки:

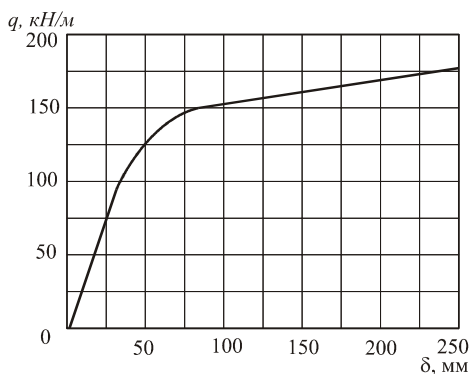
- 1) транслювання геометричної моделі з CAD системи;
- 2) формування вхідної інформаційної бази для моделі (властивостей матеріалів, конструктивних і технологічних особливостей ферми);
- 3) генерування сітки;
- 4) закріплення моделі;
- 5) прикладання навантаження;
- 6) формування списку розрахункових результатів і виконання розрахунків;

- 7) перегляд розрахункових результатів;
- 8) генерування звіту.

При формуванні параметрів скінченно-елементної моделі використано масиви, аналогічно з дослідженнями [5], застосування яких забезпечило високу вірогідність отриманих показників НДС в елементах ферми.

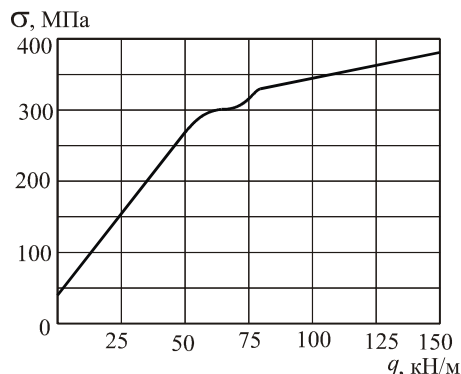
За результатами моделювання отримано звіт про показники НДС елементів досліджуваної конструкції для різних рівнів рівномірно розподіленого статичного навантаження вздовж верхнього пояса ферми. Інформацію отримано як в чисельному, так і у візуалізованому вигляді. Частина результатів дослідження НДС подано на рис. 3, 4, 5.

За рівнем прогину верхнього правого пояса ферми (рис. 3) виявлено, що досліджувана конструкція за умови навантажування верхнього пояса рівномірно розподіленим статичним зусиллям 70 кН/м працюватиме в умовах пружної деформації. Вичерпування пружної ділянки деформування настане вже при розподіленому навантаженні на рівні 100 кН/м, що дає можливість витримати без пошкоджень аварійні перевантаження до 42,8% від проектних (експлуатаційних).



**Рисунок 3.** Діаграма прогину верхнього правого пояса ферми

**Figure 3.** Chart of deflection of top right chord of the truss



**Рисунок 4.** Максимальні напруження в нижньому поясі ферми при різних рівнях розподіленого навантаження

**Figure 4.** Maximum stress levels in the bottom chord of the truss at various levels of distributed loading

Однак з рис. 4 очевидно, що при розподіленому навантаженні  $q=70$  кН/м в нижньому поясі досліджуваної ферми виникають напруження 315 МПа, які перевищують межу текучості матеріалу. Конструкція починає працювати за межею пружності. Найбільше розподілене навантаження на верхній пояс ферми, яке не зумовлюватиме пластичних деформацій елементів конструкції, що дорівнює  $q=62$  кН/м (див. рис. 4). Отже експлуатаційне розподілене навантаження  $q=70$  кН/м зумовлюватиме перевантаження конструкції на 12,9% і формуватиме в нижньому поясі ферми ділянки пластичних деформацій. Ці пластичні ділянки локалізовані навпроти вузлів на нижньому поясі. Пластичні деформації є особливо небезпечними при дії циклічних навантажень, оскільки зумовлюють малоциклове втомне пошкодження і руйнування конструкції при незначній кількості циклів. За таких умов для безаварійної роботи конструкції доцільно виконати локальне підсилення ділянок нижнього пояса ферми, де формуються максимальні напруження, або обмежити рівень експлуатаційного навантаження на верхній пояс до  $q=62$  кН/м шляхом недопущення снігового покриву граничної товщини [6].

За результатами виконання комп'ютерного моделюючого експерименту з дослідження поведінки зварної кроквяної ферми при навантажуванні з використанням прикладного програмного пакета ANSYS Workbench 14.5 отримано візуальну картину

деформування елементів досліджуваної конструкції (рис. 5).

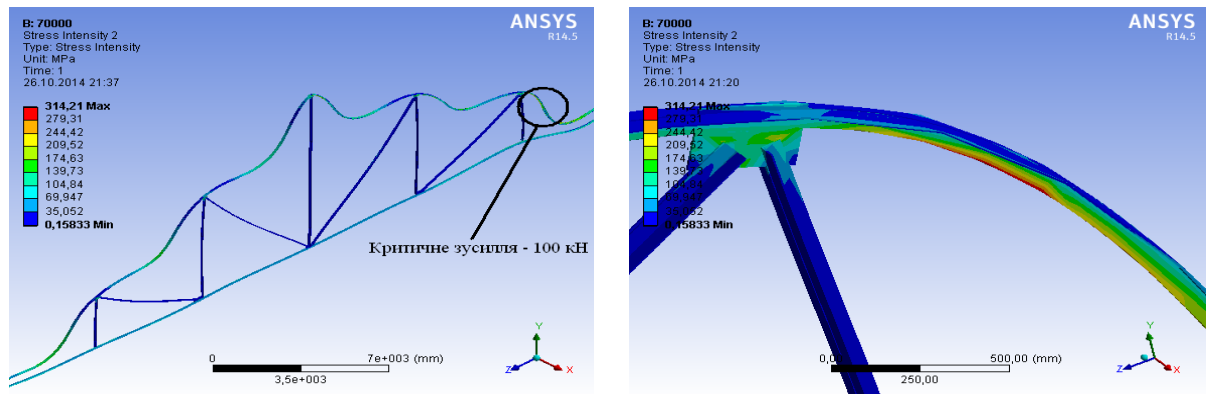


Рисунок 5. Деформування верхнього пояса ферми на рівні граничного стану

Figure 5. Deformation of the top chord of the truss on the limit state level

Таким чином, за результатами комп'ютерного моделюючого експерименту виявлено кількісну та якісну картину поведінки зварної кроквяної ферми під дією розподілених статичних навантажень на верхній пояс.

Описаний комп'ютерний моделюючий експеримент доцільно виконувати при конструюванні зварних кроквяних ферм та для попередження настання граничного стану в існуючій конструкції зварних кроквяних ферм.

**Висновки.** За результатами дослідження отримано чисельну й графічну інформацію про параметри НДС в елементах конструкції та візуалізацію поведінки ферми при її навантажуванні. Виявлено, що проектне рівномірно-розподілене на верхній пояс ферми навантаження становить  $q=70$  кН/м. При такому навантаженні верхній пояс ферми працює в умовах пружної деформації з запасом за зусиллям 42,8%. Критичні напруження виникають у нижньому поясі на ділянках навпроти вузлів. Рівень перевантаження тут становить 12,9%. Для надійної експлуатації досліджуваної конструкції доцільно виконати локальне зміцнення вузлових ділянок на нижньому поясі або зменшити рівень граничного розподіленого навантаження на верхній пояс ферми з  $q=70$  кН/м до  $q=62$  кН/м. Практично досягти цього можна зменшенням кроку між фермами.

Описані дослідження і їх результати доцільно застосовувати для перевірочних розрахунків ферм, які знаходяться в експлуатації, та при проектуванні чи реконструкції кроквяних ферм.

**Conclusions.** The numerical and graphical information about stress-strain state parameters in the construction elements based on the research findings were obtained. The pattern of loaded truss behavior was visualized. It was found that evenly distributed loading on the top chord of the truss is  $q = 70$  кН/м. At such loading level the top chord of the truss operates under elastic deformation conditions with the reserve force of 42.8%. Critical stress levels emerge in the bottom chord opposite the joints areas. Here the level of overloading is 12.9%. For reliable operation of examined construction it is needed to perform local strengthening of the joint areas on the bottom chord or reduce the critical distributed load on the top chord of the truss from  $q=70$  кН/м to  $q = 62$  кН/м. Practically it can be achieved by reducing the distance between trusses.

The research results and their obtaining methods are useful for verifying calculations of trusses that are being operated and in design or reconstruction of the roof trusses.

#### Список використаної літератури

1. Алпатов, В.Ю. Оптимальное проектирование металлических структур: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спеціальність ВАК 05.23.01 «Строительные конструкции, здания и сооружения» [Текст] / А.В. Дрокин. – Самара, 2002. – 23 с.
2. Алдушкин, Р.В. Развитие и совершенствование рациональных методов усиления и регулирования усилий в металлических конструкциях балочного типа и фермах: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спеціальність ВАК 05.23.01 «Строительные конструкции, здания и сооружения» [Текст] / Р.В. Алдушкин. – Орел, 2008. – 20 с.
3. 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 [Текст] / Наталія Ярославівна Шингера. – Тернопіль, 2012. – 166 с.
4. Еремин, К.И. Оценка остаточного ресурса строительных металлоконструкций по результатам натуральных испытаний [Текст] / К.И. Еремин, С.А. Нишета // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 1997. – № 3. – С. 39 – 41.
5. Верифікація результатів моделювання напружено-деформованого стану зварної ферми [Текст] / П.В Ясній, Я.О. Ковальчук, Н.Я. Шингера, О.І. Рибачок // 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.
6. ДБН В.1.2-2:2006 «Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Навантаження і впливи. Норми проектування». – Київ, Мінбуд України, 2006, – 75 с.

*Отримано 29.06.2015*