

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

СИДОРАК ДМИТРО ПАВЛОВИЧ

УДК 624.014

ДИСЕРТАЦІЯ
РАЦІОНАЛЬНІ СТАЛЕВІ КОМБІНОВАНІ КРОКВЯНІ ФЕРМИ

192 – Будівництво та цивільна інженерія

19 Архітектура і будівництво

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ Сидорак Дмитро Павлович

Науковий керівник

Гоголь Мирон Васильович,
доктор технічних наук, професор

Анотація

Сидорак Д.П. Раціональні сталеві комбіновані кроквяні ферми – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 192 Будівництво та цивільна інженерія (19 – Архітектура та будівництво). – Національний університет «Львівська політехніка», Львів, 2024.

Дисертаційна робота присвячена пошуку раціональних конструктивних форм та підвищенню ефективності роботи комбінованих сталевих ферм покриття.

У першому розділі проведено аналіз літературних джерел, зокрема щодо сучасних тенденцій в застосуванні сталевих конструкцій у покриттях будівель. Показано, що основними напрямками розвитку і вдосконалення сталевих кроквяних ферм є мінімізація маси та зменшення працемісткості. Виявлено, що розробка нових ефективних конструктивних форм кроквяних ферм дозволяє розкрити додаткові резерви несучої здатності і знизити металоємність конструкцій. Показано можливість принципової зміни конструктивної форми сталевих кроквяних ферм створенням комбінованих сталевих конструкцій (ферм) мінімальної маси.

Проведений аналіз можливих шляхів підвищення ефективності комбінованих сталевих кроквяних ферм. Встановлено, що другим ефективним методом є раціональний розподіл внутрішніх зусиль. Наведено основну задачу регулювання напружено-деформованого стану (НДС) в комбінованій фермі – одержання рівномірної конструкції, тобто найбільш раціональної системи. Аналіз шляхів підвищення ефективності комбінованих сталевих ферм дає змогу висунути наукову гіпотезу про раціональне проектування комбінованих ферм шляхом використання раціональних конструктивних форм і топології, а також про доцільність в них розрахункового регулювання НДС. На основі аналізу теоретичних досліджень визначено напрямки підвищення ефективності комбінованих сталевих ферм шляхом розробки раціональних конструктивних форм та регулювання НДС розрахунковим методом на стадії

проектування. За результатами виконаного аналізу сформульовані мета, задачі досліджень. Показано, що розробка методики проектування раціональних комбінованих сталевих ферм дасть змогу проектувати ефективні і конкурентоздатні кроквяні конструкції порівняно з існуючими аналогами і одержати значний економічний ефект. У заключній частині першого розділу наведено блок-схему досліджень.

У другому розділі сформульовано умови удосконалення конструктивних форм сталевих ферм: перша - пошук раціональної геометричної форми конструкції; друга - пошук раціонального розподілу матеріалу в конструкції з незмінною геометрією. Встановлено, що для розробки нових раціональних конструктивних форм сталевих ферм потрібно використати принцип заміни традиційних ферм на комбіновані. Показано умови для конструювання нової раціональної конструктивної форми комбінованої сталеві ферми (мінімальної маси) за геометричними параметрами (обрис ферми) і фізичними (розподіл матеріалу між елементами ферми).

Запропоновано критерій раціональності комбінованої конструкції - одночасне досягнення напруженнями розрахункового опору матеріалу балки жорсткості в розрахункових перетинах балки жорсткості для основного навантаження. Наведено узагальнюючі принципи (мінімізація витрат матеріалу і принцип мінімальних технологічних витрат) формоутворення нових конструктивних комбінованих систем – ферм і особливості їх використання.

Досліджено і одержано раціональні параметри комбінованих сталевих ферм прольотом 30 м: вибрано раціональну топологію - шпренгельна ферма з паралельними поясами - тип ферм Пратта з решіткою (N – truss) і обпиранням на верхній пояс; співвідношення маси балки жорсткості комбінованої ферми до загальної маси ферми рівне 50%; кут нахилу фермових стійок 78° - 82° ; ферма з кількістю панелей верхнього поясу шість, а верхній пояс якої має тільки п'ять проміжних опор; розрахункова схема - нерозрізний верхній і нижній пояси із шарнірним під'єднанням решітки; використання високоміцної сталі для розкосів. За результатами структурно-параметричного синтезу комбінованої

сталевій ферми прольотом 30 м за критерієм мінімуму маси одержана раціональна кроквяна сталева ферма, яка складається з жорсткого верхнього поясу із гнutoзварного профілю прямокутного перерізу, з'єднаного з ним ламаного нижнього поясу з ухилом верхнього та нижнього поясів 1.5%, стійок, розкосів, з'єднаних із верхнім та нижнім поясами, яка містить стійки розташовані під кутом 80° , а розкоси виконані із високоміцних арматурних стрижнів, які утворюють N-подібну решітку, яка прикріплена до верхнього та нижнього поясів шарнірно, а маса верхнього поясу становить половину загальної маси конструкції, кількість панелей рівна шести, а проміжних опор – п'яти.

У третьому розділі розглянуто розрахункові методи регулювання НДС як основу для підвищення ефективності сталевих комбінованих ферм, що забезпечує раціональний розподіл внутрішніх зусиль. Показано, що розрахунок кожного виду таких конструкцій відомими методами дає нерівномірний напружений стан по довжині основного елемента – балки жорсткості, який полягає у істотній різниці між опорними і прольотними моментами, а це робить їх не завжди раціональними і економічними. Сформульовано задачу розрахункового регулювання НДС в сталевих комбінованих фермах, суть якої полягає в тому, щоб максимально забезпечити одержання рівнонапруженого стану в розрахункових перерізах балки жорсткості. Наведено, що для підвищення ефективності роботи сталевих комбінованих ферм, мінімізації їх маси та зменшення працемісткості, окрім розрахункових методів регулювання НДС, необхідне раціональне проектування. Показано, що розрахункове регулювання НДС опорними ексцентриситетами ефективно і раціонально при їх величині рівній половині висоти балки жорсткості.

Встановлено, що при однакових навантаженнях і одному прольоті, рівному 30 м, маса ферми за ДСТУ Б В.2.6-74:2008- 2455,5 кг, маса еталонної комбінованої ферми – 2022,1 кг, а маса комбінованої ферми з розрахунковим регулюванням (регулюванням ексцентриситетами) – 1772,9 кг. Наведено, що

маса комбінованої ферми з розрахунковим регулюванням менша 27,8 % від маси ферми за ДСТУ і на 12,3 % від комбінованої ферми без регулювання НДС.

Наведено, що розрахункове регулювання НДС зміною опорних і вузлових ексцентриситетів дозволяє більшою мірою використовувати резерви конструкції, не змінюючи її надійність, відповідно до практично доцільних величин.

Встановлено, що розрахункове регулювання напружень у верхньому поясі (балці жорсткості) комбінованої сталеві ферми прольотом 30 м, змінною довжини панелей верхнього поясу, суттєво зменшило напруження у верхньому поясі з 327,5 МПа до 205,4 МПа, що складає 37,3%. При цьому прогини балки жорсткості рівні 125 мм, тобто в межах, допустимих нормами і становлять менше $1/200l$. За результатами проведеного дослідження, для зміни довжин панелей встановлено, що маса ферми за ДСТУ Б В.2.6-74:2008 складає 2455,5 кг, маса еталонної комбінованої ферми – 2022,1 кг, а маса ферми вже з розрахунковим регулюванням зміною довжин панелей верхнього поясу – 1651,9 кг. Таким чином встановлено, що матеріаломісткість цієї ферми на 18,3 % менша за еталонну та на 32,7 % менша від ферми за ДСТУ.

Встановлено, що раціональне проектування, з використанням розрахункових методів регулювання НДС, дає можливість саме на стадії проектування визначити форму ферми і розподіл внутрішніх зусиль у ній відповідно до схеми прикладання зовнішнього навантаження за мінімальних затрат матеріалу. Показано простоту і наочність запропонованого методу.

Проведено оцінку ефективності регулювання НДС розрахунковим методом, що дало змогу використати перерізи меншої площі і знизити витрату сталі від 12 % до 17% для ферм прольотом 18 м, та від 20,5% до 25% для 24 м, відповідно, від 12,5 % до 18% для прольоту 30 м.

У четвертому розділі проведено дослідження роботи зразків комбінованих сталевих ферм, аналіз НДС балки жорсткості, як основного елемента конструкції. Виконано перевірку несучої здатності за I та II групою

граничних станів в пружній стадії. Встановлено, що значення напружень у перерізах не перевищують значень розрахункового опору, прогини не виходять за межі встановлених обмежень. Проведено дослідження роботи зразків при несиметричному навантаженні. Встановлено відсутність знакозмінних зусиль в елементах ферми при несиметричному навантаженні і регулюванні зусиль. Проведено перевірку запропонованого методу регулювання НДС у балці жорсткості, порівняння із НДС еталонного зразку. Встановлено, що різниця між крайніми значеннями фібрових деформацій у розтягнутій зоні приопорних ділянок раціональної ферми з регулюванням НДС зменшилась у 6,6 разів, а у прольотній зоні – у 2 рази, порівняно із раціональною фермою.

Експериментальним випробуванням визначено величини руйнуючого навантаження, коефіцієнту запасу. Встановлено, що руйнуюче навантаження $q_p=1160$ кг/м, а коефіцієнт запасу $k_3=1,45$. Проведено аналіз та встановлено характеристику видимих руйнувань при виході конструкції з експлуатації. Встановлено, що основним видимим руйнуванням був вихід конструкції з площини, що при руйнуючому навантаженні унеможлиблює будь-яку її подальшу експлуатацію. При огляді конструкцій після повного зняття навантаження та завершення експерименту встановлено, що руйнування зварних швів, втрата місцевої стійкості елементів, змінання стінок відсутні. Встановлено, що після зняття навантаження в обох зразках залишкові напруження та деформації відсутні. Встановлено, що при симетричному навантаженні максимальне напруження у зразку комбінованої ферми із раціональними параметрами $\sigma_{max}=192$ МПа при прогині $f=1,488$ см, а для комбінованої ферми із раціональними параметрами та регулюванням НДС – $\sigma_{max}=187$ МПа при прогині $f=1,352$ см. Визначено, що збіжність експериментальних результатів несучої здатності і деформативності моделей комбінованих ферм з теоретичними складає 92-96 %.

У п'ятому розділі проведено екстраполювання результатів дослідження комбінованої сталеві ферми прольотом 30 м на прольоти 12 м, 15 м, 18 м, 24 м. Наведено схеми раціональних комбінованих кроквяних ферм прольотом 12-

30 м. Проведено порівняльний аналіз маси ферм за ДСТУ та запропонованих раціональних варіантів ферм. Аналіз показав, що маса таких ферм менше на 15-25%, порівняно із типовими. Встановлено, що із збільшенням навантаження на ферму збільшується і різниця у масі між запропонованими раціональними конструктивними вирішеннями та типовими конструкціями за ДСТУ.

Наведено рекомендації із розрахунку та проектування раціональних комбінованих кроквяних ферм.

Проведено оцінку техніко-економічної та екологічної ефективності раціональних комбінованих сталевих ферм з регулюванням НДС. Наведено чотири варіанти ферм із різними розрахунковими схемами та міцнісними характеристиками. Показано, що в раціональній конструкції ферм найбільш доцільно використовувати сталі класу S420 для забезпечення найменшої маси, а використання сталі підвищеної міцності класу С345 та звичайної сталі класу та С255 для деяких елементів решітки забезпечує найменшу вартість конструкції. Встановлено, що найменша маса зразків становить 855,9 кг, а найбільша – 1142 кг. При цьому вартість конструкції становить 85458 грн та 65616 грн у цінах 2021 року. Результати експериментальних досліджень і промислового впровадження використані в програмах навчальних дисциплін, які викладають на кафедрі будівельного виробництва Національного університету «Львівська політехніка» при підготовці студентів спеціальності 192 Будівництво та цивільна інженерія першого (бакалаврського) рівня вищої освіти «Новітні технології в будівництві» (вибірковий блок «Міське будівництво та господарство») та другого (магістерського) рівня вищої освіти (ОПП «Міське будівництво та господарство») «Інноваційні і ВІМ технології в будівництві».

Ключові слова: ферма, легка сталева конструкція, розрахункова схема, жорсткість, напружено-деформований стан, несуча здатність, теоретичний розрахунковий метод, випробування на згин, балка, графік деформацій, статичне навантаження, деформації, експеримент, ЛІРА-САПР, метод скінчених елементів.

Список праць опублікованих за темою дисертації

Статті

1. Myron Hohol, Ivan Peleshko, Alexey Petrenko, Dmytro Sydorak (2021) Analysis of calculation regulation methods in steel combined trusses. Scientific Journal "Theory and Building Practice", вісник нац. ун-ту «Львівська політехніка» (Гоголь М.В. – аналіз та інтерпретація даних, написання статті, методологія; Пелешко І.Д. – робота з даними; Петренко О.В. – редагування, рецензування, формулювання висновків; Сидорак Д.П. – аналіз розрахункових методів регулювання зусиль у сталевих конструкціях;)

2. Hohol M., Kotiv M., Peleshko I., Sydorak D. (2021) Regulation of stress-deformed state in compressed elements of steel frames. Scientific Journal "Theory and Building Practice", вісник нац. ун-ту «Львівська політехніка» JTBP. 2021; Volume 3, Number 2: 24-31 <https://doi.org/10.23939/jtbp2021.02.024> (Гоголь М.В. – аналіз та інтерпретація даних, написання статті, методологія; Котів М.В. – робота з даними; Пелешко І.Д. – формулювання висновків; Сидорак Д.П. – аналіз розрахункових методів регулювання зусиль у сталевих конструкціях;)

3. Dmytro Sydorak and Myron Hohol (2022) Improving the constructive efficiency of steel combined trusses. Scientific Journal "Theory and Building Practice", вісник нац. ун-ту «Львівська політехніка» JTBP. 2022; Volume 4, Number 1: 18-26 (Сидорак Д.П. – аналіз та інтерпретація даних, написання статті, методологія, досліджено вплив опорних та вузлових ексцентриситетів на розподіл зусиль у балці жорсткості комбінованої сталеві кроквяної ферми; Гоголь М.В. – рецензування, редагування статті, формулювання висновків;)

4. Myron Hohol and Dmytro Sydorak (2022) Structural efficiency of steel combined trusses. Scientific Journal "Theory and Building Practice", вісник нац. ун-ту «Львівська політехніка» JTBP. 2022; Volume 4, Number 2: 58-67 (Гоголь М.В. – аналіз та інтерпретація даних, написання статті, методологія, формулювання висновків; Сидорак Д.П. – виконано експериментальні дослідження зразків комбінованих сталевих ферм та оброблено результати випробувань, редагування, рецензування;)

5. Myron Hohol, Dmytro Sydorak, M. Hohol (2023) New design form of steel combined roof trusses. Scientific Journal "Theory and Building Practice", вісник нац. ун-ту «Львівська політехніка» JTBP. 2023; Volume 5, Number 1: 21-27 (Гоголь М.В. – аналіз та інтерпретація даних, написання статті, методологія; Сидорак Д.П. – проведено аналіз ефективності запропонованого методу регулювання НДС за допомогою зміни довжин панелей верхнього поясу ферми; Гоголь М.М. – рецензування та редагування статті;)

6. Myron Hohol, Pavlo Dynka, Dmytro Sydorak, Marko Hohol (2023) Efficiency of rational combined steel trusses. Scientific Journal "Theory and Building Practice", вісник нац. ун-ту «Львівська політехніка» JTBP. 2023; Volume 5, Number 2: 35-41 (Гоголь М.В. – аналіз та інтерпретація даних, написання статті, методологія; Динька П.К. – техніко-економічне порівняння варіантів сталевих ферм; Сидорак Д.П. – дослідження ефективності комбінованих ферм порівняно із типовими в залежності від прольоту та величини навантаження; Гоголь М.М. – рецензування та редагування статті;)

7. Myron Hohol, Dmytro Sydorak, Marko Hohol (2024) Synthesis of rational constructive solution of steel roof trusses. Scientific Journal "Theory and Building Practice", вісник нац. ун-ту «Львівська політехніка» JTBP. 2024; Volume 6, Number 1: 7-16 (Гоголь М.В. – аналіз та інтерпретація даних, написання статті, методологія; Сидорак Д.П. – дослідження впливу способу закріплення решітки на розподіл зусиль у балці жорсткості; Гоголь М.М. – рецензування та редагування статті;)

8. Hohol M., Gasii G., Pents V., Sydorak D. (2022) Structural—Parametric Synthesis of Steel Combined Trusses. In: Onyshchenko V., Mammadova G., Sivitska S., Gasimov A. (eds) Proceedings of the 3rd International Conference on Building Innovations. ICBI 2020. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 181. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85043-2_16 (Гоголь М.В. – аналіз та інтерпретація даних, написання статті, методологія; Гасій Г.М. – аналіз результатів попередніх досліджень; Пенц В.Ф. – формулювання висновків; Сидорак Д.П. – визначення шляхом структурно-параметричного синтезу

раціональної топології та геометричних параметрів комбінованих кроквяних ферм;)

9. Hohol M., Marushchak U., Peleshko I., Sydorak D. (2022) Rationalization of the Topology of Steel Combined Truss. In: Bieliatynskyi A., Breskich V. (eds) Safety in Aviation and Space Technologies. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85057-9_9 (Гоголь М.В. – аналіз та інтерпретація даних, написання статті, методологія; Марущак У.Д. – редагування, рецензування, формулювання висновків; Пелешко І.Д. – аналіз результатів попередніх досліджень; Сидорак Д.П. – аналіз впливу топології та геометричних параметрів на технічну ефективність комбінованих ферм;)

10. Hohol, M., Sydorak, D., Sivitska, S., Cherednyk, L. (2023). Structural Synthesis of Rational Constructive Forms of Combined Steel Trusses. In: Onyshchenko, V., Mammadova, G., Sivitska, S., Gasimov, A. (eds) Proceedings of the 4th International Conference on Building Innovations. ICBI 2022. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 299. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-17385-1_16 (Гоголь М.В. – аналіз та інтерпретація даних, написання статті, методологія; Сидорак Д.П. – визначення шляхом структурно-параметричного синтезу раціональної топології та геометричних параметрів комбінованих кроквяних ферм; Сівіцька С.П. – аналіз попередніх публікацій; Чередник Л.А. – рецензування та редагування статті;)

11. Myron Hohol, Uliana Marushchak, Tatyana Galinska, Dmytro Sydorak; Synthesis of rational topology of combined steel trusses. AIP Conf. Proc. Reliability And Durability Of Railway Transport Engineering Structure And Buildings 31 May 2023; 2684 (1): 030015. (Гоголь М.В. – аналіз та інтерпретація даних, написання статті, методологія; Марущак У.Д. – редагування, рецензування; Галінська Т.А. – формулювання висновків; І.Д. – ; Сидорак Д.П. – аналіз впливу топології та геометричних параметрів на технічну ефективність комбінованих ферм;)

12. Shimanovsky, O., Hohol, M., Melnyk, I., Sydorak, D. (2024). Trends of Development of Combined Steel Trusses of the New Generation. In: Zabulonov, Y., Peer, I., Zheleznyak, M. (eds) Liquid Radioactive Waste Treatment: Ukrainian

Context. LWRT 2022. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 469. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-55068-3_11 (Шимановський О.В. – аналіз та інтерпретація даних, написання статті, методологія; Гоголь М.В. – аналіз попередніх досліджень; Мельник І.В. – формулювання висновків; Сидорак Д.П. – виконано експериментальні дослідження зразків комбінованих сталевих ферм та оброблено результати випробувань;)

Патенти

13. Патент на корисну модель № 144193. МПК E04C 3/02 (2006.01) Малоелементна шпренгельна ферма підвищеної жорсткості / М.В. Гоголь, М.В. Котів, Я.Й. Коцій, І.Д. Пелешко, Д.П. Сидорак, М.М. Гоголь; власник НУ «Львівська політехніка». - №2020 02365; заявл. 10.04.2020; опубл. 16.09.2020. Бюл. № 17. – 4 с.

14. Патент України № 156643 МПК) МПК E04C 3/02 (2006.01) E04C 3/11 (2006.01) Раціональна кроквяна сталева ферма / Шимановський О.В., Гоголь М.В., Сидорак Д.П., Гоголь М.М.; власник НУ «Львівська політехніка». - № 2023 03101; заявл. 20.06.2023; опубл. 24.07.2024. Бюл. № 30. – 4 с.

Матеріали конференцій

15. Д.Сидорак. «Підвищення ефективності роботи комбінованих сталевих ферм при несиметричному навантаженні». Фізичні процеси в енергетиці, екології та будівництві : тези доп. III Всеукр. наук.-практ. конф. здобув. вищ. осв. та молод. вч. — Одеса: ОДАБА, 2020.

16. Сидорак Д. П. Зниження емісії діоксиду вуглецю при виготовленні сталевих конструкцій // Сталій розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування : 6-й Міжнародний молодіжний конгрес, Львів, 09–10 лютого 2021 р. : збірник матеріалів. – 2021

17. Д.Сидорак. «Оптимізація параметрів комбінованих сталевих ферм». Фізичні процеси в енергетиці, екології та будівництві : тези доп. IV Всеукр. наук.-практ. конф. здобув. вищ. осв. та молод. вч. — Одеса: ОДАБА, 2021.

18. М.В. Гоголь, У.Д. Марущак, Т.А. Галінська, Д.П. Сидорак (2021) «Синтез раціональної топології комбінованих сталевих ферм» // 9-а Міжнародна

науково-технічна конференція «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті», Харків, 17-19 листопада 2021 р.: Тези доповідей. - Харків: УкрДУЗТ, 2021. - с. 105-106

19. Шимановський Олександр, Гоголь Мирон, Сидорак Дмитро (2022) Тенденції розвитку комбінованих сталевих ферм нової генерації. Комплексні композитні конструкції будівель та споруд в умовах воєнного стану (CSCS-2022) // Зб. наук. пр. за матеріалами XIV Міжнародної науково-технічної конференції – Полтава: НУПП імені Юрія Кондратюка, 2022, 129-131.

20. Гоголь М., Мельник І., Галінська Т., Сидорак Д. (2022) Параметрична оптимізація комбінованих сталевих ферм. «ENVIRONMENT RECOVERY AND RECONSTRUCTION: WAR CONTEXT 2022»: Збірник матеріалів Міжнародної науково-практичної конференції «ENVIRONMENT RECOVERY AND RECONSTRUCTION: WAR CONTEXT 2022», (17–18 листопада 2022 року, Полтава). Полтава : НУПП, 2022, 36-37

Annotation

Sydorak D.P. Rational Steel Combined Roof Trusses – A qualification research paper presented as a manuscript.

A dissertation submitted for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 192 "Civil Engineering and Construction" (19 – Architecture and Construction). – Lviv Polytechnic National University, Lviv, 2024.

The dissertation is devoted to the search for rational structural forms and the improvement of the efficiency of combined steel roof trusses.

In the first section, a literature review was conducted, focusing on modern trends in the use of steel structures in building covers. It was shown that the main directions for the development and improvement of steel roof trusses are mass minimization and labor intensity reduction. It was found that the development of new, efficient structural forms of roof trusses allows revealing additional reserves of load-bearing capacity and reducing the metal content of structures. The possibility of fundamentally changing the structural form of steel roof trusses by creating combined steel structures (trusses) with minimal mass was demonstrated.

An analysis of possible ways to increase the efficiency of combined steel roof trusses was carried out. It was established that the second effective method is the rational distribution of internal forces. The main task of regulating the stress-strain state (SSS) in the combined truss is to achieve a uniform-strength structure, i.e., the most rational system. The analysis of ways to increase the efficiency of combined steel trusses allows us to propose a scientific hypothesis about the rational design of combined trusses through the use of rational structural forms and topology, as well as the feasibility of calculation-based SSS regulation. Based on the analysis of theoretical research, directions for improving the efficiency of combined steel trusses were identified through the development of rational structural forms and the regulation of SSS by calculation at the design stage. Based on the results of the analysis, the research objectives were formulated. It was shown that the development of a methodology for designing rational combined steel trusses will allow designing efficient and competitive roof structures compared to existing counterparts, and

achieving significant economic effects. A research block diagram is presented at the end of the first section.

In the second section, the conditions for improving the structural forms of steel trusses are formulated: the first is the search for a rational geometric shape of the structure; the second is the search for a rational material distribution in the structure with unchanged geometry. It was established that to develop new rational structural forms of steel trusses, the principle of replacing traditional trusses with combined ones should be used. The conditions for designing a new rational structural form of a combined steel truss (with minimal mass) based on geometric parameters (outline of the truss) and physical ones (material distribution between truss elements) were demonstrated.

A criterion for the rationality of the combined structure was proposed: simultaneously achieving stresses corresponding to the calculated resistance of the stiffening beam material at the calculated cross-sections of the stiffening beam under the main load. General principles for forming new structural combined systems – trusses – are presented, with features of their use highlighted (minimizing material and technological costs).

Rational parameters for combined steel trusses with a span of 30 meters were investigated and obtained. The rational topology chosen was a sprengel truss with parallel chords – a type of Pratt truss with a lattice (N-truss) and support on the upper chord. The ratio of the stiffening beam mass to the total truss mass is 50%. The angle of the truss uprights is 78° - 82° . The truss has six panels in the upper chord, and the upper chord has only five intermediate supports. The design scheme includes continuous upper and lower chords with a hinged connection to the lattice, and the use of high-strength steel for the diagonals. Based on the results of the structural-parametric synthesis of a combined steel truss with a span of 30 meters, using the criterion of minimum mass, a rational steel roof truss was obtained. It consists of a rigid upper chord made of a bent-welded rectangular profile, connected to a broken lower chord. The upper and lower chords have a slope of 1,5%, with uprights and diagonals connected to both chords. The uprights are positioned at an 80° angle, and

the diagonals are made of high-strength reinforcement bars that form an N-shaped lattice, hinged to the upper and lower chords. The upper chord's mass accounts for half of the total structure's mass, with six panels and five intermediate supports.

In the third section, calculation methods for regulating the stress-strain state (SSS) are considered as a basis for increasing the efficiency of combined steel trusses, ensuring a rational distribution of internal forces. It was shown that the calculation of each type of such structures by known methods results in a non-uniform stress state along the length of the main element, the stiffening beam. This manifests as a significant difference between the support and span moments, which makes them not always rational and economical. The task of calculating the regulation of the SSS in combined steel trusses was formulated, the essence of which is to ensure the achievement of a uniform-stress state in the calculated cross-sections of the stiffening beam.

It was shown that, in addition to calculation methods for regulating the SSS, rational design is necessary to increase the efficiency of combined steel trusses, minimize their mass, and reduce labor intensity. It was demonstrated that the regulation of the SSS by support eccentricities is effective and rational when their magnitude equals half the height of the stiffening beam.

It was established that with the same loads and a span of 30 meters, the mass of the truss according to DSTU B V.2.6-74:2008 is 2455,5 kg, the mass of the reference combined truss is 2022,1 kg, and the mass of the combined truss with regulated SSS (by eccentricities) is 1772,9 kg. It was shown that the mass of the combined truss with regulated SSS is 27,8% less than that of the DSTU truss, and 123% less than the combined truss without SSS regulation.

It was also demonstrated that the calculation-based regulation of the SSS through changes in support and node eccentricities allows better utilization of the structure's reserves without compromising its reliability within practically feasible limits.

It was established that the calculation-based regulation of stresses in the upper chord (stiffening beam) of a 30-meter-span combined steel truss by varying the

lengths of the upper chord panels significantly reduced the stresses in the upper chord from 327,5 MPa to 205,4 MPa, a reduction of 37,3%. At the same time, the deflections of the stiffening beam were 125 mm, which is within the limits allowed by regulations, being less than $1/200l$. Based on the conducted research on varying the lengths of the panels, it was determined that the mass of the truss according to DSTU B V.2.6-74:2008 is 2455,5 kg, the mass of the reference combined truss is 2022,1 kg, and the mass of the truss with regulated SSS by varying the lengths of the upper chord panels is 1651,9 kg. Thus, it was found that the material consumption of this truss is 18,3% less than the reference one and 32,7% less than the DSTU truss.

It was established that rational design using calculation-based methods of SSS regulation allows, at the design stage, to determine the shape of the truss and the distribution of internal forces in it according to the external load application scheme, with minimal material consumption. The simplicity and clarity of the proposed method were demonstrated.

The efficiency of SSS regulation using the calculation method was evaluated, which allowed for the use of smaller cross-sections and a reduction in steel consumption by 12% to 17% for trusses with an 18-meter span, from 20,5% to 25% for a 24-meter span, and from 12,5% to 18% for a 30-meter span.

In the fourth section, the performance of combined steel truss samples was studied, analyzing the SSS of the stiffening beam as the main element of the structure. A check was carried out for load-bearing capacity in the first and second groups of limit states in the elastic stage. It was established that the stress values in the sections did not exceed the calculated resistance values, and the deflections were within established limits. The performance of the samples under asymmetric loading was studied. It was found that there were no alternating forces in the truss elements under asymmetric loading and stress regulation. A verification of the proposed SSS regulation method in the stiffening beam was conducted, comparing it with the SSS of the reference sample. It was found that the difference between the extreme fiber deformations in the tensile zone of the near-support areas of the rational truss with

SSS regulation decreased 6,6 times, and in the span zone, it decreased 2 times compared to the rational truss.

Experimental tests determined the values of the destructive load and the safety factor. It was established that the destructive load was $q_r = 1160$ kg/m, and the safety factor $k_3 = 1,45$. An analysis was conducted, and the characteristics of visible failures when the structure was taken out of service were determined. It was found that the main visible failure was the structure buckling out of the plane, which, at the destructive load, made further operation impossible. Upon inspection of the structures after complete unloading and the end of the experiment, it was established that there were no failures in the welded seams, local stability loss in elements, or buckling of walls. It was determined that after unloading, there were no residual stresses or deformations in either sample. It was established that under symmetrical loading, the maximum stress in the sample of the combined truss with rational parameters was $\sigma_{\max} = 192$ MPa with a deflection of $f = 1,488$ cm, while for the combined truss with rational parameters and SSS regulation, the maximum stress was $\sigma_{\max} = 187$ MPa with a deflection of $f = 1,352$ cm. It was determined that the convergence of the experimental results for load-bearing capacity and deformability of the combined truss models with theoretical results was 92-96%.

In the fifth section, the research results of the combined steel truss with a 30-meter span were extrapolated to spans of 12, 15, 18, and 24 meters. Schemes of rational combined roof trusses with spans ranging from 12 to 30 meters were presented. A comparative analysis of the truss mass according to DSTU and the proposed rational truss variants was carried out. The analysis showed that the mass of these trusses is 15-25% lower compared to typical designs. It was found that with increasing load on the truss, the difference in mass between the proposed rational structural solutions and the typical designs according to DSTU also increases.

Recommendations for the calculation and design of rational combined roof trusses were provided.

The technical, economic, and environmental efficiency of rational combined steel trusses with SSS regulation was evaluated. Four truss variants with different design schemes and strength characteristics were presented. It was shown that for rational truss structures, it is most advisable to use S420-grade steel to ensure minimal mass, while using higher-strength steel of class C345 and regular steel of class C255 for some lattice elements ensures the lowest construction cost. It was established that the minimum mass of the samples is 855,9 kg, and the maximum is 1114,2 kg. The corresponding construction costs amount to 85458 UAH and 65616 UAH in 2021 prices. The results of experimental research and industrial implementation have been used in the curricula of courses taught at the Department of Construction Production of Lviv Polytechnic National University in preparing students in specialty 192 "Civil Engineering" at the first (bachelor's) level of higher education in the elective block "Urban Construction and Economy" and at the second (master's) level in the program "Innovative and BIM Technologies in Construction."

Keywords: truss, lightweight steel structure, design scheme, stiffness, stress-strain state, load-bearing capacity, theoretical calculation method, bending test, beam, deformation chart, static load, deformations, experiment, LIRA-SAPR, finite element method.

Articles

1. Hohol, Myron, Peleshko, Ivan, Petrenko, Alexey, Sydorak, Dmytro (2021). "Analysis of Calculation Regulation Methods in Steel Combined Trusses." Scientific Journal "Theory and Building Practice," Bulletin of the National University "Lviv Polytechnic" (Hohol M.V. – data analysis and interpretation, article writing, methodology; Peleshko I.D. – data work; Petrenko O.V. – editing, reviewing, conclusion formulation; Sydorak D.P. – analysis of calculation regulation methods in steel structures).
2. Hohol, M., Kotiv, M., Peleshko, I., Sydorak, D. (2021). "Regulation of Stress-Deformed State in Compressed Elements of Steel Frames." Scientific Journal "Theory and Building Practice," Bulletin of the National University "Lviv Polytechnic" JTBP. 2021; Volume 3, Number 2: 24-31. <https://doi.org/10.23939/jtbp2021.02.024> (Hohol M.V. – data analysis and interpretation, article writing, methodology; Kotiv M.V. – data work; Peleshko I.D. – conclusion formulation; Sydorak D.P. – analysis of calculation regulation methods in steel structures).
3. Sydorak, Dmytro, and Hohol, Myron (2022). "Improving the Constructive Efficiency of Steel Combined Trusses." Scientific Journal "Theory and Building Practice," Bulletin of the National University "Lviv Polytechnic" JTBP. 2022; Volume 4, Number 1: 18-26 (Sydorak D.P. – data analysis and interpretation, article writing, methodology, investigated the impact of support and joint eccentricities on the stress distribution in a combined steel truss beam; Hohol M.V. – reviewing, article editing, conclusion formulation).
4. Hohol, Myron, and Sydorak, Dmytro (2022). "Structural Efficiency of Steel Combined Trusses." Scientific Journal "Theory and Building Practice," Bulletin of the National University "Lviv Polytechnic" JTBP. 2022; Volume 4, Number 2: 58-67 (Hohol M.V. – data analysis and interpretation, article writing, methodology, conclusion formulation; Sydorak D.P. – conducted experimental research on combined steel truss samples and processed test results, editing, reviewing).

5. Hohol, Myron, Sydorak, Dmytro, Hohol, M. (2023). "New Design Form of Steel Combined Roof Trusses." Scientific Journal "Theory and Building Practice," Bulletin of the National University "Lviv Polytechnic" JTBP. 2023; Volume 5, Number 1: 21-27 (Hohol M.V. – data analysis and interpretation, article writing, methodology; Sydorak D.P. – analysis of the efficiency of the proposed stress regulation method through changes in the length of the truss top panels; Hohol M.M. – reviewing and editing the article).

6. Hohol, Myron, Dynka, Pavlo, Sydorak, Dmytro, Hohol, Marko (2023). "Efficiency of Rational Combined Steel Trusses." Scientific Journal "Theory and Building Practice," Bulletin of the National University "Lviv Polytechnic" JTBP. 2023; Volume 5, Number 2: 35-41 (Hohol M.V. – data analysis and interpretation, article writing, methodology; Dynka P.K. – technical-economic comparison of steel truss options; Sydorak D.P. – research on the efficiency of combined trusses compared to typical ones depending on span and load; Hohol M.M. – reviewing and editing the article).

7. Hohol, Myron, Sydorak, Dmytro, Hohol, Marko (2024). "Synthesis of Rational Constructive Solution of Steel Roof Trusses." Scientific Journal "Theory and Building Practice," Bulletin of the National University "Lviv Polytechnic" JTBP. 2024; Volume 6, Number 1: 7-16 (Hohol M.V. – data analysis and interpretation, article writing, methodology; Sydorak D.P. – research on the impact of the lattice anchoring method on the stress distribution in the stiffness beam; Hohol M.M. – reviewing and editing the article).

8. Hohol, M., Gasii, G., Pents, V., Sydorak, D. (2022). "Structural-Parametric Synthesis of Steel Combined Trusses." In: Onyshchenko, V., Mammadova, G., Sivitska, S., Gasimov, A. (eds) Proceedings of the 3rd International Conference on Building Innovations. ICBI 2020. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 181. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85043-2_16 (Hohol M.V. – data analysis and interpretation, article writing, methodology; Gasii G.M. – analysis of previous research results; Pents V.F. – conclusion formulation; Sydorak D.P. –

determination of rational topology and geometric parameters of combined trusses through structural-parametric synthesis).

9. Hohol, M., Marushchak, U., Peleshko, I., Sydorak, D. (2022). "Rationalization of the Topology of Steel Combined Truss." In: Bieliatynskyi, A., Breskich, V. (eds) Safety in Aviation and Space Technologies. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85057-9_9 (Hohol M.V. – data analysis and interpretation, article writing, methodology; Marushchak U.D. – editing, reviewing, conclusion formulation; Peleshko I.D. – analysis of previous research results; Sydorak D.P. – analysis of the impact of topology and geometric parameters on the technical efficiency of combined trusses).

10. Hohol, M., Sydorak, D., Sivitska, S., Cherednyk, L. (2023). "Structural Synthesis of Rational Constructive Forms of Combined Steel Trusses." In: Onyshchenko, V., Mammadova, G., Sivitska, S., Gasimov, A. (eds) Proceedings of the 4th International Conference on Building Innovations. ICBI 2022. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 299. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-17385-1_16 (Hohol M.V. – data analysis and interpretation, article writing, methodology; Sydorak D.P. – determination of rational topology and geometric parameters of combined trusses through structural-parametric synthesis; Sivitska S.P. – analysis of previous publications; Cherednyk L.A. – reviewing and editing the article).

11. Hohol, Myron, Marushchak, Uliana, Galinska, Tatyana, Sydorak, Dmytro. "Synthesis of Rational Topology of Combined Steel Trusses." AIP Conf. Proc. Reliability And Durability Of Railway Transport Engineering Structure And Buildings 31 May 2023; 2684 (1): 030015. (Hohol M.V. – data analysis and interpretation, article writing, methodology; Marushchak U.D. – editing, reviewing; Galinska T.A. – conclusion formulation; Sydorak D.P. – analysis of the impact of topology and geometric parameters on the technical efficiency of combined trusses).

12. Shimanovsky, O., Hohol, M., Melnyk, I., Sydorak, D. (2024). "Trends of Development of Combined Steel Trusses of the New Generation." In: Zabulonov, Y., Peer, I., Zheleznyak, M. (eds) Liquid Radioactive Waste Treatment: Ukrainian

Context. LWRT 2022. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 469. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-55068-3_11 (Shimanovsky O.V. – data analysis and interpretation, article writing, methodology; Hohol M.V. – analysis of previous research; Melnyk I.V. – conclusion formulation; Sydorak D.P. – conducted experimental research on combined steel truss samples and processed test results).

Patents

13. Patent for Utility Model No. 144193. IPC E04C 3/02 (2006.01). "Small-Element Springer Truss with Increased Rigidity" / M.V. Hohol, M.V. Kotiv, Y.I. Kozii, I.D. Peleshko, D.P. Sydorak, M.M. Hohol; Owner: Lviv Polytechnic National University. - No. 2020 02365; filed 10.04.2020; published 16.09.2020. Bulletin No. 17. – 4 p.

14. Patent of Ukraine No. 156643 IPC E04C 3/02 (2006.01) E04C 3/11 (2006.01). "Rational Roof Steel Truss" / Shimanovsky O.V., Hohol M.V., Sydorak D.P., Hohol M.M.; Owner: Lviv Polytechnic National University. - No. 2023 03101; filed 20.06.2023; published 24.07.2024. Bulletin No. 30. – 4 p.

Conference Materials

15. Sydorak, D. "Increasing the Efficiency of Combined Steel Trusses Under Asymmetric Loading." Physical Processes in Energy, Ecology, and Construction: Abstracts of the 3rd All-Ukrainian Scientific-Practical Conference for Higher Education Students and Young Scientists – Odessa: ODABA, 2020.

16. Sydorak, D.P. "Reducing Carbon Dioxide Emissions in Steel Structure Production." // Sustainable Development: Environmental Protection. Energy Efficiency. Balanced Natural Resource Use: 6th International Youth Congress, Lviv, 09–10 February 2021: Collection of Materials. – 2021.

17. Sydorak, D. "Optimization of Parameters for Combined Steel Trusses." Physical Processes in Energy, Ecology, and Construction: Abstracts of the 4th All-Ukrainian Scientific-Practical Conference for Higher Education Students and Young Scientists – Odessa: ODABA, 2021.

18. Hohol, M.V., Marushchak, U.D., Galinska, T.A., Sydorak, D.P. (2021). "Synthesis of Rational Topology for Combined Steel Trusses." // 9th International

Scientific and Technical Conference "Problems of Reliability and Durability of Engineering Structures and Buildings in Railway Transport," Kharkiv, 17-19 November 2021: Abstracts. - Kharkiv: UkrDUZT, 2021. - pp. 105-106.

19. Shimanovsky, Olexander, Hohol, Myron, Sydorak, Dmytro (2022). "Trends in the Development of New Generation Combined Steel Trusses." Comprehensive Composite Structures for Buildings and Structures Under Martial Law (CSCS-2022) // Collection of Scientific Papers from the XIV International Scientific and Technical Conference – Poltava: NUPP named after Yuriy Kondratyuk, 2022, pp. 129-131.

20. Hohol, M., Melnyk, I., Galinska, T., Sydorak, D. (2022). "Parametric Optimization of Combined Steel Trusses." "ENVIRONMENT RECOVERY AND RECONSTRUCTION: WAR CONTEXT 2022": Collection of Materials from the International Scientific-Practical Conference "ENVIRONMENT RECOVERY AND RECONSTRUCTION: WAR CONTEXT 2022" (17–18 November 2022, Poltava). Poltava: NUPP, 2022, pp. 36-37.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	28
РОЗДІЛ 1. СТАН ТА АНАЛІЗ ОСНОВНИХ ШЛЯХІВ ВДОСКОНАЛЕННЯ І ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СТАЛЕВИХ ФЕРМ. ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	35
1.1. Сучасні тенденції в застосуванні сталевих конструкцій у покриттях будівель.....	35
1.2. Основні напрямки розвитку і вдосконалення сталевих крокв'яних ферм.....	44
1.3. Шляхи підвищення ефективності та конкурентоспроможності сталевих кроквяних ферм.....	50
1.4. Теоретичні передумови досліджень та наукова гіпотеза. Мета і задачі дослідження.....	54
Висновки до розділу.....	59
РОЗДІЛ 2. СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧНИЙ СИНТЕЗ КОМБІНОВАНОЇ СТАЛЕВОЇ ФЕРМИ ПРОЛЬОТОМ 30 М.....	61
2.1. Синтез комбінованих сталевих ферм на рівні топології. Нові ідеї конструктивного вирішення сталевих ферм.....	61
2.2. Раціональна комбінована ферма з мінімальною масою.....	63
2.3. Варіаційний принцип структурного синтезу. Варіювання кількості вузлів і стержнів в комбінованій фермі – метод визначення раціональної топології.....	66
2.4. Принцип рівнонапруженості в елементах і розрахункових перерізах ферми по всьому об'єму.....	68
2.5. Узагальнюючі принципи формоутворення нових конструктивних комбінованих систем.....	71
2.6. Дослідження раціональних параметрів комбінованих сталевих ферм прольотом 30 м.....	75
2.6.1. Вибір раціональної топології комбінованої ферми.....	75

	25
2.6.2. Аналіз раціонального типу решітки в комбінованій фермі.....	78
2.6.3. Пошук раціонального співвідношення маси балки жорсткості до маси всієї ферми.....	82
2.6.4. Визначення раціональних кутів нахилу стиснутих стержнів решітки сталевій комбінованій фермі.....	86
2.6.5. Пошук раціональної кількості панелей верхнього поясу 30 м комбінованій фермі.....	91
2.6.6. Визначення раціональної кількості опор балки жорсткості комбінованій фермі.....	95
2.6.7. Визначення раціональної розрахункової схеми комбінованій фермі.....	97
2.6.8. Оцінка ефективності використання підвищених марок 'сталі в розтягнутих елементах решітки комбінованих ферм.....	101
2.7. Сталева комбінована ферма з раціональними параметрами прольотом 30 м.....	102
Висновки до розділу.....	105
РОЗДІЛ 3. ВИБІР РАЦІОНАЛЬНИХ МЕТОДІВ РОЗРАХУНКОВОГО РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ (НДС) В КОМБІНОВАНИЙ СТАЛЕВІЙ ФЕРМІ.....	107
3.1. Розрахункові методи регулювання НДС як основа для підвищення ефективності комбінованих ферм.....	107
3.2. Регулювання НДС в 30 м сталевій комбінованій фермі зміною опорних ексцентриситетів.....	113
3.3. Регулювання НДС в 30 м сталевій комбінованій фермі зміною вузлових ексцентриситетів.....	120
3.4. Дослідження раціональних величин опорних і вузлових ексцентриситетів при регулюванні НДС в 30 м сталевій комбінованій фермі.....	124
3.5. Регулювання НДС в 30 м сталевій комбінованій фермі зміною довжин панелей верхнього поясу.....	129

3.6. Дослідження ефективності використання сталевих комбінованих ферм в залежності від інтенсивності навантаження і величини прольоту.....	135
Висновки до розділу.....	139
РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ КОМБІНОВАНИХ СТАЛЕВИХ ФЕРМ..	
4.1. Мета і задачі експериментальних досліджень. Планування і підготовка експериментів.....	142
4.2. Методика випробувань. Використовувані прилади і апаратура. Спеціальне обладнання.....	143
4.3. Експериментальне дослідження роботи раціональної комбінованої сталеві ферми при симетричному навантаженні.....	150
4.4. Експериментальне дослідження комбінованої сталеві ферми з раціональними параметрами і розрахунковим регулюванням НДС при симетричному навантаженні.....	156
4.4.1. Розрахункове регулювання НДС за допомогою опорного ексцентриситету при симетричному навантаженні.....	156
4.4.2. Розрахункове регулювання НДС за допомогою опорного та вузлового ексцентриситету при симетричному навантаженні.....	158
4.4.3. Загальний аналіз роботи комбінованої сталеві ферми із раціональними параметрами та регулюванням НДС.....	162
4.5. Експериментальне дослідження роботи раціональної комбінованої сталеві ферми при несиметричному навантаженні.....	168
4.6. Експериментальне дослідження комбінованої сталеві ферми з раціональними параметрами і розрахунковим регулюванням НДС при несиметричному навантаженні.....	172
4.6.1. Розрахункове регулювання НДС за допомогою опорного ексцентриситету при несиметричному навантаженні.....	172
4.6.2. Розрахункове регулювання НДС за допомогою опорного та вузлового ексцентриситету при несиметричному навантаженні.....	175

4.6.3. Загальний аналіз роботи комбінованої сталеві ферми із раціональними параметрами та регулюванням НДС при несиметричному навантаженні.....	177
4.7. Порівняння результатів проведених теоретичних розрахунків з експериментальними дослідженнями комбінованих сталевих ферм.....	180
Висновки до розділу.....	183
РОЗДІЛ 5. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ТА ЕКОЛОГІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ І РЕКОМЕНДАЦІЇ З РОЗРАХУНКУ, РАЦІОНАЛЬНОГО ПРОЕКТУВАННЯ ТА ВИКОРИСТАННЯ КОМБІНОВАНИХ СТАЛЕВИХ ФЕРМ.....	185
5.1. Екстраполювання результатів дослідження 30 м комбінованої сталеві ферми на прольоти 12 м, 15 м, 18 м, 24 м.....	185
5.2. Рекомендації з раціонального проектування комбінованих сталевих ферм з регулюванням НДС.....	189
5.3. Оцінка техніко-економічної та екологічної ефективності раціональних комбінованих сталевих ферм з регулюванням НДС.....	202
Висновки до розділу.....	213
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	215
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	218
ДОДАТОК А.	233
ДОДАТОК Б.	237
ДОДАТОК В.	241
ДОДАТОК Г.	247
ДОДАТОК Д.	250

ВСТУП

Актуальність теми. У світовій будівельній практиці створено багато універсальних конструкцій громадського та промислового призначення. Однією з них є сталеві фермові системи покриття, що відрізняються оригінальними архітектурними формами та прогресивними конструкторськими рішеннями. В даний час провідним напрямком ефективного металобудівництва є використання легких металевих конструкцій у будівлях промислового, цивільного і сільськогосподарського призначення. Науково-технічний прогрес у галузі будівництва тісно пов'язаний із проблемами розвитку та вдосконалення сталевих металевих конструкцій. Одним із основних завдань проектувальників при конструюванні будівель з металоконструкцій є, крім забезпечення загальної стійкості будівлі та її елементів, є зниження металомісткості, трудомісткості виготовлення і, як наслідок, вартості витрат. Ефективними та найбільш задовольняючими архітектурно-будівельним вимогам щодо міцності, стійкості та архітектурно-конструктивної виразності при проектуванні покриттів будівель стають фермові металоконструкції. Металеві ферми широко застосовуються в промислових і громадських будівлях.

У практиці проектування металоконструкцій покриттів великопрогонових будівель широке застосування знайшли ферми із замкнутих профілів (гнутозварних, трубчастих), що відображається діючих нормах. Подальше вдосконалення процесу проектування, виготовлення, комплексного постачання та монтажу легких металевих конструкцій промислових будівель потребує поєднання оптимальних показників маси з мінімальною трудомісткістю механізованого потокового виготовлення.

Традиційні ферми відрізняються значною витратою металу на фасонки та прокладки, збільшеною трудомісткістю виготовлення, незручністю фарбування стержнів під час експлуатації (захист металоконструкцій від корозії). Другим недоліком рішень розкісних решіток традиційних ферм є

значна нерівностійкість стержнів щодо їх осей. Сьогодні доведено, що найбільш економічними є ферми з найменшою власною вагою, меншою витратою металу, з максимальною уніфікацією та типізацією елементів ферми, що є основними напрямками для розробки нових та вдосконалення існуючих типів ферм, спрямованих на усунення конструктивних недоліків.

Вдосконалення конструктивних форм та використання нових методів раціонального проектування дозволить покращити розробки (проекти) неефективних сталевих ферм на легкі раціональні комбіновані сталеві ферми, що забезпечить значну економію сталі, знизить працемісткість виготовлення, монтажу, зменшить кількість викидів CO₂.

Пошук полегшеної маси ферм, як основного елементу будівельних конструкцій, що задовольняє всі вимоги будівельних норм, є особливо актуальною задачею будівельної галузі. Раціональне проектування ферм може призвести до значної економії коштів при забезпеченні їх надійності експлуатації.

Найбільш ефективним шляхом вирішення такої інженерної задачі є раціональне проектування. Раціональною вважається конструкція, яка має мінімальну масу, технологічність і мінімальну трудомісткість її виготовлення. Створення раціональної конструктивної форми комбінованої сталевої ферми є складною проблемою комбінаторної оптимізації і параметричного проектування. Параметричні методи проектування значно розширили і збільшили геометричну різноманітність і різновидності конструктивних форм у процесі раціонального проектування. Створення технологічної та ефективної топології є важливим кроком у проектуванні ферми. Кращим процесом проектування є одночасне виконання топології, форми та оптимізації розмірів, що може бути в майбутньому застосовано до великомасштабної проблеми проектування ферм. Такий метод проектування є ефективним та результативним, так як дає кращі результати, ніж інтуїтивно зрозумілі остаточні макети. Створення раціональних конструктивних рішень сталевих

ферм, спрямованих на зниження трудомісткості виготовлення, витрати сталі та вартості виготовлення, стає особливо актуальним.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі будівельного виробництва національного університету «Львівська політехніка» згідно з тематикою «Технологія будівництва, дослідження прогресивних конструкцій, матеріалів та методів зведення будівель та споруд».

Мета і завдання досліджень. Метою дисертаційної роботи є розробка і дослідження раціональних комбінованих сталевих конструкцій ферм покриттів зі зменшеними витратами сталі та працездатності виготовлення.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- провести пошук раціональної геометричної схеми комбінованої ферми з мінімальною кількістю елементів;
- виконати структурно-параметричний синтез раціональної топології комбінованої сталевий ферми при прольоті 30 м. Встановити раціональні геометричні параметри розрахункової схеми з врахуванням її конструктивного рішення;
- розробити нову ефективну конструктивну форму сталевий кроквяної ферми мінімальної металоємності з мінімальною кількістю елементів;
- провести дослідження і визначити раціональні методи розрахункового регулювання НДС в комбінованій сталевий фермі, виконати числові дослідження запропонованої ферми при прольоті 30 м;
- виявити дійсний напружено-деформований стан раціональних комбінованих сталевих ферм з розрахунковим регулюванням напружень на основі експериментальних випробувань модельних зразків; провести порівняльний аналіз результатів експериментальних випробувань і теоретичних досліджень комбінованих сталевих ферм;
- встановити область раціонального використання комбінованих сталевих ферм і визначити їх техніко-економічну та екологічну ефективність порівняно з традиційними кроквяними фермами;

- розробити рекомендації для розрахунку та проектування раціональних комбінованих сталевих ферм.

Об'єктом досліджень є раціональні комбіновані сталеві кроквяні ферми, які працюють на статичні навантаження.

Предметом досліджень є підвищення ефективності комбінованих сталевих кроквяних ферм шляхом розробки нових раціональних конструктивних форм з розрахунковим регулюванням їх НДС.

Методи досліджень. Теоретичні розрахунки та дослідження виконувались за допомогою програмних комплексів, головним чином ПК «Ліра-САПР» методом скінчених елементів. Практичні випробування зразків комбінованих сталевих ферм виконувались загальноприйнятими методами випробування сталевих конструкцій. Визначення та аналіз напружено-деформованого стану виконувалось методами електротензометрії. Методика дослідження базується на порівняльному аналізі техніко-економічних показників за матеріаломісткістю, трудомісткістю та вартістю традиційних - типових та полегшених комбінованих сталевих ферм і методах вибору раціональних конструктивних форм.

Наукова новизна одержаних результатів:

- удосконалено і розроблено нові конструктивні рішення комбінованих сталевих кроквяних ферм на основі розрахунку, пошуку ефективних раціональних значень геометричних параметрів;
- визначено раціональну топологію комбінованих сталевих ферм та жорсткісні характеристики балки жорсткості;
- розроблено новий метод розрахункового регулювання НДС в раціональних комбінованих сталевих фермах;
- на базі сформульованих наукових задач розроблено методику проектування раціональних комбінованих сталевих ферм (по результатам теоретичних і експериментальних досліджень) та визначені принципи їх використання замість типових конструкцій.

– сформовано новий підклас раціональних комбінованих сталевих ферм.

Практичне значення одержаних результатів:

– автором запропонована і розроблена раціональна геометрична схема малоелементної сталеві комбінованої ферми;

– розроблена нова (новий тип) раціональна конструктивна форма кроквяної сталеві шпренгельної комбінованої ферми прольотом 30 м, яка забезпечує зниження маси порівняно з типовою на 12-25%, працємісткості на її виготовлення на 45% при кількості елементів 16 і вузлів 12 порівняно з типовою - 39 елементів та 21 вузол;

– результати теоретичних і експериментальних досліджень роботи сталевих комбінованих ферм прольотом 30 м екстрапольовано на прольоти 12 м, 15 м, 18 м, 24 м під різні величини погонного навантаження, на основі чого розроблено новий підклас таких ферм з раціональними конструктивними формами даних прольотів та постійною висотою. Виконане чисельне дослідження сталевих комбінованих ферм при даних прольотах показало, що таке конструктивне рішення дозволяє зменшити затрати сталі на 15- 27 %. Це досягнуто за рахунок нової раціональної конструктивної форми, розрахункового регулювання НДС з раціональним розподілом внутрішніх зусиль;

– розроблено рекомендації для розрахунку та проектування комбінованих сталевих кроквяних ферм;

– теоретичні дослідження та результати практичних випробувань, зокрема, результати впровадженнь у виробництво використовуються при підготовці студентів в рамках навчальних дисциплін, які викладають на кафедрі БВ національного університету «Львівська політехніка» у дисципліні «Новітні технології в будівництві», що викладається для студентів першого рівня вищої освіти спеціальності 192 Будівництво та цивільна інженерія, вибіркового блоку «Міське будівництво та господарство» (розділ «Новітні технології у влаштуванні конструкцій даху»); в дисципліні «Інноваційні і ВІМ технології в

будівництві», що викладається для студентів другого рівня вищої освіти спеціальності 192 Будівництво та цивільна інженерія освітньо-професійної програми «Міське будівництво та господарство» (розділи «Технологія влаштування дахового покриття з метою використання мансардних приміщень» і «Інформаційне моделювання будинків»); в дипломному проектуванні студентів кафедри «Будівельне виробництво» першого та другого рівнів вищої освіти.

Особистий внесок здобувача полягає у формулюванні наукової гіпотези, мети досліджень, визначенні основних наукових задач, плануванні та проведенні експериментальних випробувань зразків комбінованих ферм, обробці та перевірці достовірності отриманих результатів досліджень, розробці рекомендацій з розрахунку та проектування комбінованих сталевих ферм покриття, впровадження результатів досліджень у виробництво. Усі наукові результати дослідження дисертаційної роботи отримані автором особисто. В роботах, які опубліковані у співавторстві, автору належить: [1, 2] – аналіз розрахункових методів регулювання зусиль у сталевих конструкціях; [3] – досліджено вплив опорних та вузлових ексцентриситетів на розподіл зусиль у балці жорсткості комбінованої сталеві кроквяної ферми; [4, 12] – виконано експериментальні дослідження зразків комбінованих сталевих ферм та оброблено результати випробувань; [5] – проведено аналіз ефективності запропонованого методу регулювання НДС за допомогою зміни довжин панелей верхнього поясу ферми; [6] – дослідження ефективності комбінованих ферм порівняно із типовими в залежності від прольоту та величини навантаження; [7] – дослідження впливу способу закріплення решітки на розподіл зусиль у балці жорсткості; [8, 10] – визначення шляхом структурно-параметричного синтезу раціональної топології та геометричних параметрів комбінованих кроквяних ферм; [9, 11, 17] – аналіз впливу топології та геометричних параметрів на технічну ефективність комбінованих ферм; [13, 14] – визначення технічної ефективності нових конструктивних форм сталевих кроквяних ферм; [15] – дослідження впливу топології на роботу ферм покриття

при несиметричному навантаженні; [16] – визначення рівня зниження емісії діоксиду вуглецю при виготовленні сучасних конструкцій покриття; [18] – визначення ефективності статично невизначених систем над статично визначеними; [19] – проведено аналіз шляхів підвищення ефективності комбінованих кроквяних ферм; [20] – дослідження раціональних параметрів комбінованих кроквяних ферм.

Апробація результатів дисертації. Основні результати і положення дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на міжнародних науково-практичних конференціях і семінарах: III та IV Всеукраїнська науково-практична конференція здобувачів вищої освіти та молодих вчених «Фізичні процеси в енергетиці, екології та будівництві» (Одеса, 2020, 2021), 6-й Міжнародний молодіжний конгрес «Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування» (Львів, 2021), 9-а Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті» (Харків, 2021), XIV Міжнародна науково-технічна конференція «Комплексні композитні конструкції будівель та споруд в умовах воєнного стану (CSCS-2022)» (Полтава, 2022), Міжнародна науково-практична конференція «ENVIRONMENT RECOVERY AND RECONSTRUCTION: WAR CONTEXT 2022» (Полтава, 2022).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 20 наукових праць, з них 7 статей у наукових фахових виданнях України, 5 – у виданнях, що входять до міжнародної наукометричної бази даних Scopus, 6 публікацій у матеріалах міжнародних конференцій та 2 патенти на корисну модель.

Структура та обсяг дисертації. Основна частина дисертаційної роботи викладена на 202 сторінках друкованого тексту та складається із вступу, п'яти розділів, висновків. Повний обсяг дисертації становить 261 сторінку та включає 37 таблиць, 148 рисунків, список використаних джерел із 141 найменування на 15 сторінках і п'ять додатків на 29 сторінках.

ЛЕГКІ КОНСТРУКЦІЇ – ВИМОГА НАШОГО ЧАСУ

(Служіння інтересам майбутніх поколінь)

W. Sobek

РОЗДІЛ 1.

СТАН ТА АНАЛІЗ ОСНОВНИХ ШЛЯХІВ ВДОСКОНАЛЕННЯ І ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СТАЛЕВИХ ФЕРМ. ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1. Сучасні тенденції в застосуванні сталевих конструкцій у покриттях будівель

Загальна тенденція прогресу сучасного будівництва виражається в створенні і використанні легких металевих конструкцій. Металеві конструкції в будівництві є одними з найпоширеніших та найефективніших способів створення різних типів будівель та споруд. Вони мають широке застосування у сучасних архітектурних рішеннях в різноманітних конструктивних формах. До них відносяться елементи каркасів такі як балки, колони і інші.

Чільне місце серед легких металевих конструкцій займають сталеві ферми і дуже часто будівельники віддають їм перевагу, як найбільш зручним [7, 8, 38, 70]. Ці конструкції відрізняються низькою масою, у порівнянні з залізобетонними і здатні витримувати високі навантаження.

Навантаження на ферми прикладається здебільшого у вузлах, тому в окремих стержнях виникають тільки поздовжні зусилля стиску або розтягу при роботі ферми в цілому на згин. Завдяки цьому метал у фермах використовується раціональніше, ніж у балках, тобто вони легші за масою, більш економічні, проте і більш трудомісткі у виготовленні [30, 34, 42]. Сталеві ферми застосовують у покриттях промислових і житлових будівель, ангарів, вокзалів, спортивних споруд, ринків, радіо та телевізійних вежах, щоглах різного

призначення, опорах ліній електропередач та інших конструкціях. За статичними ознаками розрізняють ферми:

- балкового типу: одно прольотні, багато прольотні й консольні;
- аркового типу;
- рамного типу;
- вантові.

Сучасні сталеві ферми широко використовують переважно для покриттів і перекриттів як у вітчизняній практиці будівництва останнього періоду (рис. 1.1).

а)

б)



Рис. 1.1. Сталеві фермові конструкції покриття: а - Львів, будівництво торгового центру “Ашан”; б - Львів, будівництво супермаркету “АТБ”

Ферми з паралельними поясами й трапецієподібні – найбільш прості за конструктивною формою і виготовленням [3. 11, 16, 17, 23, 34, 40, 52, 64, 65, 71, 86, 100, 101, 106, 156,]. Ці властивості й визначають їх широке застосування у виробничих та житлових будівлях різного призначення. Незважаючи на високі техніко-економічні показники, їх застосовують переважно при прольотах 18...42 м, оскільки вони мають невелику будівельну висоту порівняно з фермами інших обрисів [26, 40]. У фермах з паралельними поясами і трапецієподібних доцільно проектувати розкоси спадними від опори, тоді вони будуть розтягнуті, а короткі стояки ґрат — стиснутими [27, 53. 60].

Застосування легких металевих конструкцій у наш час не викликає жодних сумнівів через ті переваги, які вони надають при комплексному вирішенні всіх етапів зведення будівлі. При цьому на перший план виходять

взаємозалежність конструктивної форми та технологія її створення, підвищення ступеню уніфікації, можливість серійного виготовлення на спеціалізованих заводах металевих конструкцій. Сучасні легкі металеві конструкції пов'язують не стільки з їхньою масою, скільки з деяким інтегральним показником якості конструкції в конкретних умовах, до якого входять показники технологічності виготовлення та транспортування, простота та надійність монтажних з'єднань, можливість застосування швидкісних методів монтажу без застосування механізмів великої вантажопідйомності тощо. При такому підході сучасним вимогам найбільше відповідають тонкостінні малоелементні несучі конструкції у поєднанні із сталевими панельними огорожувальними конструкціями та синтетичними утеплювачами [52, 62].

В практиці проектування виробничих будівель все більшого поширення набувають похилі покрівлі. Вони надають можливість застосування сучасних типів покрівельних матеріалів, та, на відміну від плоских, покращують умови експлуатації рулонних покриттів, що компенсує деяке зростання експлуатаційних витрат при збільшенні будівельного об'єму. При застосуванні безпрогонних покриттів регулярна решітка наскрізних ригелів також не є безсумнівною, та постає питання зменшення кількості вузлових спряжень. Однак, такі системи покриттів є масивними, багатоелементними і мають нераціональні висоти та велику щільність, що викликає потребу в їх удосконаленні.

За кордоном фермові системи покриттів є більш різноманітними по конструктивних вирішеннях і володіють меншою кількістю недоліків, а також менше прив'язані до держаних стандартів, типу ДБН чи ДСТУ [40]. Наприклад, табл. 1.1 наведені різні типи покриттів і перекриттів, які використовують в найбільш розвинутих країнах Європи [18]. Як видно із таблиці, найчастіше використовуються комбіновані системи покриттів з балкою жорсткості, частина з них попередньо напружені. Однак, при великій ефективності, оригінальності конструктивних форм, комбіновані сталеві конструкції не знайшли масового

використання. На даний час не має єдиної методики проектування таких комбінованих конструкцій, що стримує їх подальший розвиток.



Рис. 1.2. Сталеві фермові конструкції покрить за кордоном: а - одностояковий сталевий шпренгель прольотом 12 м, Німеччина [18]; б - двостояковий сталевий

шпренгель прольотом 16 м, Чехія [107]; в - тристояковий сталевий шпренгель прольотом 21 м, Швейцарія [92]; г - комбіновані сталеві шпренгельні ферми прольотом 36 м, Австрія [110]; д - Комбінована малоелементна шпренгельна ферма з горизонтальним верхнім поясом прольотом 26,5 м, Німеччина [108]; е - комбінована малоелементна шпренгельна ферма з нахиленим ламаним верхнім поясом і опорними ексцентриситетами прольотом 33 м, Німеччина [109]; ж - комбіновані сталеві шпренгельні ферми прольотом 36 м, Австрія [18]; з - комбіновані шпренгельні ферми проліт 40 м, фірма SSAB, Швеція [102, 111]

Відомо, що в діапазоні малих навантажень маса кроквяних конструкцій визначається не тільки діючими навантаженнями, а й значною мірою характером конструктивного рішення. Проміжними між фермою й балкою є комбіновані системи, що складаються з балки, підкріпленої знизу шпренгелем або розкосами або аркою (зверху). Підкріплювальні елементи зменшують згинальний момент у балці й підвищують жорсткість системи. Комбіновані системи простіші у виготовленні, порівняно із іншими конструкціями покриття.

Серед робіт в цьому напрямку особливо необхідно виділити роботи НУ «ЛП» під керівництвом Гоголя М.В. [19, 23], Київської школи КНУБА - Трофимовича В.В., Пермякова В.О., Білика С.І., Лавриненко Л.І., Налепи О.І., Данильченка О.Ф. [7, 29, 43, 44, 49, 55, 56, 72, 87, 88,]. Найбільш відповідною до цих вимог може бути комбінована система у вигляді малоелементної шпренгельної ферми. Базовою конструктивною формою тут є двостоякова шпренгельна ферма - КНУБА, яка при певному мінімумі елементів дає змогу ефективно впливати на розподіл зусиль в її елементах шляхом незначних змін геометричних параметрів.

Раціональним з точки зору розподілу внутрішніх зусиль у фермі є розміщення стояків в межах $(1/4...1/6)$ прольоту у поєднанні з жорстким гребневим вузлом та ексцентричним приєднання нижнього поясу в опорному вузлі (рис. 1.3) [43, 44].



Рис. 1.3. Малоелементна шпренгельна ферма, Київ

Ферма є ефективною як при безфасонковому вирішенні вузлів, так і при традиційному рішенні на болтах для можливості перевезення ферми розсипом у спеціальному транспортному пакуванні. Однак, необхідно відмітити незадовільну (малоефективну) їх роботу при несиметричному навантаженні, але і при цьому відсутністю рівнонапруженого стану в розрахункових перерізах балок жорсткості.

Також нові комбіновані сталеві конструкції ферм та арок із профільних труб, які розроблені в Національному університеті «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» під керівництвом Пічугіна С.Ф. дали основу для досліджень нами раціональних комбінованих ферм з використанням ефективних прокатних профілів [57-59].

Завдяки роботам ЦНДІБК, Укрпроектстальконструкції та Інституту електрозварювання ім. Е. О. Патона конструкції із застосуванням гнутих профілів останнім часом починають досить широко використовуватися в промислових будівлях та спорудах, а також у будинках громадського та спеціального призначення. Для ферм використовуються профілі як відкритого і замкненого типів.

При необхідності одержання профілів великого перерізу тонкі стінки доцільно виконувати гофрованими. Можливість конструювання з гнутих профілів жорсткого верхнього пояса, що добре працює на місцевий згин,

забезпечує можливість конструювання малоелементних ферм з меншою кількістю елементів решітки.

Конструкції вузлів ферм у теперішній час виконуються різноманітними способами та залежать від топології ферм і поперечного перерізу елементів. До прикладу, для ферм із відкритих профілів вузли верхнього поясу можуть виконуватись шарнірно із врізкою елементів решітки всередину пояса, а вузли нижнього пояса можуть бути з'єднані за допомогою фасонки або безпосереднім стикуванням елементів решітки до самого пояса, У фермах із профілів замкнутого типу вузли виконуються стикуванням елементів або приварюванням проміжних пластин із листової сталі у місцях примикання елементів решітки до поясів ферми. Недоліком ферм із замкнутих гнутих профілів є велика кількість зварних сполучних швів, особливо для ферм, запроектованих за звичайною геометричною схемою.

У практиці будівництва останніх років з'явилися ферми з поясами з таврів та двотаврів, нові рішення попередньо напружених двоскатних балок, малоелементних ферм. Для двосхилих балочних систем величина моменту в балці від попередньої напруги регулюється зміною значень опорного ексцентриситету розташування затяжки та початкового зусилля. Рішення опорного вузла такої конструкції виходить досить складним. Конструкції шпренгельних систем за рахунок перерозподілу зусиль дозволяють зменшити величини згинальних моментів у верхньому поясі, що працює на згин та на стиск.

Останнім часом у практиці будівництва широко використовують фланцеве з'єднання відправних марок конструкції покриття. Як правило, фланцеві з'єднання виконуються на міцних болтах. Застосування такого виду сполук для шпренгельних ферм дозволяє з'єднати процес збирання конструкції зі створенням попередньої напруги практично без збільшення трудомісткості збирання.

На даний час як в Україні, так і в Європі і світі використовуються сталеві ферми класичних типологій Хоу, Пратта або Уоррена, що були розроблені в

позаминулому столітті, які практично не удосконалювались з 1844 року [99]. На це навіть не вплинув розвиток цифрових технологій і будівельної інженерії в 21 столітті.

Такі конструктивні форми цих класичних ферм є масивними, багатoelementними з великими габаритними розмірами, що викликає перевитрату енергетичних ресурсів у період їх експлуатації та нетехнологічність, адже вузлові з'єднання елементів складні у виготовленні, вимагають великої довжини зварних швів, не дають можливості використовувати сучасні профілі з високоміцних сталей. Ці фактори підвищують загальну вартість об'єктів. Все це об'єктивно вимагає докорінних змін, розробки нових підходів в розрахунку і проектуванні, тобто створенні, апробації та впровадженні нових типів раціональних конструкцій.

На даний час не існує уніфікованої системи використання певного виду решітки кроквяних ферм в конкретних випадках. Не зважаючи на наявність стандартів на сталеві конструкції покриття, нерідко використовуються різноманітні їх види, не відображені у стандарті. Кожен окремо взятий об'єкт розглядається як окреме інженерна задача. А тому вибір конструктивної форми залежить від прийнятого інженером рішення. Однак, у даному контексті розглянемо найпоширеніші з них. Ферма Пратта ("N" ферма).

Ферма Пратта використовувалась протягом останніх двох століть як ефективний метод ферми. Зазвичай використовується в будівлях з великим прольотом, проліт яких коливається від 20 до 100 м. Вертикальні елементи стиснуті, а діагональні - розтягнуті. Це спрощує та створює більш ефективну конструкцію, оскільки переріз у діагональних елементах (при розтягуванні) може бути істотно зменшений. Ферма Уоррена.

Ферма Уоррена складається з поздовжніх елементів, з'єднаних лише поперечними балками під кутом, які утворюють попеременно перевернуті простори у формі рівностороннього трикутника. Це дає чисту ферму: кожна окрема стійка, балка або зв'язка піддаються лише силам розтягування чи стиснення, на них немає сил згинання чи кручення.

Навантаження по діагоналях чергуються між стисненням і розтягненням (наближення до центру), без вертикальних елементів, тоді як елементи поблизу центру повинні підтримувати як розтяг, так і стиснення у відповідь на діючі навантаження. Ця конфігурація поєднує міцність з економією матеріалів і тому може бути відносно легкою.

Ферми Уоррена зазвичай використовуються в будівлях з великими прольотами від 20 до 100 м. Цей тип ферм також використовується для горизонтальних ферм порталних/підкранових балок.

В умовах постійного розвитку будівельної галузі перед проектувальниками досить гостро постає проблема удосконалення та пошуку нових легких конструктивних систем. Відомо, що при раціональному підборі ЛМК (легких металевих конструкцій) матеріаломісткість можна знизити до 20%, з одночасним підвищенням продуктивності праці при виготовленні та монтажі до 60% [23, 26]. Зменшення маси конструкцій призводить також до економії транспортних витрат, скорочення часу монтажу (15 -20%) та появи можливості попередньої зборки. При пошуку оптимальних легких конструкцій з відповідними показниками матеріаломісткості, трудомісткості, стійкості та індустріальності окреме місце відводиться застосуванню конструктивних систем з гнутих, тонкостінних, таврових і трубчастих профілів. Отже, на сьогодні актуальним питанням залишається пошук можливостей для збільшення ефективності легких конструкцій та розробки нових конструктивних рішень за критерієм мінімуму ваги та вартості.

Головним з напрямків по зниженню витрат сталі, трудомісткості виготовлення, а також монтажу є розробка конструктивних рішень з мінімальною кількістю несучих елементів та більш ефективним розподіленням навантажень. Окреме місце при розробці нової конструктивної форми займає укрупнення елементів. Оскільки, при укрупненні елементів та зменшенні їх кількості, існує можливість суттєвого зменшення витрат сталі (за рахунок виключення дрібних деталей, в яких звичайно не використовується весь опір матеріалу), пришвидшення виготовлення та монтажу (скорочення кількості

операцій). Разом з тим, чим більший переріз елементів, тим вони більш довговічніші та стійкіші до зовнішніх впливів, корозії, а також механічних пошкоджень. Тобто, принцип концентрації матеріалу та принцип укрупнення елементів є достатньо ефективними компоновальними принципами.

1.2. Основні напрямки розвитку і вдосконалення сталевих кроквяних ферм

Сталь була і залишається одним із головних матеріалів будівельного виробництва. В даний час однією з умов підйому будівельної індустрії є створення конкурентних конструкцій на основі використання високих технологій. Застосування полегшених покриттів стало останнім часом загальною тенденцією будівництва; можливості і перспективи, що відкриваються у зв'язку з цим, дуже великі і ще не розкриті повністю. Характерна риса сучасного етапу у проектуванні споруд - розвиток системного підходу та скорочення часу між розробкою конструктивної ідеї та її широкою практичною реалізацією [24, 72].

Подорожчання всіх видів природних ресурсів, вартості праці поряд з великим обсягом застосування сталі поставило в ряд першорядних і актуальних завдань економії металу, зниження маси конструкції, трудомісткості виготовлення і монтажу. Вирішення таких завдань має будуватися на основі використання високих технологій на всіх стадіях: проектування, виробництва, монтажу та експлуатації металевих конструкцій.

Подальше вдосконалення процесів проектування, виготовлення, комплексного постачання та монтажу легких металевих конструкцій промислових будівель потребує поєднання оптимальних показників маси з мінімальною трудомісткістю механізованого потокового виготовлення. Прагнення поєднати ці фактори робить раціональним застосування легких конструкцій, в основі яких лежать однотипні елементи, що багаторазово

повторюються, з найбільш ефективних профілів (трубчастих, тонкостінних, гнутих).

Зменшити витрату матеріалу можливо шляхом пошуку раціональної форми конструкції, та відмовившись від ідеї максимальної уніфікації елементів, а також шляхом проектування вузлів відповідно до їх реального напруженого стану [32, 33, 56, 61, 69, 80, 83, 90, 92, 95, 117, 141, 152, 153]. Практика проектування шарнірно-стрижневих металевих конструкцій показує, що структурні зміни та зміни форми можуть дати значно більший економічний ефект, ніж оптимізація параметрів у заданій формі, тобто нова ідея конструктивного рішення об'єкта може дати більший ефект, ніж оптимізація конструкції встановленої геометрії за її параметрами [101]. Сюди входить синтез несучих конструкцій на рівні топології. Разом з тим теорія синтезу ферм залишається складною проблемою. Варіаційний принцип структурного синтезу говорить що, потенційна енергія системи в положенні стійкої рівноваги досягає абсолютного мінімуму за переміщенням в функціональному просторі, розширеному за рахунок полів функцій конфігурації і (або) модулів пружності матеріалу [160, 161]. Найкраща ферма повинна найбільш повно задовольняти наперед заданим умовам: мінімальна витрату матеріалу і праці на виготовлення.

Оскільки принципів технологічних обмежень з виготовлення комбінованих металевих конструкціях не існує, то особливу важливість набуває завдання оптимального і раціонального їх розрахунку і проектування. Проблема оптимального проектування комбінованих металевих конструкцій у повному своєму обсязі надзвичайно складна і в ряді випадків не має закінченого, строгого математичного формулювання [87, 103, 117, 120, 144, 151, 159]. Крім того, існуючі на сьогоднішній день методи вирішення таких завдань не гарантують досягнення глобального екстремуму цільового функціоналу, і тому одержані рішення можна вважати оптимальними лише умовно. Слід сказати, що проблема оптимізації топології залишається невирішеною світової практики.

Оптимізація параметрів комбінованих фермових систем ведеться за двома критеріями: критерієм раціональності - рівність напружень у всіх характерних перерізах; критерієм оптимальності – мінімум вартості матеріалу конструкції [6, 15, 28, 37, 74, 78, 97]. Раціональні конструкції ферм з критерієм мінімальних витрат, що враховує складність виготовлення, уніфікацію елементів конструкції та серійність, не завжди збігаються з оптимальними конструкціями таких ферм, розроблених за критерієм мінімальної ваги [101, 103].

Таким чином, ми можемо визначити основні принципи, що лежать в основі проектування раціональних будівельних стрижневих конструкцій: економія матеріалу, скорочення часу монтажу та зменшення складності виробництва. Ці принципи суперечливі і їх успішне вирішення можливо при створенні конструкцій з мінімальними витратами, що відповідають вимогам експлуатації, надійності та довговічності [9, 68]. Тому розробка методології вибору топології сталевих, в тому числі комбінованих ферм, яка відповідала б основним принципам проектування раціональних будівельних стрижневих конструкцій, є на сьогодні актуальною проблемою.

Альтернативою оптимальному проектуванню служить раціональне проектування, яке, на відміну від оптимального, не передбачає існування якого-небудь цільового функціоналу, а виражається в додаткових евристичних вимогах до напружено-деформованого стану (НДС) конструкції (рівноміцність, рівнонапруженість, рівномоментність, максимальна жорсткість, або мінімальна маса), що гарантує покращення її якостей найбільш природним міцностним критерієм раціонального проектування [123, 135, 139]. При цьому несуча здатність конструкції використовується найбільш повно. Тому особливої актуальності набуває розробка теорії і методів розрахунку рівнонапружених - раціональних комбінованих металевих конструкцій з урахуванням реальних особливостей їх роботи. Отже, раціональна комбінована металева конструкція, це така конструкція, в якій під дією навантаження в балці жорсткості по її довжині забезпечується рівнонапружений стан у розрахункових опорних і

прольотних перерізах. Вирівнювання величин розрахункових напружень і збільшення кількості розрахункових перерізів в балці жорсткості дасть можливість зменшити поперечний переріз балки і підвищити ефективність таких конструкцій без додаткових матеріальних затрат. Таким чином розрахунковий метод регулювання НДС є найбільш раціональним [67].

Проблема розрахунку раціональних будівельних конструкцій, в тому числі комбінованих, зводиться до розрахункового регулювання їх НДС і насамперед ставиться як проблема їх раціонального проектування, нові положення якої є основою для подальшого розвитку комбінованих сталевих конструкцій [25, 29].

Під терміном "раціональне проектування" розумітимемо організацію такого процесу проектування, в якому, поряд з досягненням основної вимоги - мінімуму маси конструкції - передбачається також облік таких вимог, як технологічність, мінімум вартості, різні обмеження у ресурсах, матеріалах, термінах створення та ін.

Раціональне рішення цієї проблеми можливе лише при комплексному системному підході до проектування конструкцій. Технічна і економічна ефективність і, в кінцевому рахунку, конкурентна здатність сталевих конструкцій може бути забезпечена, з одного боку, розробкою і впровадженням прогресивних методів розрахунку найбільш близьких до дійсного НДС конструкції та нових конструктивних схем, з іншого - регулярним аналізом методів проектування.

В умовах ринкової економіки одним з головних завдань у проектуванні несучих конструкцій стає підвищення конкурентоспроможності проекту. Ця вимога може бути реалізовано за рахунок наступних заходів: підвищення якості проектних робіт, особливо на ранніх стадіях проектування; зменшення витрат на багатоваріантні опрацювання; скорочення загальних термінів вироблення проекту.

Традиційні комбіновані системи запроектовані з застосуванням відомих до цього часу підходів до проектування не давали істотного економічного

ефекту порівняно з балковими [23]. Принциповим недоліком традиційних підходів до проектування комбінованих конструкцій полягає у неврахуванні їх дійсної роботи під навантаження, суть якого полягає у тому, що їхні деформації у результаті дії зовнішнього навантаження змінюють розподіл зусиль у балці жорсткості, а це приводить до їх зміни у вузлах та прогонах останньої як нерозрізної. Ці методи не дають можливості здійснити розрахункове регулювання зусиль в системі, а під час розрахунку відсутній аналіз і вибір раціонального варіанту конструктивної форми і немає можливості впливати на перерозподіл зусиль та напружень з метою одержання раціонального результату.

Сьогодні в конструкціях виробничих будівель широко використовують кроквяні ферми з паралельними поясами з трикутною решіткою, які економічніші порівняно з трапецеїдальними фермами [21, 40, 50, 51]. Велика кількість вузлів в них і використання регулярної решітки у разі безпрогонних перекриттів не є раціональним. Відомі і інші недоліки традиційних ферм. Зусилля в поясах ферм змінюються по довжині, а тому достатньо повне використання несучої здатності матеріалу в поясах можливо тільки за зміни їх перерізу, що збільшує працемісткість виготовлення і кількість типів елементів. Зате прокатні балки мають найменшу працемісткість виготовлення, але в використанні обмежені величиною прогону.

Варто відзначити роботи В.О. Пермякова, присвячені знаходженню оптимального рішення комбінованих систем з геометрії і топології, за якого витрати мінімальні [67 - 69]. У них пропонується дію підтримувальної системи на балку жорсткості моделювати силами, а регулювання виконувати натягуванням вант. Удосконалення конструктивних форм комбінованих конструкцій, а також регулювання в них НДС розрахунковим методом дає можливість значного розширення області їх застосування за рахунок заміни ними традиційних конструкцій (балок, ферм) [23]. Це дає можливість не тільки досягти економії металу, але і знизити працемісткість виготовлення.

Легкі сталеві ферми з одиничних кутників також менш ефективні, ніж комбіновані конструкції шпренгельні балки, балко-ферми [27]. Малоелементні ферми є найдосконаліші серед відомих фермових конструкцій, оскільки вони найбільше відповідають сучасним вимогам до сталевих конструкцій. Такі вимоги передбачають не тільки можливу мінімальну масу, але і зниження працемісткості виготовлення, збирання на будівельному майданчику і монтажу. Маса металу верхнього пояса такої ферми досягає 70-75% від її загальної маси [23]. Причому маса верхнього поясу більшою мірою залежить від згинального моменту, ніж від нормальної сили. Згинальні моменти в розрахункових перерізах верхнього поясу в прогонах за їхніми абсолютними значеннями і над стійками приблизно рівні.

Такі ферми завдовжки 18 і 24 м виготовляють на заводах у вигляді напівферм (відправних марок). Основним недоліком цих ферм є відсутність у них рівнонапруженого стану в розрахункових перерізах, що є наслідком нераціонального їх проектування [43, 52, 53]. Якщо розробити метод проектування легких комбінованих сталевих конструкцій, в яких усунути згадані недоліки, то це дасть можливість значно розширити область застосування таких конструкцій з регулюванням їх НДС і забезпечити як меншу масу, так і меншу працемісткість, тобто мінімальну вартість "в ділі", а значить і більшу конкурентоспроможність.

Подальше удосконалення процесу виробництва і монтажу - створення нової галузі будівельної індустрії - спеціалізоване виробництво легких сталевих конструкцій (ЛСК) комплектної поставки. Розрахунковий метод регулювання НДС в таких легких комбінованих сталевих конструкціях підвищує їх ефективність і забезпечує рівномірність конструкції, тобто найбільш раціональної системи без додаткових технологічних затрат [23].

Проте широке їх використання затримується передусім недосконалістю нормативної бази та недостатнім досвідом економічного та надійного проектування таких конструкцій.

1.3. Шляхи підвищення ефективності та конкурентоспроможності сталевих кроквяних ферм

Будівельна галузь гостро потребує підвищення продуктивності та конкурентоспроможності, підвищення екологічності, енергоефективності і ефективності використання матеріалів (особливо сталі) на всіх етапах її виробництва і застосування у будівництві, а також сировинних ресурсів та допоміжних матеріалів/сировинний ресурс – це руда і вугілля, сталь – основний матеріал.

Сталь була і залишається одним із головних матеріалів будівельного виробництва. В даний час однією з умов підйому будівельної індустрії є створення конкурентних конструкцій на основі використання високих технологій. Застосування полегшених покриттів стало останнім часом загальною тенденцією будівництва, можливості і перспективи, що відкриваються у зв'язку з цим, дуже великі і ще не розкриті повністю [1, 6, 7, 13-15, 18, 26, 36-38, 63, 67, 70, 73, 75, 80, 127].

У загальному обсязі будівельних конструкцій, поряд з іншими, сталеві займають дуже важливе місце. Сталеві конструкції балкового типу і ферми є найбільш поширеними конструктивними елементами перекриттів і покриттів промислових будівель.

Тому, для таких конструкцій, важливим завданням є створення нових раціональних конструктивних форм систем покриттів, з меншими габаритами і матеріаломісткістю в порівнянні з існуючими аналогами.

Значного зниження вартості металевих конструкцій можна досягти в основному за рахунок зниження вартості матеріалів, тобто зменшення витрати сталі є найважливішою умовою вибору раціональної конструктивної форми [5, 8, 11, 20, 27, 40, 45, 54, 98, 124].

У свою чергу, зниження маси конструкції відбивається на зниженні трудомісткості виготовлення та монтажу і викидам CO₂. Ці фактори взаємопов'язані та ефективність їх впливу на конструктивну форму виявляється

тим більше, чим повніше при проектуванні враховано вимоги забезпечення технологічності конструкції.

Не зважаючи на розвиток цифрових технологій і будівельної інженерії в 21 столітті, сьогодні як Україні, так і в Європі і світі широко використовуються сталеві ферми класичних типологій Хоу, Пратта або Уоррена, що були розроблені в позаминулому столітті, які принципово не удосконалювались із 1844 року.

Підвищення економічної і екологічної ефективності та конкурентоспроможності сталевих кроквяних ферм пов'язане з розробкою комплексу цифрових та інших новітніх технологій моделювання, діагностики, вдосконалення конструктивних форм та нових методів раціонального проектування і розрахунку [18, 21]. Це повинно базуватись на розробці нових підходів в розрахунку і проектуванні, тобто створенні, апробації та впровадженні нових типів раціональних конструкцій. Розкриття потенціалу раціонального проектування, що криється в комбінованих системах, створює підстави для розроблення наукових основ одержання конструкцій нової генерації. Тому, суттєвого підвищення їх ефективності можна досягнути шляхом розробки принципово нової методики проектування раціональних комбінованих сталевих ферм.

Прагнення отримати економічні конструкції призвело до розробки концепції легких сталевих конструкцій, що втілена в цілий ряд нових конструктивних форм, серед яких можна виділити раціональні комбіновані сталеві конструкції для каркасів будівель промислового, цивільного і сільськогосподарського призначення [33, 36, 39, 58, 71]. Вони характеризуються малою вагою, комплектною поставкою та швидкістю монтажу, завдяки чому значно скорочуються терміни будівництва та зменшуються транспортні витрати.

Всебічний аналіз літературних і патентних матеріалів, присвячених легким комбінованим сталевим конструкціям, дає змогу зробити висновок, що такі конструкції є найперспективнішими і для підвищення їх ефективності,

індустріальності і конкурентності необхідно забезпечити відповідний, сучасний рівень їхнього проектування.

Одним із шляхів рішення цієї і поставлених вище проблем є розроблення нових конструктивних форм комбінованих систем, які б не мали недоліків при проектуванні та негативних властивостей уже розроблених конструктивних форм, маса яких би зводилась до мінімуму, разом із працемісткістю. Такі системи повинні мати якомога меншу можливу кількість елементів і бути максимально технологічними, а також на стадії проектування у повній мірі би враховувався дійсний внутрішній перерозподіл зусиль, тобто застосувати прогресивні підходи та методи проектування із забезпеченням високої технологічності таких конструкцій.

Цим критеріям найбільше відповідає більшість комбінованих конструкцій, а саме: шпренгельні і панельно-шпренгельні системи, фермові конструкції, перехресні, вантові і висячі системи, підвісні покриття, мостові і сталобетонні конструкції, комбіновані системи з використанням жорстких ниток, системи легких конструкцій сільськогосподарських будівель, розпірні системи, а також посилення конструкцій, які запроектовані з використанням розрахункового методу регулювання і основним несучим елементом яких є балка жорсткості, від металоємкості якої значною мірою залежать техніко-економічні показники усієї системи [18].

Цей метод дасть змогу під час проектування будівельних конструкцій одержати рівномірну конструкцію, тобто найбільш раціональну систему [19, 22].

Але, основним методом, на даний час, для одержання такої конструкції є метод наближень. Кількість наближень може досягати великого числа і залежить в першу чергу від досвіду і інтуїції конструктора, при яких рідко досягається мети. Тому необхідно розробити методику проектування раціональних комбінованих сталевих конструкцій. Компонувальні і конструктивні особливості таких запропонованих систем дають змогу виділити ці конструкції в окремий клас ефективних нових легких, малоелементних шпренгельних

конструкцій і раціональні області їх використання, відмінними особливостями яких є:

- Наявність балки жорсткості;
- Можливість проектування таких систем із моделюванням системи закріплення, працюючої як пружно податливі опори;
- Мала кількість елементів, що пришвидшує виготовлення та монтаж.

Удосконалюють такі ферми розрахунковим регулюванням НДС – раціональним проектуванням балки жорсткості вирівнюванням напружень у розрахункових перерізах. Враховуючи вищенаведене потрібно відшукати раціональніші способи підвищення ефективності сталевих комбінованих систем, використовуючи такі важливі особливості, як малоелементність, мінімальна кількість вузлів та маса.

Використовуючи методику проектування раціональних комбінованих сталевих конструкцій з використанням розрахункового методу регулювання НДС запропоновані нові типи таких конструкцій прогонами 6-45 м, якими можна замінити наявні [18]. Ці комбіновані конструкції мають спільну розрахункову схему балок на пружних проміжних опорах, якими регулюється податливість, що виражається мірою пружності згаданих опор, а це дає змогу розрахункового регулювання в них зусиль залежно від параметрів системи.

Крім того, зниження працемісткості при виготовленні комбінованих конструкцій сьогодні є важливим завданням через складність автоматизації виготовлення індивідуальних елементів таких конструкцій.

Останнім часом в європейських країнах – Швейцарії, Німеччині і Англії проводять нові наукові дослідження для можливості реалізації надзвичайно полегшеної конструкції з використанням адаптивних структур [129, 130], які оптимально регулюють свою геометрію до поточних і мінливих умов шляхом активного руху.

Такі адаптивні конструкції (включаючи ферми) замість збільшення жорсткості за допомогою маси матеріалу додатково використовують стратегічно розташовані активні елементи - електричні лінійні приводи, що

маніпулюють внутрішнім потоком сил і змінюють форму конструкції, так і пасивні сталеві елементи. Використання адаптивних конструкцій здійснюється за допомогою датчиків, інтелектуального керування та виконавчих механізмів. Дослідження знаходяться на початковій стадії.

Вони мають наступні недоліки: їх впровадження викликає великі технологічні складності; для таких конструкцій необхідна система контролю і керування під час експлуатації тощо; все це обмежує їх використання.

На відміну від адаптивних структур, комбіновані сталеві конструкції (включаючи ферми) відносяться до прогресивних конструктивних форм, які динамічно розвиваються в останній час як в країнах ЄС, так і в Україні. Їх проектування і реалізація не вимагає ніяких додаткових матеріальних витрат, без необхідності їх контролю під час експлуатації. Під цим розуміється вибір топології конструкцій, їх геометричних параметрів, характеру закріплень на опорах, жорсткісних характеристик стержневих елементів, тобто ці прийоми дозволяють регулювати розподіл внутрішніх зусиль і деформацій без фізичного втручання, збільшення кількості елементів тощо.

Таким чином, можна буде замінити розробки (проекти) неефективних сталевих ферм на легкі раціональні комбіновані сталеві ферми, що забезпечить значну економію сталі, знизить працемісткість виготовлення, монтажу, зменшить кількість викидів CO₂.

1.4. Теоретичні передумови досліджень та наукова гіпотеза.

Мета і задачі дослідження

Одним із масових видів сталевих будівельних конструкцій є сталеві кроквяні ферми. Розробка нових ефективних конструктивних форм була і залишається в даний час на чолі всіх відомих шляхів вирішення проблеми ресурсозбереження і дозволяє максимально розкрити додаткові резерви несучої здатності і знизити металоємність конструкцій. Створення або удосконалення конструктивних форм кроквяних конструкцій пов'язано з загальним рівнем

розвитку металобудівництва. Проте тільки цього виявилось недостатньо для суттєвого покращення загальних показників конструкції.

Разом з тим, дослідження, виконані в Національному університеті «Львівська політехніка» з участю автора, показали можливість принципової зміни конструктивної форми сталевих кроквяних ферм і поклали початок проблеми створення комбінованих сталевих конструкцій мінімальної маси [52, 53, 93, 104-106, 119-122].

В результаті аналізу можливих шляхів підвищення ефективності сталевих кроквяних ферм виявлено, що другим ефективним методом є раціональний розподіл внутрішніх зусиль. Регулювання НДС відкриває широкі можливості для удосконалення конструктивних форм. Його можна здійснити двома шляхами: силовим – попереднім напруженням [3, 9, 10, 16, 45, 65, 68], або розрахунковим – раціональною зміною геометричних параметрів конструкції [12, 15, 18, 23-25, 53, 55, 71, 77, 78, 82, 96, 97, 117, 119]. При цьому використання попереднього напруження інколи стає недоцільним не тільки внаслідок ускладнення технології виготовлення конструкції, але й за необхідність контролю під час експлуатації тощо. Все це вказує на не доцільність його застосування. Тому для збереження широких можливостей в удосконаленні конструктивних форм сталевих конструкцій потрібно знайти альтернативу попередньому напруженню. Це можна здійснити під час проектування конструкцій, що не вимагає ніяких додаткових матеріальних витрат. Під цим розуміється вибір топології конструкцій, їх геометричних параметрів, тобто ці прийоми дозволять регулювати розподіл внутрішніх зусиль і деформацій без фізичного втручання, збільшення кількості елементів тощо та не підвищувати вартість конструкцій [18].

При цьому основна задача регулювання НДС в комбінованій фермі - балці жорсткості по її довжині є отримання рівних напружень в розрахункових опорних і прольотних перерізах, одержання рівномірної конструкції, тобто найбільш раціональної системи. Тому, розрахунок таких конструкцій повинен ставитись як раціональне проектування.

Раціональною вважаємо таку конструкцію, яка має мінімальну масу, технологічність і мінімальну трудомісткість її виготовлення [21]. Отже, доведення комбінованих сталевих конструкцій до стадії легких і раціональних дозволить використати існуючу будівельну базу і забезпечить високі техніко-економічні показники [21].

Всебічний аналіз літературних і патентних матеріалів, присвячених комбінованим сталевим фермам, дає змогу зробити висновок, що такі конструкції є найперспективнішими з погляду потенціалу, що криється в таких системах, для підвищення їх ефективності, економічності та конкурентності, використання в них розрахункового регулювання напружень шляхом раціонального формування НДС в перетинах конструкції вже на стадії проектування.

Але сьогодні в Україні і в світі не проведено достатньо теоретичних і експериментальних досліджень, які б забезпечували проектування раціональних комбінованих сталевих конструкцій за сучасними вимогами. Отже, необхідне подальше вдосконалення методів розрахунку таких систем, розроблення нових конструктивних форм і методики їхнього проектування. Не має рекомендацій по визначенню раціональних параметрів комбінованих систем.

Аналіз літературних даних в області попередньо напружених сталевих конструкцій і силових способів регулювання (досягнення) в них наперед заданого НДС, дає змогу висунути **наукову гіпотезу** про раціональне проектування ферм шляхом використання раціональних конструктивних форм і топології, а також про доцільність в них розрахункового регулювання НДС.

Для регулювання НДС розрахунковим методом необхідно розробити метод, алгоритм і програму регулювання, а також загальний метод розрахунку таких систем, сформулювати критерії раціональності. За критерій раціональності конструкції приймаємо одночасне досягнення напруженнями розрахункового опору матеріалу балки жорсткості в розрахункових перетинах балки жорсткості для основного навантаження.

Розробка методики проектування раціональних комбінованих конструкцій, що вирішить проблему їх топології, за якої напружений стан балки жорсткості буде раціональним, а система підкріплення забезпечить їх ефективність порівняно з відомими і прийнята за напрям досліджень.

Метою роботи є розробка і дослідження раціональних комбінованих сталевих конструкцій ферм покриттів зі зменшеними витратами сталі та працемісткості виготовлення.

Досягнення поставленої мети здійснюється на основі вирішення таких задач по розробленій загальній структурно-логічній схемі досліджень, що представлена табл. 1.1.

1. Провести пошук раціональної геометричної схеми комбінованої ферми з мінімальною кількістю елементів.
2. Виконати структурно-параметричний синтез раціональної топології комбінованої сталеві ферми при прольоті 30 м. Встановити раціональні геометричні параметри розрахункової схеми з врахуванням її конструктивного рішення.
3. Розробити нову ефективну конструктивну форму сталеві кроквяної ферми мінімальної металоемності з мінімальною кількістю елементів.
4. Провести дослідження і визначити раціональні методи розрахункового регулювання НДС в комбінованій сталевій фермі. Виконати числові дослідження запропонованої ферми при прольоті 30 м.
5. Виявити дійсний напружено-деформований стан раціональних комбінованих сталевих ферм з розрахунковим регулюванням напружень на основі експериментальних випробувань модельних зразків.
6. Провести порівняльний аналіз результатів експериментальних випробувань і теоретичних досліджень комбінованих сталевих ферм.
7. Встановити область раціонального використання комбінованих сталевих ферм і визначити їх техніко-економічну та екологічну ефективність порівняно з традиційними кроквяними фермами.

8. Розробити рекомендації для розрахунку та проектування раціональних комбінованих сталевих ферм.

Таблиця 1.1

Блок-схема досліджень

1	2	3
Шляхи підвищення ефективності сталевих ферм	1. Аналіз основних напрямків розвитку і вдосконалення сталевих кроквяних ферм	Наукова гіпотеза
Структурно-параметричний синтез, принцип рівнонапруженості в елементах	2. Параметричні дослідження комбінованої сталеві ферми прольотом 30 м	Раціональні: співвідношення маси балки жорсткості до маси всієї ферми; кути нахилу стиснутих стержнів; кількості панелей верхнього поясу
Ітерація величин опорних і вузлових ексцентриситетів та довжин панелей верхнього поясу	3. Ітераційні розрахунки комбінованих сталевих ферм прольотом 30 м	Вибір раціонального методу розрахункового регулювання НДС в комбінованій сталевій фермі
Модельні зразки	4. Експериментальні дослідження впливу топології і регулювання НДС на моделях сталевих комбінованих ферм	Випробування моделей комбінованих ферм
Сталева комбінована ферма з раціональними параметрами. Раціональні методи розрахункового регулювання НДС в комбінованій сталевій фермі	5. Методика проектування раціональних комбінованих сталевих ферм з регулюванням НДС	Удосконалення конструктивних форм комбінованих сталевих ферм і рекомендації з їх раціонального проектування
Раціональна комбінована сталева ферма з регулюванням НДС	6. Оцінка техніко-економічної та екологічної ефективності раціональних комбінованих сталевих ферм з регулюванням НДС	Економічний ефект і зменшення CO ₂

Досягнення поставленої мети, тобто створення методики проектування раціональних комбінованих сталевих ферм, дасть змогу проектувати ефективні і конкурентоздатні кроквяні конструкції порівняно з існуючими аналогами і одержати значний економічний ефект.

Висновки до розділу

1. Проаналізовано сучасні тенденції в застосуванні сталевих конструкцій у покриттях будівель. Показано, що основними напрямками розвитку і вдосконалення сталевих кроквяних ферм є мінімізація маси та зменшення працемісткості.

2. Виявлено, що розробка нових ефективних конструктивних форм кроквяних ферм дозволяє розкрити додаткові резерви несучої здатності і знизити металоємність конструкцій, але цього виявилось недостатньо для суттєвого покращення загальних показників конструкції.

3. Показано можливість принципової зміни конструктивної форми сталевих кроквяних ферм створенням комбінованих сталевих конструкцій (ферм) мінімальної маси.

4. Проведений аналіз можливих шляхів підвищення ефективності комбінованих сталевих кроквяних ферм і виявлено, що другим ефективним методом є раціональний розподіл внутрішніх зусиль. При цьому основна задача регулювання НДС в комбінованій фермі одержання рівномірної конструкції, тобто найбільш раціональної системи.

5. Це дало змогу висунути наукову гіпотезу про раціональне проектування комбінованих ферм шляхом використання раціональних конструктивних форм і топології, а також про доцільність в них розрахункового регулювання НДС.

6. На основі аналізу теоретичних досліджень визначені напрямки підвищення ефективності комбінованих сталевих ферм шляхом розробки раціональних конструктивних форм та регулювання НДС розрахунковим

методом на стадії проектування. Критерієм раціональності ферми приймаємо одночасне досягнення напруженнями розрахункового опору матеріалу балки жорсткості в розрахункових перетинах балки жорсткості для основного навантаження.

7. За результатами виконаного аналізу сформульовані мета, задачі досліджень. Досягнення поставленої мети, тобто створення методики проектування раціональних комбінованих сталевих ферм, дасть змогу проектувати ефективні і конкурентоздатні кроквяні конструкції порівняно з існуючими аналогами і одержати значний економічний ефект.

РОЗДІЛ 2

СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧНИЙ СИНТЕЗ КОМБІНОВАНОЇ СТАЛЕВОЇ ФЕРМИ ПРОЛЬОТОМ 30 М

2.1. Синтез комбінованих сталевих ферм на рівні топології. Нові ідеї конструктивного вирішення сталевих ферм

Підвищення ефективності комбінованих ферм, вже на стадії проектування, їх техніко-економічних показників, значною мірою залежить від сучасного рівня проектування їх топології.

Нова ідея конструктивного рішення об'єкта може дати більший ефект, ніж оптимізація конструкції встановленої геометрії за її параметрами [84]. Сюди входить синтез несучих конструкцій на рівні топології. Разом з тим теорія синтезу ферм залишається складною проблемою. Найкраща ферма повинна найбільш повно задовольняти наперед заданим умовам, та мати мінімальну витрату матеріалу і праці на її виготовлення. Завдання проектувальника полягає у пошуку оптимального співвідношення надійності та економічності запропонованих рішень.

Проблему синтезу топології (формування) стрижневих систем у загальному випадку пропонується вирішувати з позицій узагальнених варіаційних принципів, сформульованих для проектних завдань [2, 5, 62]. Рациональні конструкції ферм з критерієм мінімальних витрат, що враховує складність виготовлення, уніфікацію елементів конструкції та серійність, не завжди збігаються з оптимальними конструкціями таких ферм, розроблених за критерієм мінімальної ваги [10].

Оптимізація конструкцій є бажаною метою, але вона не завжди досягається в інженерній практиці через великі додаткові зусилля, які вона вимагає, або через відсутність необхідних ресурсів для її виконання. Для інженера-конструктора важливо чи можна внести зміни, процес повторити знову і щоб кінцевий результат завжди можна покращити. З цієї причини в

будівельній інженерії прагнуть оптимізації за допомогою параметричного проектування та еволюційних обчислень. Це дозволяє проводити аналіз ферм традиційними методами, без оптимізації.

Наприклад, за допомогою візуального програмування для оптимізації розмірів, форми та топології плоских ферм класичних типологій Хоу, Пратта або Уоррена можна отримувати економічні та екологічні вигоди від економії матеріалів [98, 101].

Основною умовою проектування ефективних сталевих крокв'яних ферм є їх раціональна структура, яка включає в себе одночасно топологію; геометричну схему; міцнісні характеристики сталі; розміри поперечних перерізів.

Пошук раціональної конструктивної їх форми переважно ведеться за двома критеріями: першому, критерію раціональності - рівність напружень у всіх характерних перерізах при одночасному виконанні вимог обох граничних станів; другому - критерію оптимальності – мінімізації маси і мінімум вартості матеріалу конструкції [13, 23]. Прагнення поєднання цих факторів забезпечує раціональне застосування фермових конструкцій, в основі яких лежать однотипні багатократно повторювані елементи з найбільш ефективних профілів (трубчатих, тонкостінних, гнутих). Раціональною вважається конструкція, яка має мінімальну масу, технологічність і мінімальну трудомісткість її виготовлення.

Таким чином, ми можемо визначити основні принципи, що лежать в основі проектування раціональних будівельних стрижневих конструкцій: економія матеріалу, скорочення часу монтажу та зменшення складності виробництва. Ці принципи суперечливі і їх успішне вирішення можливо при створенні конструкцій з мінімальними витратами, що відповідають вимогам експлуатації, надійності та довговічності [22].

Тобто, удосконалення конструктивних форм сталевих ферм можна розбити на дві підзадачі - пошук раціональної геометричної форми конструкції;

пошук раціонального розподілу матеріалу в конструкції з незмінною геометрією.

Тому розробка методології вибору топології сталевих, в тому числі комбінованих ферм, яка відповідала б основним принципам проектування раціональних будівельних стрижневих конструкцій, є на сьогодні актуальною проблемою [78, 79].

Для вирішення завдань структурно параметричного синтезу пропонується застосовувати коефіцієнт використання матеріалу (КВМ), який раціонально використати при раціональному проектуванні. Значення КВМ, це відношення енергії дійсного деформування конструкції до гранично допустимої потенційної енергії деформування. Він може служити критерієм якості проектування, в тому числі оптимального, окремих елементів, вузлів і конструкцій взагалі. Для розвитку конструктивних форм сталевих ферм необхідно забезпечити сучасний рівень їхнього проектування. А для цього потрібно розробити наукову базу в цьому напрямку.

Вибір ефективної конструктивної форми сталевих ферм нерозривно пов'язаний з критеріями їх оцінювання і формуванням розрахункових моделей. Тому, для розробки нових раціональних конструктивних форм сталевих ферм потрібно використати принцип заміни традиційних ферм на комбіновані. Комбіновані сталеві конструкції відносяться до прогресивних конструктивних форм, які динамічно розвиваються в останній час як в нашій країні, так і за кордоном [18]. Комбіновані сталеві конструкції надають широкі можливості в удосконаленні конструктивних форм сталевих ферм з метою зниження їх матеріалоемності, трудомісткості і собівартості заводського виготовлення. Отже, найперспективнішими з погляду підвищення ефективності конструктивних форм є конструкції, у формоутворення яких входять елементи балок і ферм, тобто комбіновані [21].

2.2. Раціональна комбінована ферма з мінімальною масою

Сучасні тенденції розвитку будівництва гостро ставлять проблему підвищення ефективності будівельних сталевих конструкцій, зниження їх матеріаломісткості на основі максимального використання всіх резервів міцності. Затребуваність таких економічних будівельних конструкцій весь час зростає, що є особливо актуальним для України. У зв'язку з цим, розробка нових полегшених і одночасно надійних та довговічних інженерних конструкцій, в першу чергу сталевих крокв'яних ферм, є актуальною задачею. Вона пов'язана з досягненням найбільшої економії металу, зменшенням трудомісткості виготовлення та скороченням термінів монтажу.

Прагнення отримати економічні конструкції призвело до розробки концепції легких сталевих конструкцій, серед яких можна виділити раціональні комбіновані сталеві конструкції для каркасів будівель промислового, цивільного і сільськогосподарського призначення [21]. Маса споруд з легких сталевих конструкцій у п'ять разів менша ніж залізобетонних, витрати металу у тричі нижчі, продуктивність праці у 1,5-2 рази вища, а термін будівництва скорочується на 30-60% [57-59].

Основною перевагою комбінованих конструкцій є концентрація матеріалів та можливість проектування їх малоелементними. В більшості металевих комбінованих конструкцій основна (65-85%) маса матеріалу зосереджена в балці жорсткості, від умов проектування і металоємності якої – значною мірою залежать техніко-економічні показники усієї системи.

За основний критерій економічної ефективності конструкцій переважно приймають приведені затрати, де закладені витрати на вартість створення конструкції, тобто зменшення витрат є найважливішою умовою вибору раціональної конструктивної форми [18]. У свою чергу зниження маси конструкції пов'язано зі зменшенням трудомісткості виготовлення і монтажу. Ці фактори взаємопов'язані й ефективність їх впливу на конструктивну форму тим більша, чим повніше при проектуванні враховані вимоги забезпечення технологічності конструкції [18]. Отже, раціональна конструкція це така, яка

має мінімальну масу, технологічність і мінімальну трудомісткість її виготовлення. Узагальнювальним принципом формоутворення нових конструктивних систем є те, що ці системи повинні бути комбінованими і мати якомога менше елементів та вузлів їх з'єднання [23-25]. Отже, при раціональному проектуванні таких конструкцій необхідно забезпечити раціональні геометричні параметри: раціональну кількість опор балки жорсткості, а також величини кутів нахилу підкосів і відповідну висоту комбінованої конструкції.

На підвищення ефективності сталевих комбінованих ферм суттєво впливає і сама топологія ферми [17, 23, 120-122]. Наприклад, перетворивши рівномірно навантажену однопролітну балку, максимальний момент в якій рівний $M = ql^2/8$, на шести пролітну балку жорсткості комбінованої ферми з пружно-податливими опорами, які забезпечують рівність опорних і прольотних моментів, яка працює на таке ж рівномірне навантаження, одержимо момент $M = ql^2/576$. Цей момент у 72 рази менший від моменту однопролітної балки, що відповідно приводить до економії сталі, тобто підвищує ефективність комбінованих систем.

Однак, раціональне проектування забезпечує тільки одне, не обов'язково найменше значення, а завданням оптимального проектування сталевих конструкцій зазвичай є пошук таких значень обраних параметрів конструкцій, які забезпечують найменше (або найбільше) значення обраного критерію в межах допустимих проектних рішень [51, 106, 115, 131, 139].

За результатами наших структурно-топологічних досліджень [53] для комбінованих ферм - раціональна комбінована ферма з мінімальною масою це ферма, у якій:

1. За вибором раціонального типу комбінованої ферми, тип ферми – шпренгельна;
2. Конструктивна форма ферм: ферма Пратта (N – ферма);
3. Раціональне співвідношення маси балки жорсткості до маси всієї ферми – рівне 50 %;

4. Раціональний кут нахилу стиснутих стержнів решітки приблизно 80° ;
5. Кількість панелей верхнього поясу комбінованої ферми – шість;
6. Кількість опор балки жорсткості комбінованої ферми – п'ять;
7. Раціональна розрахункова схема комбінованої ферми – верхній і нижній пояси – нерозрізні, а приєднання решітки – шарнірне;
8. Для розтягнутих елементів решітки (розкосів) ферми використовується високоміцна сталь.

На основі наведених критеріїв можна одержати нову раціональну конструктивну форму комбінованої сталеві ферми (мінімальної маси) за геометричними параметрами (обрис ферми) і фізичними (розподіл матеріалу між елементами ферми).

2.3. Варіаційний принцип структурного синтезу. Варіювання кількості вузлів і стержнів в комбінованій фермі – метод визначення раціональної топології

Ферма, це геометрично незмінна система, що складається зі стержнів, шарнірно з'єднаних між собою у вузлових точках. Під топологією ферми розуміємо визначення вузлів та спосіб їх з'єднання між собою. Проектування ферми починається з вибору раціональної її системи. Раціоналізація структури ферм спостерігається на всьому шляху їх практичного застосування. Найкраща ферма має найбільш повно задовольняти заздалегідь задані умови [18]: здатна перекрити задані прольоти, сприймати задані комбінації навантажень, вимагати мінімальну витрату матеріалу та праці на її виготовлення, встановлення та на подальшу надійну експлуатацію. Для загального вирішення цих завдань потрібна завершена теорія структурного синтезу. Але теорія синтезу ферм залишалася складною проблемою. Численні рішення задач мінімізації об'єму, маси, ваги конструкції не призвели до створення теорії оптимізації [104, 106, 121, 122].

На базі принципу можливої роботи для тіла з відомими розмірами та навантаженнями сформульовані варіаційні принципи, що використовуються для аналізу напружено-деформованого стану [2]. Розширення функціонального простору за рахунок полів функцій конфігурації створює перспективу формулювання варіаційних принципів, які можна використовувати для синтезу конструкції [2, 62]. На основі цього аналіз та синтез конструкцій одержали єдину методологічну основу. Забезпечення міцності і стійкості будівельних конструкцій є одним з найголовніших завдань будівельної механіки.

Варіаційний принцип структурного синтезу говорить [2]: потенційна енергія системи в положенні стійкої рівноваги досягає абсолютного мінімуму за переміщень у функціональному просторі, розширеному за рахунок полів функцій конфігурації та (або) модулів пружності матеріалу. Із нього випливає формулювання універсального енергетичного критерію оптимальності, який забезпечує глобальний мінімум об'єму (маси) матеріалу.

Критерієм оптимальності ферми з однорідного лінійно пружного матеріалу є рівномірність віртуальної системи з внутрішніми силами N_i/φ_i , де φ_i - коефіцієнт зменшення розрахункового опору R . Для розтягнутих стрижнів він дорівнює одиниці, а для стислих приймається виходячи з обмеження гнучкості елемента поясу або решітки. Потрібні площі поперечних перерізів A_i стиснутих стрижнів повинні мати відповідні мінімальні радіуси інерції [2].

Забезпечення міцності і стійкості будівельних конструкцій є одним з найголовніших завдань будівельної механіки.

Варіаційна постановка задачі визначення мінімального обсягу матеріалу ферми може бути представлена у формі інтегральної тотожності. Використаємо функціонал Лагранжа. Для фермової конструкції із однорідного лінійного матеріалу потенціальна енергія деформацій дорівнює

$$U = 1/2 \sum \int \frac{N_i^2}{EA_i} dx = 1/2 \sum N_i l_i \frac{R}{E}, \quad (2.1)$$

а її об'єм дорівнює

$$V = \sum A_i l_i. \quad (2.2)$$

Порівнюючи ці вирази

$$U = kV, \quad (2.3)$$

де $k = \sigma^2/2E$ - густина потенційної енергії деформацій.

У разі однорідного лінійного матеріалу, що має модуль поздовжньої пружності E , згаданий критерій виражається мінімумом потенційної енергії деформації:

$$U = \sum_{i=1}^n \frac{N_i^2 l_i}{2E\varphi_i^2 A_i}, \quad (2.4)$$

де n - число стрижнів довжиною l_i , N_i - зусилля в стержні.

Розв'язання варіаційної задачі щодо визначення геометрії ферми із змінною висотою h , на базі вище сказаного, проводиться ітераційним методом в наступному порядку:

Мінімум функціоналу (2.4) при варіюванні довжин t стержнів відповідають умові:

$$\partial U / \partial h_i = 0, \quad (i = 1, 2, \dots, t). \quad (2.5)$$

1) завдання директивних параметрів (прольоту, висоти та ін.), коефіцієнтів φ та вибір змінних h_i ; 2) визначення виразів внутрішніх зусиль у стрижнях; 3) виділення стрижнів зі змінним знаком зусиль та призначення знаків у початковому наближенні; 4) запис вираження потенційної енергії деформації U ; 5) задоволення критерію оптимальної конфігурації (формула 2.5); 6) розв'язання системи алгебраїчних рівнянь; 7) перевірка задоволення прийнятих знаків внутрішніх зусиль; позитивний результат означає закінчення рішення, у разі негативного результату необхідно повернутись до п. 3.

Слідом за проблемою оптимізації геометрії ферми наступний рівень її проектування – оптимізація її топології, тобто раціональне розташування розкосів і стійок [86] до утворення геометрично незмінної системи.

2.4. Принцип рівнонапруженості в елементах і розрахункових перерізах ферми по всьому об'єму

Сучасні тенденції розвитку будівельної галузі вимагають створення, більш досконалих інженерних конструкцій з високими експлуатаційними характеристиками та із зниженими показниками матеріалоємності і трудомісткості виготовлення.

Характерна риса сучасного етапу в проектуванні споруд - розвиток системного підходу і скорочення часу між розробкою конструктивної ідеї та її практичною реалізацією [27, 59, 61, 74, 79].

Альтернативою оптимальному проектуванню служить раціональне проектування, яке, на відміну від оптимального, не передбачає існування якого небудь цільового функціонала, а виражається в додаткових евристичних вимогах до напружено деформованого стану (НДС) конструкції (рівноміцність, рівнонапруженість, рівномоментність, максимальна жорсткість, або мінімальна маса), що гарантує покращення її якостей найбільш природним міцнісним критерієм раціонального проектування. Отже, розробка теорії і методів розрахунку рівнонапружених – раціональних комбінованих сталевих конструкцій з урахуванням реальних особливостей їх роботи набуває особливого значення.

Методика проектування раціональних систем передбачає формування ітераційних процедур, за допомогою яких покроково проводиться покращення геометричних або фізико-механічних параметрів конструкції. На сьогодні, для аналізу НДС при проектуванні конструкцій найчастіше використовуються шлях багаторазового перерахунку параметрів, що суттєво ускладнює процес і викликає великі труднощі. У цих умовах все зростаюче значення приймають методи раціонального проектування конструкцій [20]. Пошук раціональної конструкції з позиції її дійсного НДС дозволяє досягти суттєвого покращення техніко-економічних показників як самої конструкції, так і будівлі в цілому.

Основна задача при проектуванні будівельних конструкцій, з якою зустрічається інженер, є одержання рівномічної конструкції, тобто найбільш раціональної системи. За критерій раціональності конструкції приймаємо одночасне досягнення напруженнями розрахункового опору матеріалу балки

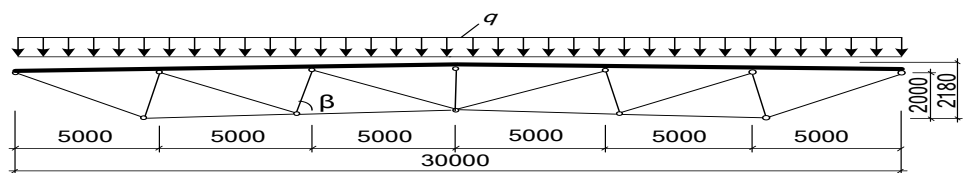
жорсткості в розрахункових перетинах балки жорсткості для основного навантаження.

Вирівнювання величин розрахункових напружень і збільшення кількості розрахункових перерізів в балці жорсткості дасть можливість зменшити поперечний переріз балки і підвищити ефективність таких конструкцій без додаткових матеріальних затрат. Таким чином, раціональне проектування є найбільш раціональне [19-25].

Раціональність конструктивної форми ферми залежить від того наскільки конструктивна форма відповідає вимогам виробництва і її призначенню, а також забезпечена надійність, економічність. При проектуванні раціонально і необхідно використовувати принципи максимального спрощення конструктивної форми і суміщення функцій і концентрації матеріалу.

Проблема розрахунку раціональних будівельних ферм, в тому числі комбінованих, насамперед ставиться як проблема їх раціонального проектування. Розглянемо, принцип рівнонапруженості (з метою одержання всіх елементів рівноміцними) в елементах і розрахункових перерізах на прикладі 30 м комбінованої сталеві ферми (рис. 2.1). Перетворення роботи сталевих балок суцільного перерізу з однопролітних в нерозрізні дає суттєве зменшення згинальних моментів [8, 24].

а)



б)

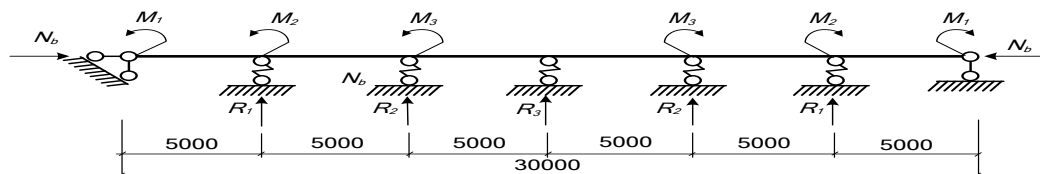


Рис. 2.1. а – схема комбінованої 30 м ферми; б - схема розрахункової моделі балки жорсткості комбінованої ферми

Розрахунки балки жорсткості комбінованої 30 м ферми, як нерозрізної системи) дають нерівномірний напружений стан по довжині основного елемента – балки жорсткості, який полягає у суттєвій різниці опорних і прольотних моментів. Це робить такі комбіновані конструкції не завжди раціональними [19, 20].

Використовуючи критерії раціональності [20]:

1. Забезпечення рівномірного напруженого стану - принцип рівнонапруженості (з метою одержання всіх елементів рівноміцними) в розрахункових перерізах балки жорсткості;
2. Регулювання напружено деформованого стану;
3. Концентрація матеріалу в основному елементі – балці жорсткості;
4. Малоелементність, технологічність конструкцій.

одержимо раціональну комбіновану конструкцію (рис. 2.1). В розрахункових перерізах балки жорсткості такої ферми приймемо раціональний (для пружно-пластичного матеріалу – сталі) переріз в формі симетричного двотавра, у якого максимально велика частина матеріалу зосереджена на полицях, з'єднаних стіною, товщина якої призначається з умов міцності стінки по дотичним напруженням, а також з її стійкості. До двотаврового перерізу близький за критерієм раціональності так званий коробчастий переріз.

Отже, забезпечення рівності напружень в розрахункових поперечних перерізах балки жорсткості дозволить значно підвищити ефективність комбінованої системи в загальному.

2.5. Узагальнюючі принципи формоутворення нових конструктивних комбінованих систем

Будівельна наука інтенсивно розвивається, особливо в напрямку пошуку нових матеріалів, будівельних конструкцій та технологій. Це призводить до появи принципово нових конструктивних рішень, які відповідали б високим вимогам сучасного будівництва. Одним із ефективних напрямків підвищення

технічного рівня будівельних конструкцій, в тому числі і комбінованих сталевих ферм, є розробка нових конструктивних форм, вдосконалення їх розрахунків і методів проектування [18]. У будівництві з'явилася необхідність створення нових конструкцій, зокрема комбінованих систем покриття, застосування яких сприятиме економії матеріалів й зменшенню трудомісткості технологічних процесів монтажу та виготовлення.

Нагромадженим досвідом застосування раціональних сталевих конструкцій виявлені їх безперечні переваги, які в особливій мірі проявляються в комбінованих конструкціях (балкових, шпренгельних, фермових, висячих та вантових), які мають менші габарити і матеріаломість в порівнянні з існуючими аналогами [21]. Комбіновані сталеві конструкції [18, 21] з конструктивними формами адаптованими до дійсного їх НДС за рахунок розрахункового регулювання, раціонального проектування можуть досягати на 17-32% меншу вартість і матеріаломісткість порівняно з типовими. Але в даний час не має чіткої програми їх розвитку, удосконалення, щоб значно підвищити їх ефективність.

Головними задачами науково-технічного прогресу в області сталевих конструкцій є економія сталі, використання високоякісних сталі і профілів, підвищення продуктивності і ефективності [7]. З урахуванням стану сучасної будівельної галузі логічним і закономірним вирішенням проблеми є розроблення нових конструктивних рішень. При цьому повністю розкриваються та використовуються при їх експлуатації позитивні якості як сталевих, так і залізобетонних конструкцій.

Принципи формоутворення нових типів конструкцій ґрунтуються, очевидно, на якісному оцінюванні відомих конструкцій, на вмінні виявити їхні позитивні та негативні ознаки. Тільки відкинувши у відомих конструкціях все негативне і посиливши все позитивне, можемо створити нові типи конструкцій, які будуть кращі від відомих [18]. Але принцип мінімальних витрат матеріалу не є достатнім. Тому другим принципом формоутворення є мінімальні технологічні затрати на виготовлення конструкції.

На жаль, обидва зазначені принципи є взаємно протилежні: балка із прокатного профілю має мінімальні технологічні затрати, але максимальну масу, а ферма, навпаки, - мінімальну масу, але максимальні технологічні затрати. Отже, раціональною буде якась проміжна конструкція, що матиме у своєму складі таку балку, яка вимагатиме мінімум фермових елементів. Тобто, це буде синтез параметрів малої маси ферми та малих технологічних затрат балки. Під раціональною конструкцією розумієм цілеспрямовано створену конструктивну систему, яка полягає в отриманні найкращих результатів при відповідних умовах. Такими конструкціями є комбіновані – шпренгельні та вантові.

Отже, розглянемо детальніше кожен із таких основних принципів формоутворення раціональних комбінованих конструкцій:

- мінімізація витрат матеріалу та його вирішення трансформуванням епюри моментів;
- принцип мінімальних технологічних витрат та його вирішення трансформуванням топології конструкцій.

Досконалий напружений стан конструкції під навантаженням не дає гарантії її найменшої вартості «у ділі». Характерним прикладом тут є ферма, для якої з умов уніфікації перерізів та довжин елементів свідомо зменшують значення коефіцієнта повноти напруженого стану конструкції [18]. Більше того, хоч ферма може мати досконалий напружений стан, а балка має найнедосконаліший, але з умов технології прокатні балки мають перевагу перед фермами за прольотів до $l = 12$ м. Це тому, що прокатна балка складається лише з одного елемента і зовсім не має вузлів, тоді як у фермі, навіть за умов уніфікації, є кілька типів елементів та багато вузлів з'єднання цих елементів.

Використання методики раціонального проектування комбінованих металевих конструкцій, результатів виконаних досліджень і вивчення впливу деформованого стану балки жорсткості на роботу комбінованої конструкції розроблені і запропоновані нові конструктивні форми комбінованих систем

меншою масою до 20%, які захищені патентами України на винаходи (Патенти України: № 144193, № 156643) [52-53].

Подальше удосконалення процесів проектування, виробництва і монтажу сталевих комбінованих конструкцій вимагає поєднання раціональних показників маси з мінімальною працемісткістю виготовлення. Поєднання цих факторів призведе до створення і використання легких комбінованих сталевих конструкцій, а розрахунковий метод регулювання в них НДС до підвищення їх ефективності і забезпечення раціональності без додаткових технологічних затрат.

В даний час створена в Україні нова галузь будівельної індустрії - спеціалізоване виробництво легких металевих конструкцій (ЛМК) комплектної поставки. Застосування ЛМК дозволяє зменшити масу виробничих будівель не менше ніж на 10...15%, знизити трудомісткість виготовлення в 1,3...1,5 рази і вартість будівництва на 8...10% [29, 43, 44]. Отже, доведення комбінованих сталевих конструкцій до стадії легких і раціональних дозволить використати існуючу будівельну базу і забезпечить високі техніко-економічні показники.

Методика раціонального проектування комбінованих металевих конструкцій являє собою метод науково обґрунтованого конструювання, при чому його кінцева мета може досягається синтезом раціональних конструктивних форм, що забезпечують раціональне використання міцнісних характеристик матеріалів. Раціональне проектування комбінованих сталевих конструкцій комплексний і багатоаспектний процес. Технічний рівень на стадії проектування зводиться до вибору раціональних параметрів, а вибір раціональних параметрів на ранніх стадіях проектування комбінованих конструкцій дозволяє підвищити їх технічний рівень.

За результатами теоретичних досліджень розроблених конструкцій [93, 106, 118-120] було встановлено їх ефективність, порівняно з аналогами, виявлено ряд технологічних і конструктивних переваг, які відображені в наступних висновках:

- Проектування верхнього поясу, як нерозрізного, дозволяє суттєво зменшити величину згинального моменту та, як наслідок, зменшити масу самого елемента
- Концентрація більшої частини (50-80%) матеріалу дає можливість проектування комбінованих сталевих ферм як малоелементних
- Зменшення маси конструкції при тому ж навантаженні і прольоті можна досягти за рахунок раціональної топології сталевих ферм
- Розрахункове регулювання НДС дозволяє на стадії проектування без додаткових витрат отримати рівність напружень у розрахункових перерізах
- Використання високоміцної сталі у розтягнутих елементах дозволяє зменшити переріз елементів та у повній мірі використовувати несучу здатність
- За рахунок раціонального кута нахилу стійок зменшується маса конструкції в цілому, зокрема, завдяки перерозподілу зусиль у конструкції
- Розроблені конструкції однаково ефективно працюють як при симетричному так і несиметричному завантаженні

2.6. Дослідження раціональних параметрів комбінованих сталевих ферм прольотом 30 м

2.6.1. Вибір раціональної топології комбінованої ферми. Значного зниження вартості сталевих конструкцій можна досягти в основному за рахунок зниження кількості матеріалу, тобто зменшення витрати сталі є найважливішою умовою вибору раціональної конструктивної форми [8, 21, 29, 51, 65, 91, 119, 128]. У свою чергу, зменшення маси конструкції викликає зниження трудомісткості виготовлення та монтажу. Ці фактори взаємопов'язані і ефективність їх впливу на топологію тим більша, чим повніше враховано вимоги технологічності конструкції. Отже, зменшення витрати сталі є визначальним фактором підвищення економічного ефекту застосування конструкції. При цьому під

раціональною топологією конструкції розуміється вибір проекту конструкції, яка задовольняє всім обмеженням завдання і близька до оптимального рішення з достатньою точністю. Раціональною вважається конструкція, яка має мінімальну масу, технологічність і мінімальну трудомісткість її виготовлення.

Раціональність і якість конструктивної форми сталеві конструкції визначається відповідністю конструкції експлуатаційному призначенню, надійністю, економічністю і закладається на етапі проектування і критерієм економічної ефективності конструкції є структурна ефективність.

Нова ідея конструктивного рішення об'єкта може дати більший ефект, ніж оптимізація конструкції встановленої геометрії за її параметрами [86].

Найпоширенішим використанням сталевих ферм в будівлях є робота на зовнішні навантаження від перекриття і покриття в будівлях промислового, цивільного і сільськогосподарського призначення та на внутрішні навантаження від підвісних стель та технологічного обладнання. Зовнішні навантаження на ферми прикладаються здебільшого у вузлах, тому в окремих стержнях виникають тільки поздовжні зусилля стиску або розтягу при роботі ферми на згин. Але, останнім часом, в зв'язку з великою кількістю індивідуальних проектів виникає необхідність в позавузловому прикладанні зосереджених сил.

Проміжними між суцільною балкою і фермою є комбіновані системи (в тому числі ферми), які складаються із балки жорсткості, підкріпленої знизу шпренгелем чи розкосами або зверху аркою.

За статичною схемою роботи ферми можуть працювати як розрізні балкові, нерозрізні, аркові, рамні та консольні. Розрізні балкові ферми найбільш широко використовуються завдяки максимальній простоті виготовлення і монтажу.

Відомо, що обрис поясів ферм та вид решітки значною мірою визначає їхню економічність. Теоретично найбільш економічною за витратами металу є ферма, яка за своєю формою відповідає обрисам епюр згинальних моментів. Тобто, найбільш близькою до цього є так звана шпренгельна ферма

(шпренгельний тип). Цей тип сталевих ферм є найраціональнішим, що показано в [98, 112] з опиранням на верхній пояс (рис. 2.2).

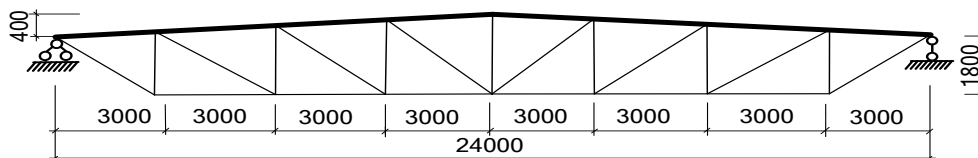


Рис. 2.2. Шпренгельний тип ферми [98]

Серед схем ферм, по обрису поясів, найбільш широкого поширення набули ферми з паралельними поясами, тому для цих ферм і розроблено типові вирішення в ДСТУ [35, 90] (рис. 2.3).

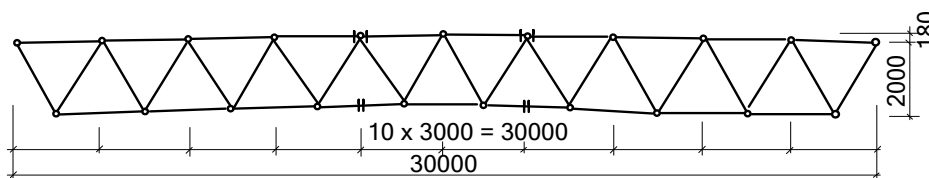


Рис. 2.3. Схема типової ферми з ДСТУ [35]

Вид решітки ферми суттєво впливає на масу та трудомісткість виготовлення і на умови роботи панелей поясів. Найбільш раціонально використовувати в якості структур з паралельними поясами **ферму Пратта**, а тип решітки (**N – truss**) в ній для комбінованих сталевих ферм [53, 99, 118], рис. 2.4.

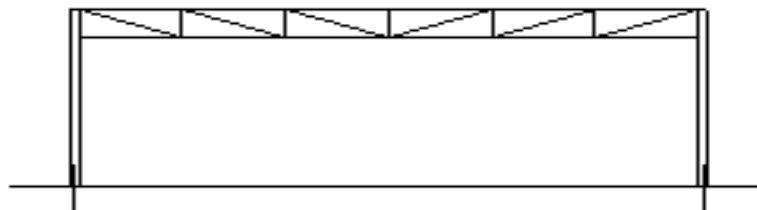


Рис. 2.4. Ферма Пратта

Ферма Пратта має довші діагональні елементи, які працюють на розтяг, а коротші вертикальні елементи на стиск. Ферма Пратта однаково добре працює при дії навантаження як на верхній пояс чи на нижній.

Також, одним із шляхів підвищення ефективності комбінованих ферм є вибір раціональної топології (раціоналізація конструктивної форми) варіацією кількості елементів і вузлів у фермі, тобто використання ферм з розрідженою решіткою – так званих малоелементних кроквяних конструкцій під скатну покрівлю [43] (рис. 2.5).

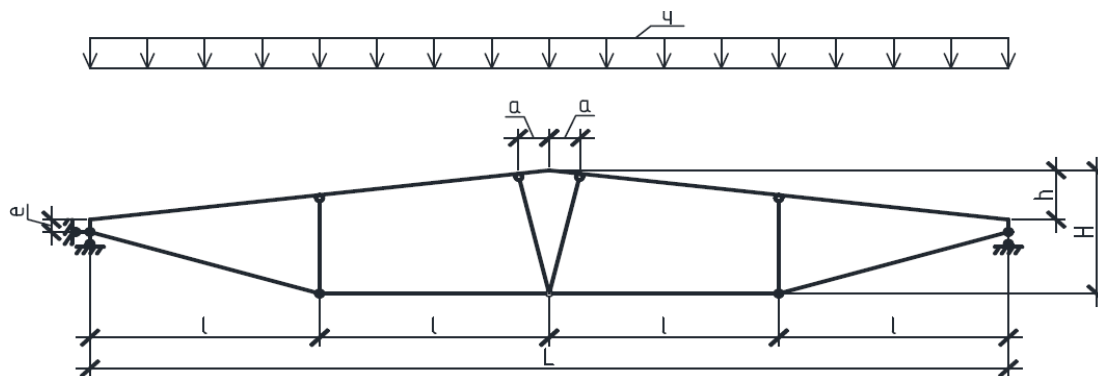


Рис. 2.5. Малоелементна кроквяна ферма

На основі вище наведеного можна зробити висновок, що раціональна топологія комбінованої ферми повинна бути шпренгельного типу, з паралельними поясами, тип решітки (N – truss) і малоелементною.

Отже, розробка нових ефективних конструктивних форм була і залишається даний час основним із відомих шляхів вирішення проблеми ресурсозбереження та дозволяє максимально розкрити резерви несучої здатності і зменшити металоємність конструкції.

2.6.2. Аналіз раціонального типу решітки в комбінованій фермі. Сучасний процес проектування раціональних будівельних несучих конструкцій інженерних споруд - включаючи ферми, найбільш тісно пов'язаний з економією матеріалу та мінімізацією його об'єму чи ваги [113, 127]. Отже, як було наведено вище, тип решітки може впливати на роботу комбінованої ферми.

Нова ідея конструктивного рішення об'єкта може дати більший ефект, ніж

оптимізація конструкції встановленої геометрії за її параметрами [86]. Сюди входить синтез несучих конструкцій на рівні топології.

Останнім часом як один із підходів до формування раціональних структур, крім класичного критерію (мінімальний об'єм або маса), використовується підхід, заснований на енергетичних принципах (мінімальна потенційна енергія деформації) [2].

Проведем визначення раціональної топології (тип решітки) сталевих комбінованих ферм на основі структурного синтезу з урахуванням енергетичного критерію раціональності. Для того, щоб вибрати раціональну топологію сталевих комбінованих ферм з прольотом 30 м, виконали їх розрахунок на ПК з програмою «LIRA-CAD 2016 R5» для $q = 12,75 \text{ кН / м}$: найпоширенішої ферми в Україні типу «Молодечно» (рис. 2.6, а); комбіновану ферму, що використовується в Росії (рис. 2.6, б); комбіновану ферму, що використовується в Німеччині (рис. 2.6, в); оптимізовані комбіновані ферми в Ізраїлі (рис. 2.6, г).

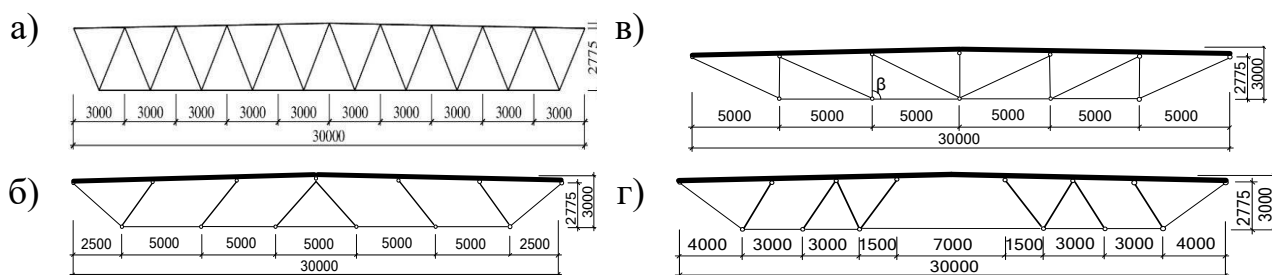


Рис. 2.6. Варіанти топології ферм

Для цих ферм були сформульовані обмеження на умови міцності, жорсткості та стійкості, приведені в нормах [30, 31, 34, 41, 90] та конструкторською практикою. Синтез несучих конструкцій - ферм повинен мати єдину методологічну основу, як таку можна взяти узагальнену характеристику потенційної енергії деформації (2.1), (2.2) та (2.3) [2]. Потенційна енергія деформації комбінованих ферм для балок жорсткості:

$$U_{bs} = \sum_{i=1}^n \int_0^{l_i} \frac{M_i^2}{2E_i I_i} dx + \sum_{i=1}^n \int_0^{l_i} \frac{N_i^2}{2E_i A_i} dx \quad (2.6)$$

Потенційна енергія деформації для стиснених стрижнів:

$$U_c = \frac{R}{2E} \sum_{i=1}^n \frac{N_i l_i}{\phi_i} \quad (2.7)$$

Потенційна енергія деформації для розтягнутих стрижнів:

$$U_s = \frac{R}{2E} \sum_{i=1}^n N_i l_i \quad (2.8)$$

Критерієм оптимальності ферми з однорідного лінійно пружного матеріалу є рівномірність віртуальної системи з внутрішніми силами N_i / ϕ_i , де ϕ_i - коефіцієнт зменшення розрахункового опору R [98]. У разі однорідного лінійного матеріалу, що має модуль поздовжньої пружності E , згаданий критерій виражається мінімумом потенційної енергії деформації [2, 137]:

$$U = \sum_{i=1}^n (N_i^2 l_i) / (2E \phi_i^2 A_i), \quad (2.9)$$

де n - число стрижнів довжиною l_i , N_i - зусилля в стрижні.

Критерій енергії забезпечує мінімальну вартість у випадку однорідного матеріалу. Тут, насамперед, мається на увазі оптимальна решітка та раціональне розташування підкосів і стійок. Кінцевою метою є економія матеріалу для розробленої конструкції. Це досягається шляхом варіювання функціонального U за параметрами та відповідного формування перерізів елементів.

Другим підходом до формування раціональних структур є їх оцінка за обсягом використовуваного матеріалу V , або масою m :

$$V = \sum_{i=1}^n A_i l_i \quad m = \sum_{i=1}^n \gamma A_i l_i \quad (2.10)$$

Розглянемо оцінку ефективності топології сталевих комбінованих ферм прогоном 30 м, що наведені на рис. 2.1. Для цього використаємо критерій ефективності - мінімум потенційної енергії деформації сталевих комбінованих ферм. В таблиці 2.1 представлені величини потенційної енергії деформації ферми U та маса матеріалу ферми - m , для чотирьох варіантів сталевих ферм на рис. 2.6.1.

Таблиця 2.1

Потенційна енергія деформації та маса ферми

Варіанти ферм	а	б	в	г
U, J (джоуль)	8205	10839	8168	8285
Маса, кг	2070.7	3206.0	1842.3	2489.9

Як видно з табл. 2.1, найменшу масу має ферма (рис. 2.6, в) з низхідними розкосами і вертикальними стійками - $\beta = 90^\circ$, а це тип решітки ферми Пратта (N – ферма). Невідповідність між крайніми показниками маси та потенційної енергії в таблиці зумовлена обмеженнями у виборі прокатних профілів, що впливає на точність.

Отже, найбільш раціональною з точки зору мінімізації витрат сталі, а також витрат на виготовлення та монтаж, є наступна конструктивна форма решітки - ферма Пратта. Ферма Пратта вирішує необхідність триангуляції за допомогою комбінації діагональних розтягнутих елементів і вертикальних елементів стиску. Перевага ферми Пратта для використання в кроквяних конструкціях заключається у ефективності використання гнучких елементів із високоміцної сталі в якості діагональних розтягнутих елементів. Вертикальні короткі, стиснуті елементи решітки ферми Пратта, як правило, мають менший переріз і найбільше підходять для використання в комбінованих сталевих фермах [105]. Цілком імовірно, що ферма Пратта найбільше підходить для використання в якості структур з паралельними поясами, а такий тип решітки в комбінованих сталевих фермах.

На основі вище наведеного, вибрано раціональну топологію комбінованих сталевих ферм прольотом 30 м, що відповідає регулярному

розміщенню вертикальних (або під кутом) стиснених стійок та низхідних розтягнутих стояків.

Так як робота комбінованих ферм менших прольотів не має принципової різниці, тоді ці результати можна використати також для ферм прольотами 24 і 18 м.

2.6.3. Пошук раціонального співвідношення маси балки жорсткості до маси всієї ферми. Нагромадженим досвідом застосування раціональних сталевих конструкцій виявлені їх безперечні переваги, які в особливій мірі проявляються в комбінованих конструкціях (балкових, шпренгельних, фермових, висячих та вантових) [18, 61, 64, 82, 95-97], основним робочим елементом яких є балка жорсткості, від металоємкості якої значною мірою залежать техніко-економічні показники усієї системи.

Проте, раціональне проектування забезпечує тільки одне, не обов'язково найменше значення [85, 101, 116, 137]. Шляхів економії сталі є декілька. Одним з них є реалізація принципу концентрації матеріалу в основних несучих системах [21], тобто балці жорсткості комбінованих ферм, маса якої складає близько 60 -80% від маси конструкції.

Разом з тим, в спеціальній літературі недостатньо висвітлено проблему їх раціонального проектування, а наявний досвід її вирішення недостатньо узагальнений. На даний час не має чітких рекомендацій по підборі параметрів таких комбінованих систем мінімальної маси.

З цією метою проведений числовий експеримент по знаходженню раціонального співвідношення маси балки жорсткості комбінованої ферми до загальної маси ферми. В якості критерія раціональності прийнята мінімальна маса ферм. Розрахунок моделей комбінованих ферм проводили у програмному комплексі «LIRA-CAD 2016 R5» для навантаження $q = 12,75$ кН/м, при раціональному куті нахилу стиснутих стержнів решітки рівному $\beta = 80^\circ$. Моделі комбінованих ферм прогоном 3,0 м і висотою 0,2 м (рис. 2.7)

розраховували при різних співвідношеннях (у відсотках) маси балки жорсткості комбінованої ферми до загальної маси ферми, рівних: 40%; 50%; 60% і 70%.

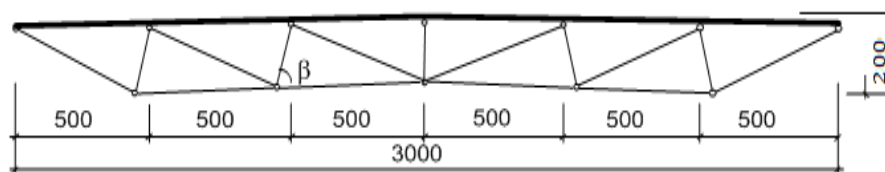


Рис. 2.7. Модель комбінованої ферми

За результатами розрахунків побудований графік залежності маси ферми від співвідношення маси балки жорсткості до маси ферми (рис. 2.8).

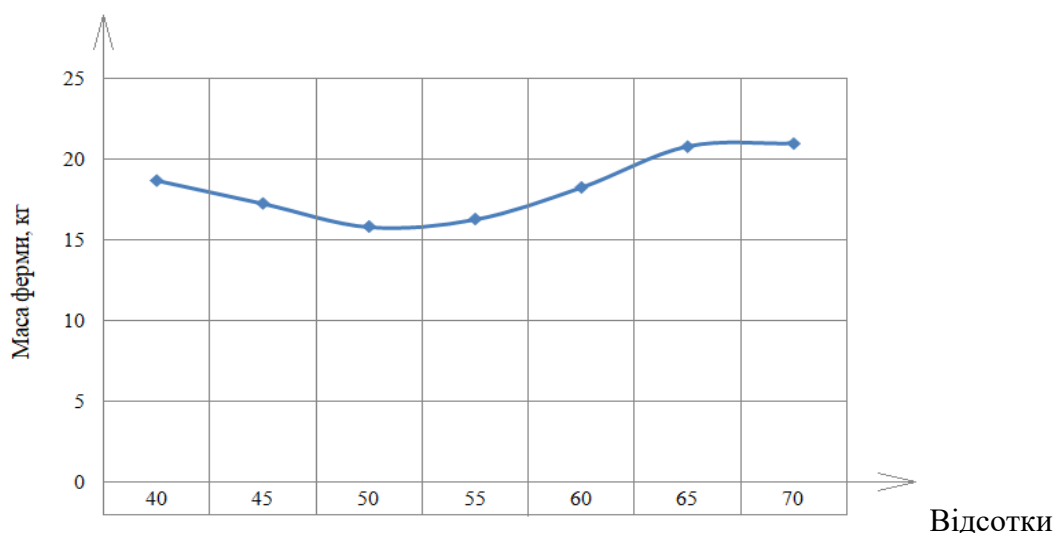


Рис. 2.8. Графік залежності маси комбінованої ферми від відсотка маси балки жорсткості

Отже, за результатами числового експерименту для моделей ферм прогоном 3 м для $q = 12,75$ кН/м, мінімальна маса комбінованої ферми була при співвідношенні маси балки жорсткості до маси ферми близько 50 % (рис. 2.8). З метою перевірки результатів раціонального співвідношення (50%) маси балки жорсткості комбінованої ферми до загальної маси ферми одержаного на

3,0 м моделях проводили числовий експеримент для комбінованої сталевій шпренгельної ферми прогоном 30 м (рис. 2.9).

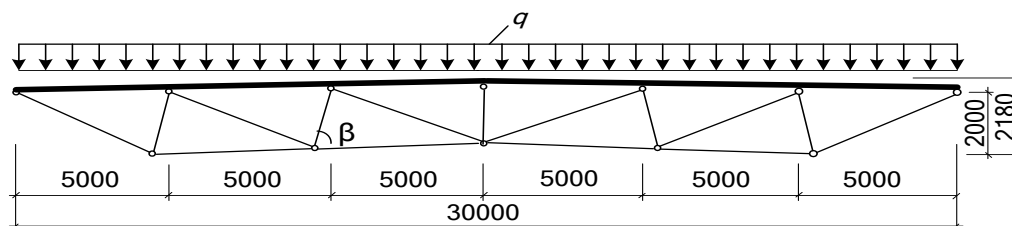


Рис. 2.9. Схеми комбінованої ферми

Експериментальні дослідження виконували у відповідності з планом двофакторного трирівневого експерименту. За фактори, що змінювалися прийнято висоти комбінованої ферми ($h = 2,0$ м; $h = 2,5$ м; $h = 3,0$ м), співвідношення маси балки жорсткості комбінованої ферми до загальної маси ферми (40%; 50%; 60%). Матриця планування і результати повного двофакторного експерименту показані в табл. 2.2. У розрахунках використовувався програмний комплекс «LIRA-CAD 2016 R5». Розрахунковий опір сталі $R_y = 225$ МПа.

Таблиця 2.2

Матриця планування і результати повного двофакторного експерименту ($q = 12,75$ кН/м, $l = 30$ м)

№	Матриця планування в кодах		Матриця планування в натуральних значеннях		Маса в кг
	X_1	X_2	Співвідношення у %	Висота ферми h, м	
1	0	0	50	2,5	1603.62
2	0	-1	50	2,0	1756.73
3	0	+1	50	3,0	1513.78
4	-1	0	40	2,5	1823.06
5	-1	-1	40	2,0	2036.31
6	-1	+1	40	3,0	1815.83
7	+1	0	60	2,5	2021.55
8	+1	-1	60	2,0	1953.28
9	+1	+1	60	3,0	1998.92

За отриманими рівняннями регресії побудовані ізопараметричні діаграми, що графічно описують залежність критеріїв від змінних факторів (рис. 2.10). На рис. 2.10, а показано, що маса ферми міняється в границях від 1513 кг до 2036 кг при зміні висоти ферми від 2,0 до 3,0 м відповідно. Співвідношення маси балки жорсткості комбінованої ферми до загальної маси ферми, в той же час, змінюється в границях від 40 до 60%.

Зміна маси ферми (рис. 2.10 а, б, в) має особливості, мінімальне значення маси одержуємо при висоті ферми h рівній 3,0 м, відповідно при співвідношенні маси балки жорсткості комбінованої ферми до загальної маси ферми рівному 50%. Також, із графіків на рис. 2.10 видно, що мінімальні значення маси ферми для різних висот завжди є при співвідношенні маси балки жорсткості комбінованої ферми до загальної маси ферми рівному 50%. Отже, 50% відношення є раціональним для різних висот і прогонів комбінованих ферм.

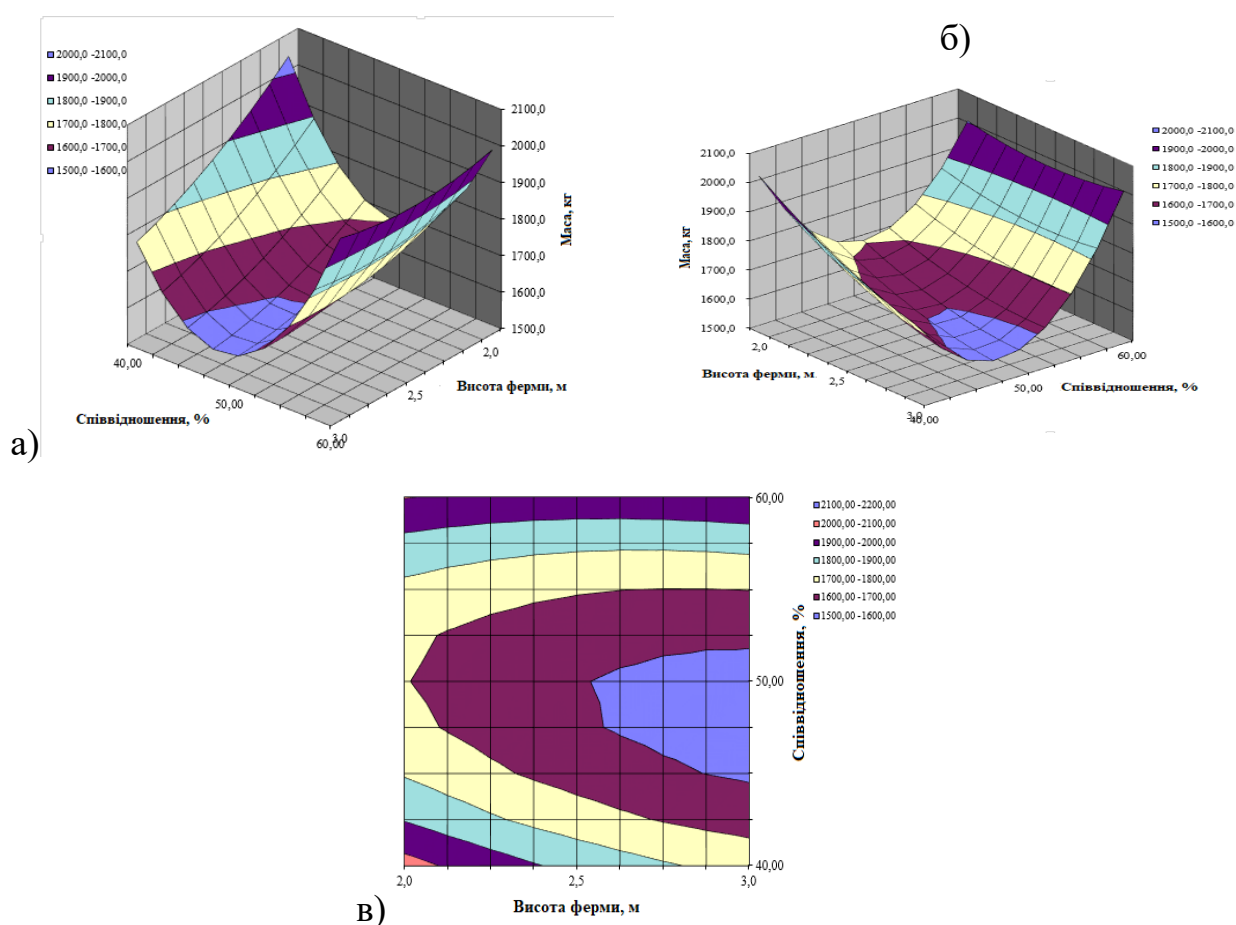


Рис. 2.10. Діаграми зміни маси комбінованої ферми m залежно від відсотка маси балки жорсткості комбінованої ферми до загальної маси v та висоти ферми h

2.6.4. Визначення раціональних кутів нахилу стиснутих стержнів решітки сталевій комбінованій фермі. Проведемо аналіз впливу кута нахилу β стійок (рис.2.11), на масу раціональної ферми висотою 2 м, з кількістю панелей верхнього поясу – 6 штук.

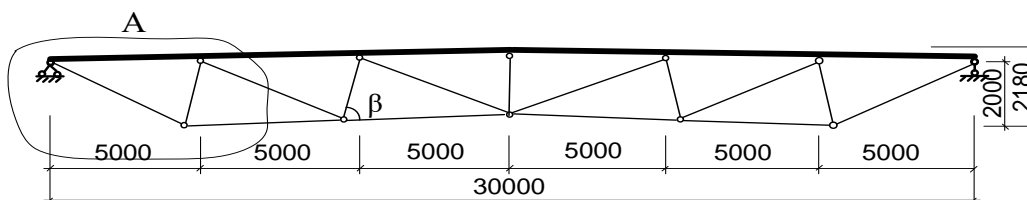


Рис. 2.11. Схема раціональної комбінованої ферми

Для цього визначаємо масу комбінованих ферм при різних кутах нахилу стійок в діапазоні 45° - 90° : $\beta = 45^{\circ}$; $\beta = 67.5^{\circ}$; $\beta = 80^{\circ}$; $\beta = 90^{\circ}$ (рис. 2.12). Розрахунок проводили на симетричне рівномірно розподілене навантаження $q = 13 \text{ kN/m}$, на ПК у програмі «ЛІРА-САПР 2016 R5» методом скінчених елементів, табл. 2.3. Дані результати також наведені на діаграмі рис. 2.13.

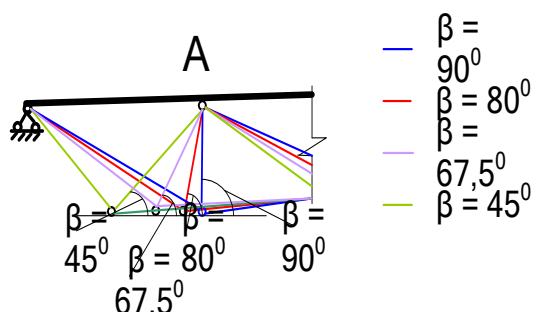


Рисунок 2.12. – Кути нахилу стійок шести панельної раціональної комбінованої ферми (вузол А для рис. 2.11)

Таблиця 2.3

Маса і прогини комбінованих ферм

Ферма	Прогин, мм	Маса, кг	Ферма	Прогин, мм	Маса, кг
Рис. 2.6.2 (кут 90°)	150 мм, (1/200 L)	1873,3	Рис. 2.6.2 (кут $67,5^{\circ}$)	148 мм, (1/203 L)	1775,1
Рис. 2.6.2 (кут 80°)	150 мм, (1/200 L)	1756,3	Рис. 2.6.2 (кут 45°)	146 мм, (1/205 L)	1799.0



Рис. 2.13. Діаграма впливу кута нахилу стійок β на масу комбінованих ферм

Як видно із табл. 2.3 і діаграми на рис.2.13, маса комбінованої ферми з кутом нахилу стійок 80° є найменшою і різниця з найбільшою масою при куті 90° складає 6.5 %. Маса двох інших ферм, при кутах $67,5^\circ$ і 45° , більша мінімальної. Отже, можна прийняти, що раціональний кут нахилу стійок комбінованої ферми, по витратах сталі, приблизно становить $78-82^\circ$, враховуючи вплив обмеженого сортаменту металевих профілів і точність розрахунків.

Ефективність усіх комбінованих сталевих ферм також залежить від кута нахилу стиснених стрижнів β (рис. 2.11). Числові і аналітичні розрахунки показали [95], що при роботі в пружно-пластичній області (в закритичній поведінці) і врахування власної ваги дає збільшення несучої здатності комбінованих ферм до 20%, що залежить від величини кута нахилу стиснених стержнів і напрямку їх нахилу, що підтверджується останніми дослідженнями Boeing і NASA, США, рис. 2.14 [95].



Рис. 2.14. Комбіновані ферми в літакобудуванні: легкі, пружноподатливі, ультратонкі нахилені опори для крил - Boeing і NASA, США

Також, з метою оцінки раціональних параметрів, з точки зору витрати матеріалів, висот комбінованої сталеві ферми, кутів нахилу стиснутих стержнів решітки ферми, проведений числовий експеримент для комбінованої сталеві ферми прогоном 30 м (рис. 2.11). Експериментальні дослідження виконували у відповідності з планом двофакторного трирівневого експерименту (табл. 2.4). За фактори, що змінювалися прийнято висоти комбінованої ферми ($h = 2,0$ м, $h = 2,5$ м, $h = 3,0$ м, $h = 3,5$ м, $h = 4,0$ м), кут нахилу стиснутих стержнів решітки ферми ($\beta = 45^\circ, 56,25^\circ, 67,5^\circ, 78,75^\circ, 67,5^\circ$). Критерієм оцінки була мінімальна маса ферми m .

Таблиця 2.4

Характеристика планування експерименту

Характеристика	Параметри планування	
	Кут нахилу β , град. (X_1)	Висота ферми h , м (X_2)
Головний рівень "0"	45	2
	51,25	2,5
Нижній рівень "-1"	67,5	3
	73,75	3,5
Верхній рівень "+1"	90	4
Інтервал варіювання	6,25	0,5

Аналіз отриманих математичних залежностей, а також їх графічна інтерпретація дозволяють визначити раціональні параметри комбінованої сталеві ферми прогоном $l = 30$ м для погонного навантаження $q = 12,75$ кН/м.

У результаті обробки планів та відповідних їм числових даних за методом найменших квадратів отримано рівняння регресії (2.11), що адекватно описує залежність величин маси ферми, як критерія раціональної системи від змінних факторів.

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{12}x_1x_2, \quad (2.11)$$

де x_1, x_2 – значення факторів, що змінюються; Y – функція відгуку двофакторного експерименту; $b_0, b_1, b_2, b_{12}, b_{11}, b_{22}$ – коефіцієнти регресії.

На основі отриманих коефіцієнтів складено рівняння регресії досліджуваної функції. Матриця планування і результати повного двофакторного експерименту показані в табл. 2.5.

Таблиця 2.5

Матриця планування і результати повного двофакторного експерименту

№	Матриця планування в кодах		Матриця планування в натуральних значеннях		m , кг
	X_1	X_2	Кут нахилу, β град.	Висота ферми h , м	
1	-1	-1	67,5	3	1688,67
2	-1	0	67,5	2	2050,30
3	-1	+1	67,5	4	1726,63
4	0	-1	45	3	1758,36
5	0	0	45	2	2077,55
6	0	+1	45	4	2107,55
7	+1	-1	90	3	1692,75
8	+1	0	90	2	2074,28
9	+1	+1	90	4	1780,30

За отриманими рівняннями регресії побудовані ізопараметричні діаграми, що графічно описують залежність критеріїв від змінних факторів (рис. 2.15, 2.16).

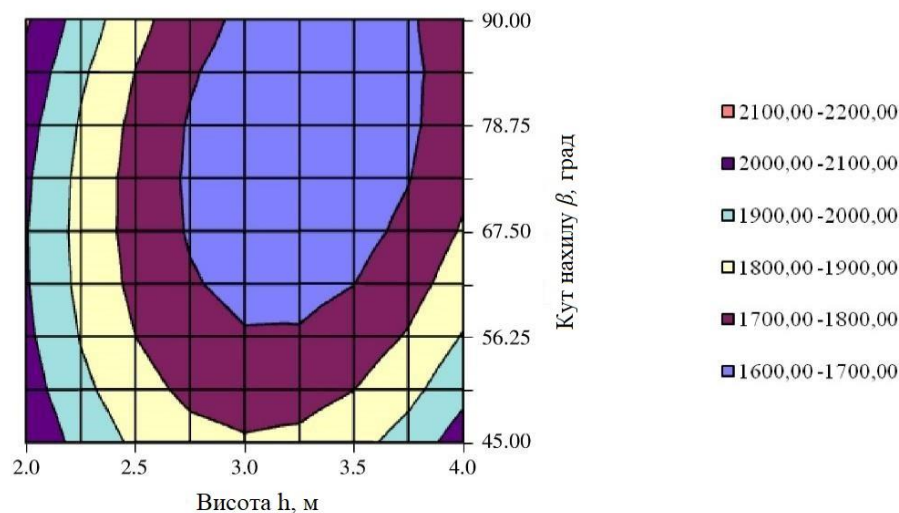


Рис. 2.15. Діаграми зміни маси ферми m залежно від кута нахилу β стиснутих стрижнів решітки ферми та висоти ферми h .

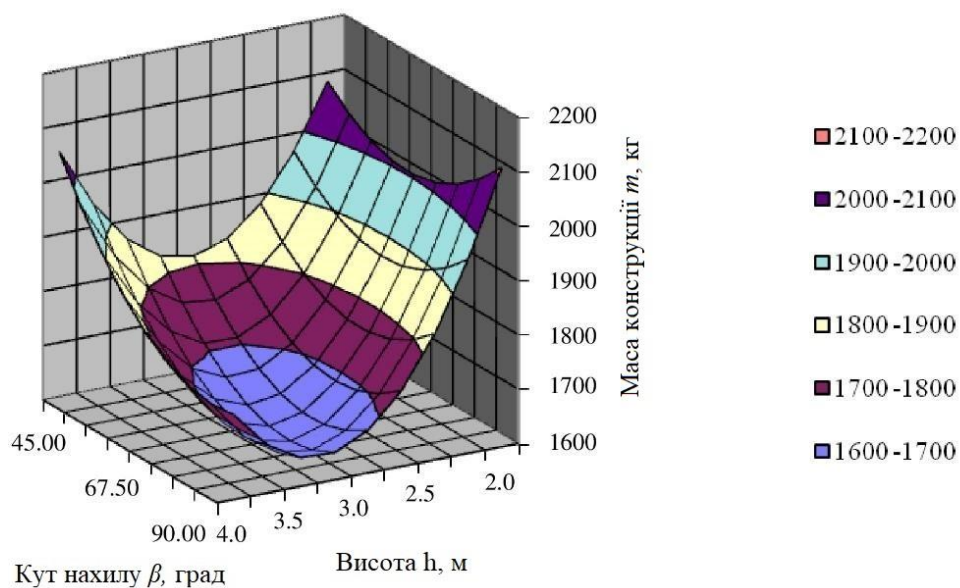


Рис. 2.16. Ізопараметрична діаграма зміни маси ферми m залежно від кута нахилу β стиснутих стрижнів решітки ферми та висоти ферми h

На рис. 2.15, 2.16 показано, що маса ферми m міняється в границях від 1690 кг до 2107 кг при зміні висоти ферми від 2,0 до 4,0 м відповідно. Кут нахилу β , в той же час, змінюється в границях від 45 до 90°. Мінімальна маса ферми m

= 1640 кг була отримана при висоті ферми h , що приблизно дорівнює 3 м, відповідно, під кутом нахилу стійок β , рівним приблизно 79° - 82° , а при куті 90° , маса ферми вона складала 1842.3 кг, тобто на 12,3 % більше.

Отже, раціональний кут нахилу фермових стійок визначений як 79° - 82° , що забезпечує зменшення маси комбінованої ферми до 12,3%.

2.6.5. Пошук раціональної кількості панелей верхнього поясу 30 м комбінованої ферми. На даний час Українським науково-дослідним та проектним інститутом сталевих конструкцій імені В.М. Шимановського розроблено державний стандарт для сталевих крокв'яних ферм з гнutoзварних профілів прямокутного перерізу [35]. Даний стандарт враховує сучасні досягнення в області сталевих конструкцій, відповідає вітчизняним і зарубіжним вимогам до таких систем, а також надає обмеження по масі наприклад, маса ферми прогоном 30 м, на навантаження 1,3 т/м.п не повинна перевищувати 2000 кг [35].

Але, такі типові крокв'яні ферми [35] мають наступні недоліки: недосконала складна топологія через велику кількість елементів і вузлів (наприклад, типова ферма прогоном 30 м складається із 39 елементів і має 21 вузол); не повне використання міцнісних характеристик сталі в елементах по довжині ферми через дотримання технологічності при виготовленні; підвищені матеріаломісткість і трудомісткість та вартість.

Основною перевагою комбінованих конструкцій є концентрація матеріалів та можливість проектування їх малоелементними [15, 18]. Тому, для вирішення цієї і поставлених вище проблем необхідно дослідити і розробити нові раціональні конструктивні форми сталевих комбінованих ферм збільшеного прогону до 30 м, які б володіли мінімальними витратами сталі, низькою трудомісткістю, були малоелементними і максимально технологічними. Відомо, що ефективність і технологічність ферм в основному залежить від конструктивних форм і габаритних розмірів [21], а також від кількості її елементів [97].

Проведем дослідження заміни традиційних типових крокв'яних сталевих ферм (на прикладі 30 м прогону) комбінованими з такими ж габаритними розмірами як типові.

Для оцінки конструктивних форм необхідно прийняти критерії ефективності. Сюди відносяться: об'єм матеріалу; вартість конструкції в «ділі», або приведеної вартості; вартості виготовлення, транспорту і монтажу. Критерій вартості носить кон'юктурний характер і реальні ціни є справедливими на короткому інтервалі. Враховуючи, що вартість сталі складає приблизно 70% від вартості в «ділі» конструкції [124, 125] , критерій мінімуму вартості доцільно замінити на більш простий критерій мінімум об'єму матеріалу, який можна записати у вигляді

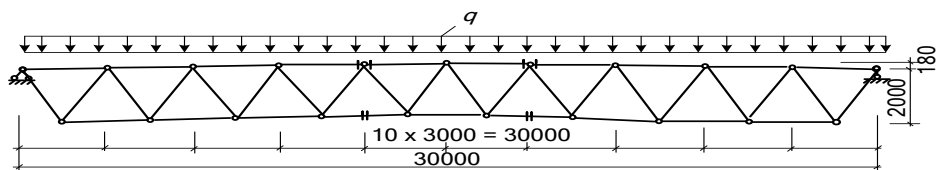
$$V = \sum V_i = \min, \text{ а } V_i = \sum_{(i=1)}^m A_i l_i = \min, \quad (2.12)$$

де V – об'єм конструкції; V_i - об'єм елемента, як складової частини конструкції.

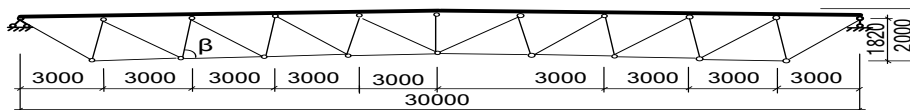
Розглянемо, як еталон, типову крокв'яну ферму з гнutoзварних профілів прямокутного перерізу прогоном 30 м і висотою 2 м з обпиранням на верхній пояс (рис. 2.17, а) [35]. Проведем аналіз конструктивних параметрів наступних шпренгельних ферм прогоном 30 м при роботі на рівномірно розподілене навантаження: типової (еталонної) – рис. 2.17, а [35]; запропонованих комбінованих ферм з обпиранням на верхній пояс з різним числом панелей верхнього поясу (10 для ферми на рис. 2.17, б; 8 для ферми на рис. 2.17, в; 6 для ферми на рис. 2.17, г; 4 на рис. 2.17, д та 3 на рис. 2.17, ж) з решіткою з спадними розкосами і регулярним розміщенням стійок, та однаковим кутом нахилу стійок, з спадними розкосами рівним $\beta = 67,50$. З метою порівняння, габаритні розміри всіх ферм прийняті однаковими, такими ж як у типової (рис. 2.17).

Визначено масу кожної з наведених ферм, проводячи порівняльний розрахунок на симетричне рівномірно розподілене навантаження $q = 13\text{kN/m}$, при однакових габаритах на ЕОМ ПК у програмі «ЛІРА-САПР 2016 R5» методом скінчених елементів, табл. 2.6.

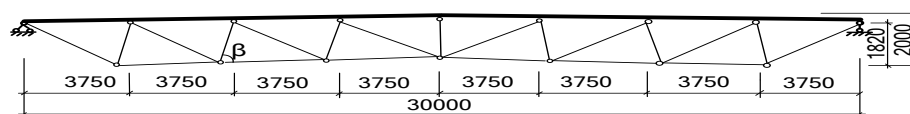
а)



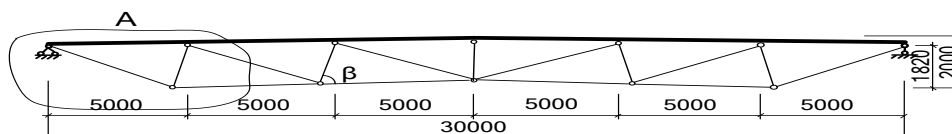
б)



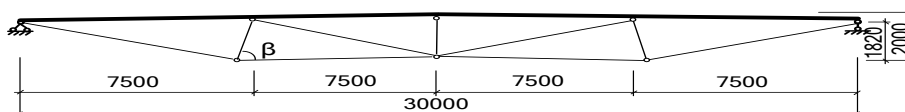
в)



г)



д)



ж)

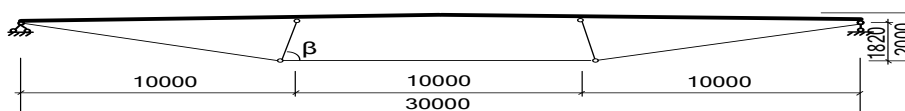


Рис.2.17. Досліджувані топології сталевих кроквяних ферм

Таблиця 2.6

Маса і прогини ферм

Ферма	Прогин, мм	Маса, кг	Ферма	Прогин, мм	Маса, кг
Рис. 2.17, а	147 мм (1/204 L)	1859,6	Рис. 2.17, г	148мм (1/203 L)	1775,1
Рис. 2.17, б	147 мм (1/204 L)	1813,7	Рис. 2.17, д	148мм (1/203 L)	2135.1
Рис. 2.17, в	148мм (1/203 L)	1732,0	Рис. 2.17,ж	137мм (1/219 L)	2194.7

З табл. 2.6, маса ферм (рис. 2.17, д і ж) перевищує обмеження по масі в 2000 кг згідно [35], вони є для даного прогону і навантаження не раціональними, тому в подальшому їх розглядати не будемо. Показники по масі трьох інших ферм (рис. 2.17, б, в, г) є меншими 2000 кг і меншими маси еталонної ферми (рис. 2.17, а).

Як видно із табл. 2.6, заміна типової (еталонної) ферми (рис. 2.17, а) на комбіновану ферму з кількістю панелей верхнього поясу вісім (рис. 2.17, в), яка має меншу кількість елементів (типова 39 і має 21 вузол, а комбінована – 22 і має 16 вузлів), має також зменшену масу на 26% (табл.2.6). Комбінована ферма з кількістю панелей верхнього поясу шість (рис. 2.17, г), порівняно з комбінованою фермою (рис. 2.17, в), має ще меншу кількість елементів – 16 і вузлів 12, але не набагато більшу масу від ферми (рис. 2.17,в), на 3%. Отже, вона є самою технологічною серед розглянутих.

Також, в праці [20], на основі енергетичних принципів будівельної механіки одержано функціональну залежність між енергією деформації U_b при згині звичайної балки і енергією деформації U при згині нерозрізної балки жорсткості на проміжних пружних опорах з рівноекстремальною епюрою M_x , яка моделює верхній пояс комбінованих ферм, і кількістю її прогонів n (без врахування енергії опор):

$$U \cong \frac{U_b}{4,6n^4}, \text{ або } \lim_{n \rightarrow \infty} U = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{U_b}{4,6n^4} = 0. \quad (2.13)$$

Отже, із зростанням кількості “ n ” прогонів балки жорсткості до нескінченності, енергія деформації такої балки зменшується до нуля, тобто балка перетворюється у жорсткий стержень на жорсткій основі, в якому відсутні деформації згину (рис. 2.18). Встановлено [20], що маса прогону балки на двох опорах під час трансформації її в нерозрізну балку на проміжних пружних опорах (верхній пояс комбінованих ферм) інтенсивно зменшується за невеликої кількості прогонів, тобто малих значень “ n ”.

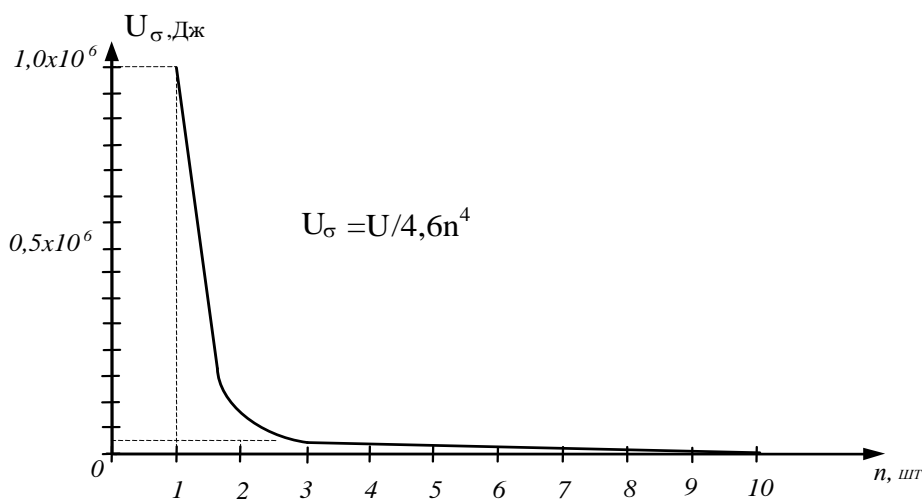


Рис. 2.18. Залежність потенційної енергії деформації балки U_σ , при перетворенні в нерозрізну, від кількості її прогонів n

На основі цього, можна зробити висновок, що раціональною буде комбінована ферма з кількістю панелей верхнього поясу шість на рис. 2.17, г, верхній пояс якої має тільки п'ять проміжних опор, а ферми на інших схемах – більше, мають сім і дев'ять опор. У разі більшої кількості таких опор маса балки зменшується повільно, тоді як кожна нова опора збільшує пропорційно масу підкріплювальної системи і додає до вартості конструкції та збільшує трудомісткість виготовлення і монтажу.

Отже, така ферма (рис. 2.17, г) є малоелементною, з концентрацією основної маси системи в балці жорсткості – верхньому поясі, тобто вона є раціональною, технологічною конструкцією, яка має мінімальні витрати матеріалів, мінімальні затрати праці і часу на її виготовлення.

2.6.6. Визначення раціональної кількості опор балки жорсткості комбінованої ферми. Дослідження раціональної топології комбінованої ферми безпосередньо пов'язано з їх ефективністю, тобто забезпечує мінімальні витрати сталі. Одною із складових раціональної топології є визначення кількості опор балки жорсткості комбінованої ферми, наприклад для 30 м ферми (рис. 2.19; 2.20).

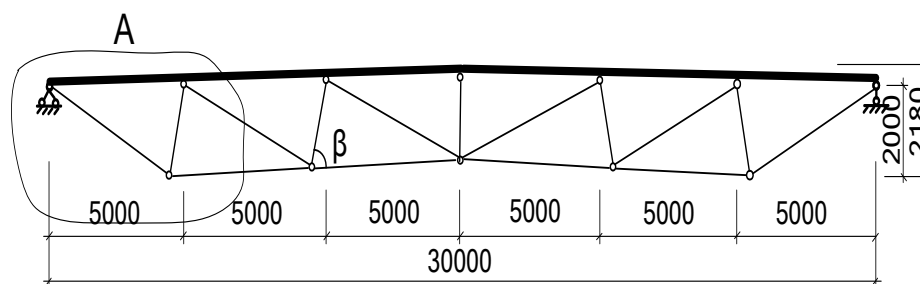


Рис. 2.19. Схема 6 – панельної ферми;

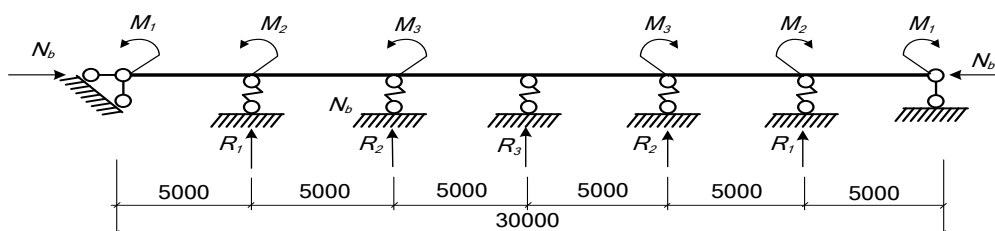


Рис. 2.20. Схема узагальненої розрахункової моделі балки жорсткості

Також, в праці [20], на основі енергетичних принципів будівельної механіки одержано функціональну залежність між енергією деформації U_0 при згині звичайної балки і енергією деформації U при згині нерозрізної балки жорсткості на проміжних пружних опорах з рівноекстремальною епюрою M_x , яка моделює верхній пояс комбінованих ферм, і кількістю її прогонів n (без врахування енергії опор) - (2.13).

Отже, із зростанням кількості “ n ” прогонів балки жорсткості (що відповідає $n-1$ кількості її підкріплень шпренгельної системи) до нескінченності, енергія деформації такої балки прямує до нуля, тобто балка перетворюється у жорсткий стержень, в якому відсутні деформації згину (рис. 2.18).

Встановлено [20], що маса прогону балки на двох опорах під час трансформації її в нерозрізну балку на проміжних пружних опорах (верхній пояс комбінованих ферм) інтенсивно зменшується за невеликої кількості прогонів, тобто малих значень “ n ”.

На основі цього, можна зробити висновок, що раціональною буде комбінована ферма з кількістю панелей верхнього поясу шість на рис. 2.17, г,

верхній пояс якої має тільки п'ять проміжних опор, а ферми на інших схемах – більше, мають сім і дев'ять опор. У разі більшої кількості таких опор маса балки зменшується повільно, тоді як кожна нова опора збільшує пропорційно масу підкріплювальної системи і додає до вартості конструкції та збільшує трудомісткість виготовлення і монтажу.

Отже, така ферма (рис. 2.17, г) є малоелементною, з концентрацією основної маси системи в балці жорсткості – верхньому поясі, тобто вона є раціональною, технологічною конструкцією, яка має мінімальні витрати матеріалів, мінімальні затрати праці і часу на її виготовлення.

2.6.7. Визначення раціональної розрахункової схеми комбінованої ферми. Одним з визначальних показників ефективності цих конструкцій залишається витрата матеріалу, який витрачається на створення елементів і вузлів з'єднань. Центральне місце у вирішенні цієї проблеми займають дослідження по вдосконаленню конструктивних форм і методів їх розрахунку [4, 13, 17-24].

За основними техніко-економічними показниками комбіновані ферми виявляються більш ефективними в порівнянні з типовими фермами з паралельними поясами [117, 118]. Комбіновані сталеві ферми, як один з видів таких систем, володіють наступними перевагами порівняно з традиційними фермами, основними з яких є: досить велика жорсткість верхнього поясу, що дозволяє працювати на місцевий вигин, завдяки чому розміщення прогонів не пов'язане з вузлами ферми; порівняно невелика кількість елементів ферми; простота вузлових з'єднань. При проектуванні несучих комбінованих сталевих ферм потрібно враховувати як параметричні, так і структурні властивості конструкції, такі як геометричні форми, взаємне розташування елементів, їх розміри і тип поперечних перетинів. Це дозволяє ефективно розміщувати матеріал, отже і знизити масу конструкції в цілому [18].

На даний час, в галузі проектування та розрахунку будівельних конструкцій з використанням персональних комп'ютерів, є можливість

приймати такі розрахункові схеми, які значно більшою мірою відповідають дійсній роботі конструкцій та споруди. Тепер немає потреби спрощувати розрахункові схеми. Цілий ряд найскладніших конструкцій, розрахунок яких раніше був неможливий, став доступним із застосуванням комп'ютера, в тому числі і в раціоналізації та оптимізації появились нові можливості.

Розрахунок типових - статично визначених ферм (рис. 2.21, в), визначення внутрішніх зусиль в їх елементах, відповідно ДБН [30] проводиться приблизним методом, тобто в розрахунковій схемі приймається, що всі елементи в кожному вузлі з'єднані між собою шарнірно. Це дає змогу враховувати тільки нормальні сили (відсутні моменти). Основною перевагою цього методу є його простота.

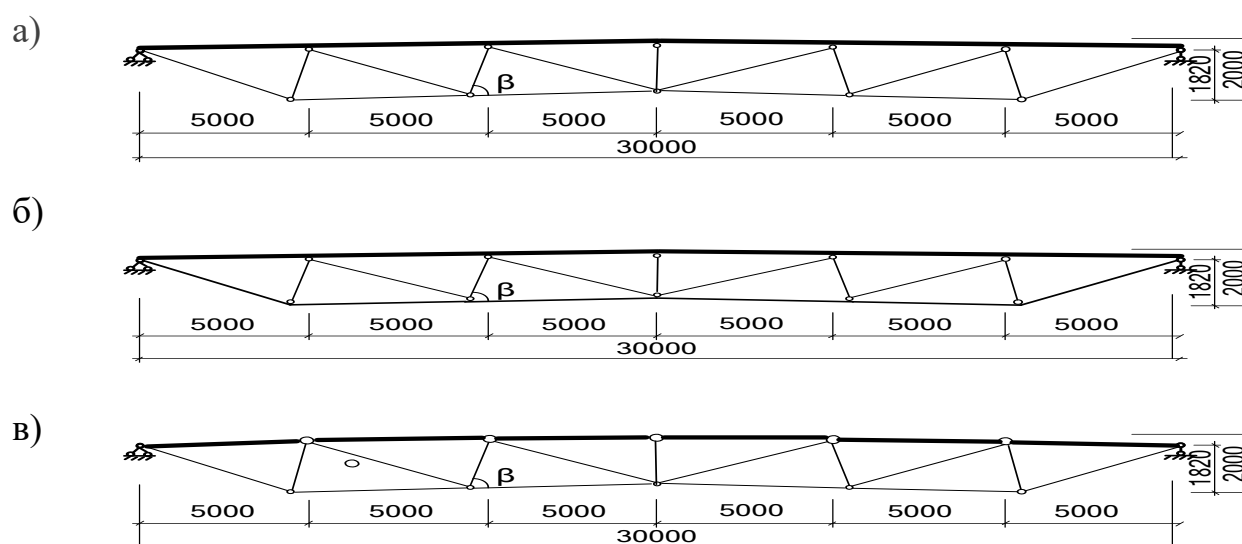


Рис. 2.21. Розрахункові схеми раціональних комбінованих ферм прольотом 30 м: а, б – статично невизначених; в – статично визначених

Ми пропонуємо для комбінованих ферм – статично-невизначених [2], більш точніший метод, але складніший в розрахунку і аналізу результатів, що призводить до більш реальних напружень, який в розрахунковій схемі передбачає нерозрізність (суцільність) верхнього і нижнього поясів, а розкоси і стояки з'єднані з поясами шарнірно. При цьому, в стояках і розкосах визначається нормальні сили, а в фланцях – ще додатково моменти (рис. 2.21,

б, в). Даний метод в більшій мірі відповідає дійсній роботі ферм, що забезпечить підвищення їх надійності.

Для комбінованих ферм найбільш раціонально використовувати розрахункові схеми, що наведені на рис. 2.21 а, б: на рис. 2.21, а показано нерозрізний верхній пояс і всі вузли шарнірні; на рис. 2.21, б - нерозрізний верхній і нижній пояси, а під'єднання решітки до них шарнірне. Схема (рис. 2.21, в) характерна для статично визначених ферм, тобто традиційних, типових: з'єднання у всіх вузлах шарнірне, навіть у верхньому поясі.

З метою оцінки ефективності наведених розрахункових схем (рис. 2.21) проведений числовий експеримент для комбінованої сталеві ферми прольотом 30 м. Такі, раціональні комбіновані сталеві ферми прольотом 30 м (рис. 2.21), при однакових геометричних параметрах і поперечних перерізах елементів, тобто однакової маси ферм, але з різними розрахунковими схемами було розраховано на ПК з програмою «LIRA-CAD 2016 R5» від рівномірно розподіленого навантаження $q = 12,75 \text{ кН / м}$, при куті нахилу стиснутих стрижнів $\beta = 80^\circ$. За цими результатами одержані епюри моментів (рис. б) і нормальних сил (рис. 2.22).

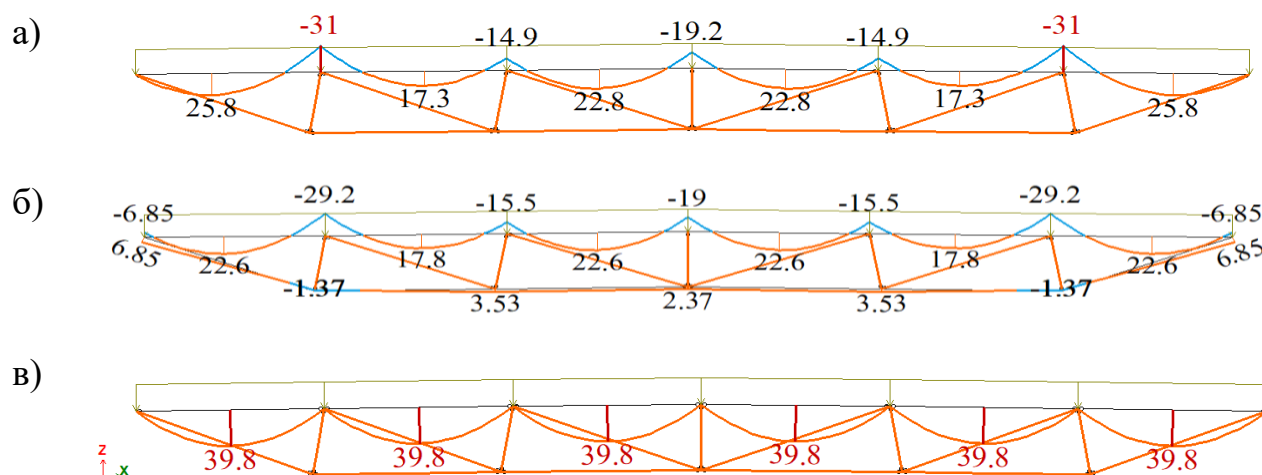


Рис. 2.22. Епюри моментів (кНм) в балці жорсткості раціональних комбінованих фермах прольотом 30 м: а, б – статично невизначених; в – статично визначеній

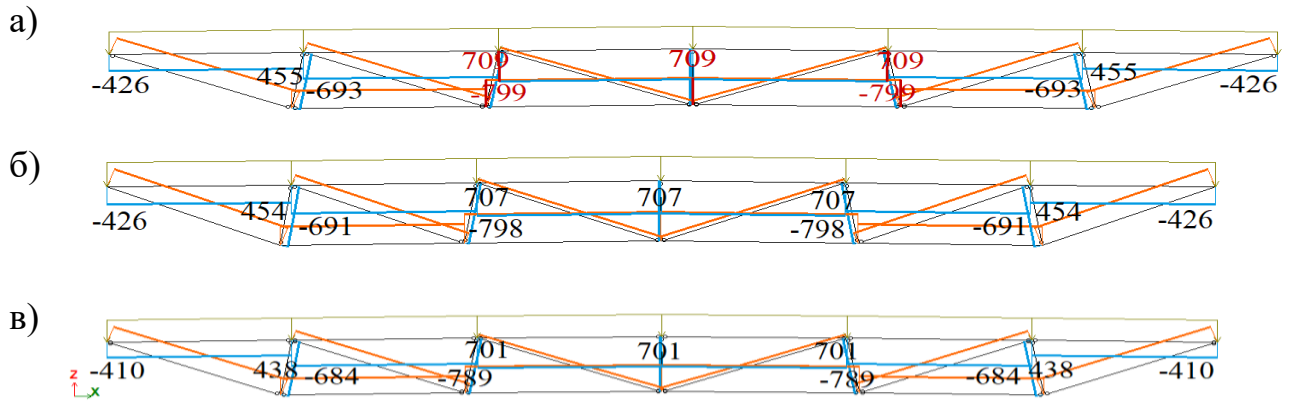


Рис. 2.23. Епюри нормальних сил (кН) в раціональних комбінованих фермах прольотом 30 м: а, б – статично невизначених; в – статично визначеної

За результатами розрахунків, найбільші величини згинаючих моментів в балці жорсткості для ферми із шарнірним з'єднанням у всіх вузлах (рис. 2.22, в) і вони рівні 39,8 кНм, а в фермі з нерозрізним верхнім поясом і з'єднанням у всіх вузлах шарнірним (рис. 2.22, а) - 31,0 кНм, що на 28,4 % більше. В фермі з нерозрізним верхнім і нижнім поясами, а під'єднання решітки до них шарнірне (рис. 2.22, б) вони ще менші і рівні 29,2 кНм, що в свою чергу, порівняно з фермою (рис. 2.22, а) менші на 5,8 %. Нормальні сили (рис. 2.23) для всіх трьох комбінованих ферм практично не відрізняються.

Отже, за результатами числового експерименту для комбінованих сталевих ферм прогоном 30 м, найбільш ефективною їх розрахунковою схемою є схема з нерозрізним верхнім і нижнім поясами і шарнірним під'єднанням решітки, що зменшує згинаючі моменти до 34,2 % і значно підвищує ефективність ферми.

Це підтверджує те, що в статично-невизначених комбінованих фермах виникають менші внутрішні зусилля, що визначає їх економічність порівняно з статично-визначуваними. З цим пов'язані додаткові можливості регулювання НДС стану в таких фермах.

Отже, більш раціонально використовувати розрахункові схеми статично-невизначених комбінованих ферм з нерозрізними верхнім і нижніми поясами.

2.6.8. Оцінка ефективності використання підвищених марок сталі в розтягнутих елементах решітки комбінованих ферм. Важливим елементом підвищення ефективності сталевих комбінованих ферм є раціональне використання в них сталей підвищеної міцності. Так, шведська фірма SSAB [111] виготовляє крокв'яні ферми, елементи верхнього і нижнього поясів із сталі підвищеної міцності - S420 [30], а елементи решітки із традиційної сталі – S355 (рис. 2.24).

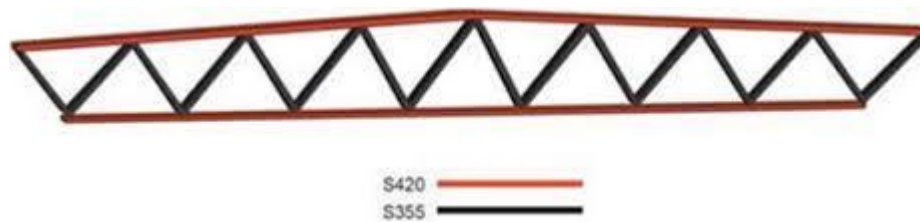


Рис. 2.24. Конструкція крокв'яної ферми фірми SSAB

По даним дослідження [116], для трубчастих ферм прольотом 36 м при навантаженні 47,0 кН/м, масу ферм з елементами сталі марки S500 верхнього і нижнього поясів можна зменшити до 84 % - 87 % порівняно з фермами із сталі S355 і відповідно для сталі S700 до 61 % - 69 %.

Звідси можна зробити висновок, що гібридна конструкція ферм – з різних марок сталі, особливо для ферм з великим прольотом, виявляється найбільш рентабельним рішенням. В будівельних нормах України [30] також рекомендується використовувати при проектуванні сталевих крокв'яних ферм марки сталей підвищеної міцності S345 замість S255, але тільки в поясах і опорних розкосах. Отже, використання підвищених марок сталі в розтягнутих елементах решітки ферм не досліджувалось і відповідно не має таких рекомендацій, а це може значно підвищити ефективність ферм.

Отже, створюючи раціональні конструктивні комбіновані системи (наприклад, ферми), критеріями раціональності (ефективності) очевидно будуть:

- регулювання напружено-деформованого стану (НДС) розрахунковим методом;
- забезпечення рівномірного напруженого стану в розрахункових перерізах балки жорсткості;
- концентрація матеріалу в основному елементі (балці жорсткості);
- малоелементність і технологічність конструкцій, застосування прокату з підвищеними механічними властивостями.

Запропоновано використовувати високоміцну сталь для розкосів ферми.

2.7. Сталева комбінована ферма з раціональними параметрами прольотом 30 м

В основу структурно-параметричного синтезу комбінованої сталеві ферми була поставлена задача створити раціональну малоелементну шпренгельну сталеву ферму, яка дозволила б знизити металомісткість та трудомісткість виготовлення ферми за рахунок спрощення конструктивної схеми, більш раціональної роботи, зменшення кількості елементів та вузлів, що в загальному підвищує надійність роботи такої конструкції.

За результатами попередніх досліджень структурно-параметричного синтезу комбінованої сталеві ферми прольотом 30 м – раціональна кроквяна сталеві ферма –патент України [53], яка складається з жорсткого верхнього поясу із гнутозварного профілю прямокутного перерізу, з'єднаного до нього ламаного нижнього поясу з ухилом верхнього та нижнього поясів 1.5%, стійок, розкосів, з'єднаних із верхнім та нижнім поясами, та містить стійки розташовані під кутом 80°, а розкоси виконані із високоміцних арматурних стрижнів, які утворюють N-подібну решітку, яка прикріплена до верхнього та нижнього поясів шарнірно, а маса верхнього поясу становить половину загальної маси конструкції, кількість панелей рівна шести, а проміжних опор – п'яти (рис. 2.25).

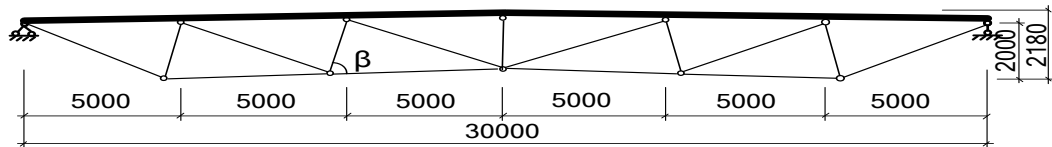


Рис. 2.25. Схема раціональної кроквяної сталеві ферми прольотом 30 м

Це дозволяє знизити металомісткість та трудомісткість виготовлення ферми за рахунок спрощення конструктивної схеми, більш раціональної роботи, зменшення кількості елементів та вузлів, що в загальному підвищує надійність роботи такої конструкції.

Найбільш близькою до запропонованого рішення є типові по ДСТУ шпренгельні ферми кроквяні сталеві із гнотозварних профілів прямокутного перерізу, з ухилом верхнього та нижнього поясів 1,5 %, які призначаються для улаштування покриттів виробничих та цивільних будівель [35]. Ферми виготовляються заввишки 2000 мм для прогонів будівель 18 м, 24 м та 30 м. Всі вузли ферми є шарнірними.

У даному технічному рішенні відзначається підвищена металомісткість та трудомісткість виготовлення, які викликані великою кількістю елементів і вузлів та, відповідно, кількістю технологічних процесів, що в загальному понижуює надійність роботи такої конструкції.

Розташування елементів раціональної кроквяної сталеві ферми показано на рис. 2.26, відповідно до типів елементів та їх поперечного перерізу, перелік яких наведено у таблиці для погонного навантаження $q = 12,75$ кН/м (див. табл. 2.7).

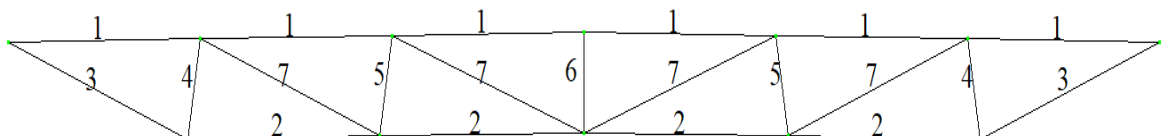


Рис. 2.26. Елементи раціональної кроквяної сталеві ферми: 1 – жорсткий верхній пояс; 2,3 – ламаний нижній пояс; 4,5,6 – стійки; 7 – розкоси.

Таблиця 2.7

Специфікація елементів раціональної комбінованої ферми прольотом 30 м

№	Тип елементу	Сталь	Переріз	Маса, кг
1	Верхній пояс	C345	□200x7	1233,1
2	Нижній пояс	C345	□100x7	394,8
3	Нижній пояс	C345	□100x4	117,2
4	Стійки	C255	□80x3	26,2
5	Стійки	C255	□60x3	19,2
6	Стійки	C255	□50x3	7,7
7	Розкоси	C390	●ø42	223,9
Кількість елементів 21 шт, довжина зварних швів – 19,8 м				
			Загальна маса:	2022,1 кг

Порівняння ефективності такої ферми із фермою по ДСТУ наведено у табл 2.8.

Таблиця 2.8

Ефективність ферм

Показник	Од. вим.	Ферма за ДСТУ	Раціональна ферма
Вартість сталі	грн	61 973	53 795
Вартість робіт	грн	12 865	8 806
Загальна вартість	грн	74 838	62 601
Маса ферми	кг	2455,5	2022,1
Довжина зварних швів	м	39,2	19,8
Кількість елементів	шт	41	21
Кількість вузлів	шт	23	12
Максимальне напруження	%	84,7	99,0
Мінімальне напруження	%	0,2	20,2
Витрати енергії	кВт·год	1102	862
Викиди CO ₂	т	0,431	0,354

Як видно із табл. 2.8, раціональна комбінована ферма має зменшені: витрату сталі, вартість робіт, масу ферми, кількість елементів, кількість вузлів, а також витрату енергії при виготовленні та викиди діоксиду вуглецю.

Раціональної кроквяна сталева ферма може бути виконана довжиною 18 м та 24 м, при чому ферма довжиною 18 м містить чотири панелі та три

проміжні опори (рис. 2.28), а у фермі довжиною 24 м – довжина панелі 4000 мм (рис. 2.27).

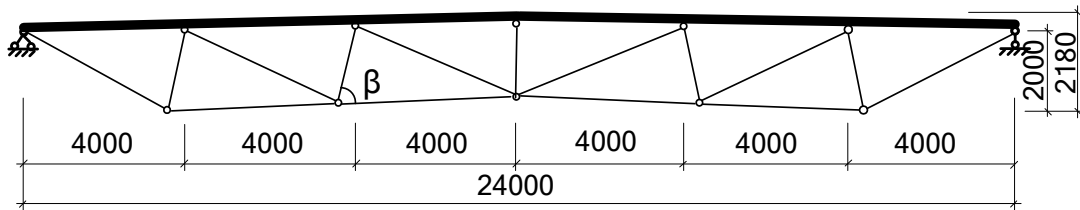


Рис. 2.27. Схема раціональної кроквяної сталеві ферми прольотом 24 м

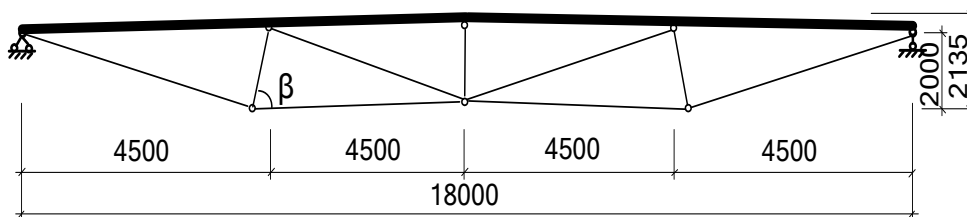


Рис. 2.28. Схема раціональної кроквяної сталеві ферми прольотом 18 м

Висновки до розділу

1. Сформульовано умови удосконалення конструктивних форм сталевих ферм: перша - пошук раціональної геометричної форми конструкції; друга - пошук раціонального розподілу матеріалу в конструкції з незмінною геометрією.

2. Зроблено висновок, що для розробки нових раціональних конструктивних форм сталевих ферм потрібно використати принцип заміни традиційних ферм на комбіновані.

3. Одержані умови для конструювання нової раціональної конструктивної форми комбінованої сталеві ферми (мінімальної маси) за геометричними параметрами (обрис ферми) і фізичними (розподіл матеріалу між елементами ферми).

4. Запропоновано критерій раціональності комбінованої конструкції - одночасне досягнення напруженнями розрахункового опору матеріалу балки

жорсткості в розрахункових перетинах балки жорсткості для основного навантаження.

5. Наведені узагальнюючі принципи (мінімізація витрат матеріалу і принцип мінімальних технологічних витрат) формоутворення нових конструктивних комбінованих систем – ферм і особливості їх використання.

6. Досліджено і одержано раціональні параметри комбінованих сталевих ферм прольотом 30 м: вибрано раціональну топологію - шпренгельна ферма з паралельними поясами - тип ферм Пратта з решіткою (N – truss) і обпиранням на верхній пояс; співвідношення маси балки жорсткості комбінованої ферми до загальної маси ферми рівне 50%; кут нахилу фермових стійок 79° - 82° ; ферма з кількістю панелей верхнього поясу шість, а верхній пояс якої має тільки п'ять проміжних опор; розрахункова схема - нерозрізний верхній і нижній пояси і шарнірним під'єднанням решітки; високоміцна сталь для розкосів.

7. За результатами структурно-параметричного синтезу комбінованої сталеві ферми прольотом 30 м по критерію мінімуму маси одержана раціональна кроквяна сталева ферма, яка складається з жорсткого верхнього поясу із гнутозварного профілю прямокутного перерізу, з'єднаного до нього ламаного нижнього поясу з ухилом верхнього та нижнього поясів 1.5%, стійок, розкосів, з'єднаних із верхнім та нижнім поясами, яка відрізняється тим, що містить стійки розташовані під кутом 80° , а розкоси виконані із високоміцних арматурних стрижнів, які утворюють N-подібну решітку, яка прикріплена до верхнього та нижнього поясів шарнірно, а маса верхнього поясу становить половину загальної маси конструкції, кількість панелей рівна шести, а проміжних опор – п'яти.

РОЗДІЛ 3

ВИБІР РАЦІОНАЛЬНИХ МЕТОДІВ РОЗРАХУНКОВОГО РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ (НДС) В КОМБІНОВАНИЙ СТАЛЕВІЙ ФЕРМІ

3.1. Розрахункові методи регулювання НДС як основа для підвищення ефективності комбінованих ферм

При проектуванні будівельних конструкцій серед низки задач, що постає перед інженером, основна є одержання рівномірної конструкції, тобто такої найбільш системи, що буде найбільш раціональною. Виходячи з цього, проблема раціонального проектування повинна ставитись на перше місце при розрахунку будівельних конструкцій, зокрема, комбінованих. Досвід застосування раціональних сталевих конструкцій покриття показав їх безумовні переваги, що особливо проявляються в комбінованих конструкціях (балкових, шпренгельних, фермових, висячих та вантових) [18].

Особливий клас задач по підвищенню ефективності сталевих комбінованих конструкцій складають задачі раціонального проектування, регулювання і управління конструктивними параметрами елементів. Завдання проектування конструкцій ставиться як проблема раціоналізації цільової функції - обсягу, ваги, вартості при обмеженнях за міцністю, жорсткістю, стійкістю та конструктивних вимог. Раціональне проектування дозволило змінити підхід до вирішення задачі щодо призначення параметрів перерізів. На зміну розрахунку кількох варіантів з подальшим їх порівнянням та вибором кращого прийшли методи, орієнтовані на широкі можливості сучасної обчислювальної техніки. Отримані раціональні рішення призводять до суттєвої економії матеріалу залишаючись при цьому легко здійсненними на практиці [18]. Звідси, узагальнювальним принципом формоутворення таких раціональних конструктивних систем є те, що ці системи повинні бути

комбінованими і мати якомога менше елементів та вузлів їх з'єднання [20]. В якості критерія раціональності виступає енергетичний критерій раціонального проектування [21], а також вимоги до НДС: рівнонапруженість, рівномоментність, максимальна жорсткість, або мінімальна маса конструкції.

Отже, створюючи раціональні конструктивні комбіновані системи (наприклад, ферми), критеріями раціональності (ефективності) очевидно будуть:

- регулювання напружено-деформованого стану (НДС) розрахунковим методом;
- забезпечення рівномірного напруженого стану в розрахункових перерізах балки жорсткості;
- концентрація матеріалу в основному елементі (балці жорсткості);
- малоелементність і технологічність конструкцій, застосування прокату з підвищеними механічними властивостями

Метою методу розрахункового регулювання НДС в сталевих комбінованих фермах є одержання рівних нормальних напружень у розрахункових перерізах балки жорсткості ферми по її довжині. Тобто, регулювання НДС проводиться на стадії проектування ферми, а не на стадії виготовлення, монтажу чи експлуатації.

Отже, проектування сталевих комбінованих ферм, з розрахунковим регулюванням НДС не відрізнятиметься від проектування звичайних сталевих ферм. В сам процес розрахунку таких ферм входить як складова частина розрахункове регулювання НДС, що не вимагає ніяких додаткових матеріальних витрат. В процесі збільшення зовнішнього навантаження в ній відбувається раціональний розподіл внутрішніх зусиль між елементами з одержанням наперед заданого НДС, який ми передбачили. Це забезпечує раціональне формування НДС в перетинах конструкції – тобто, рівноміцність всіх елементів.

На сьогодні розрахунковий метод регулюванням їх напружено-деформованого стану використовується обмежено і потребує подальшого розвитку з врахуванням наближення його до практичного попиту.

Для раціонального регулювання НДС в балці жорсткості комбінованої ферми необхідно створення якомога більшої кількості рівномічних перерізів, а це вимагає частішого розміщення стержнів решітки, що зумовить збільшення їх маси.

Алгоритм розрахункового регулювання НДС в сталевих комбінованих фермах наступний. Представим алгоритм на прикладі сталевій комбінованої ферми прольотом 30 м. Розрахунок такої ферми складається з двох етапів. На першому етапі проектуємо раціональну ферму, а на другому вводимо конструктивні зміни в розрахункову схему ферми і з новою конструктивною схемою проводимо розрахунок її як статично невизначену конструкцію.

Перший етап.

На першому етапі вхідні дані по цьому алгоритму задаються в такій послідовності:

1. Величина навантаження " q ".
2. Прогін конструкції " l ".
3. Клас сталі " C ".
4. Допустимий з умов експлуатації нормативний прогин f ферми залежно від величини прольоту " l ".
5. Коефіцієнт надійності за навантаженням " γ_f " і призначенням " γ_n ".
6. Коефіцієнт умов роботи елементів " γ_c ".
7. Величина " EF " перерізу балки жорсткості.
8. Визначаємо геометричну схему комбінованої ферми:
9. Вибір раціональної топології комбінованої ферми – тип ферми – шпренгельна.
10. Аналіз раціонального типу решітки в комбінованій фермі – найбільш раціональними з точки зору мінімізації витрат сталі, а також витрат на

виготовлення та монтаж, є наступна конструктивна форма ферм: Пратта (N – ферма).

11. Пошук раціонального співвідношення маси балки жорсткості до маси всієї ферми – рівне 50 %.
12. Визначення раціональних кутів нахилу стиснутих стержнів решітки сталевій комбінованій ферми - приблизно 80° .
13. Пошук раціональної кількості панелей верхнього поясу 30 м комбінованій ферми – шість.
14. Визначення раціональної кількості опор балки жорсткості комбінованій 30 м ферми – п'ять.
15. Визначення раціональної розрахункової схеми комбінованій 30 м ферми – верхній і нижній пояси – нерозрізні, а приєднання стоек – шарнірне.
16. Оцінка ефективності використання підвищених марок сталі в розтягнутих елементах решітки комбінованих ферм – ефективно використовувати високоміцну сталь для розкосів ферми.

На основі цього **отримали раціональну конструктивну форму** комбінованій сталевій ферми прольотом 30 м за геометричними параметрами (рис.3.1).

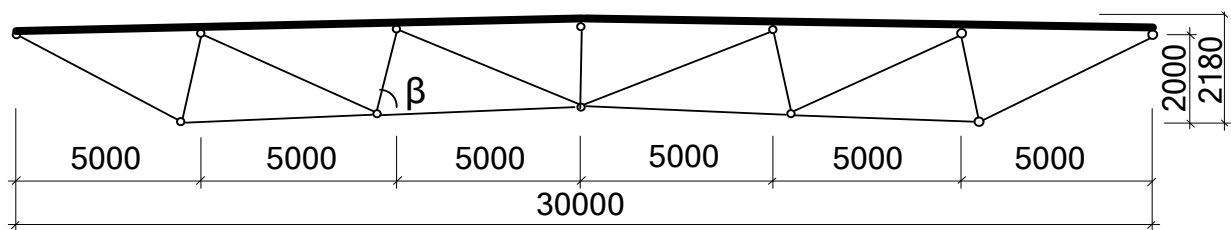


Рис.3.1 Геометрична схема раціональної сталевій комбінованій ферми

17. Розрахунок цієї ферми (наприклад на ПК програмі "LIRA-CAD 2016 R5, або інших) як статично невизначеної системи.
18. По даних розрахунку підбір поперечних перерізів.

Отримавши **раціональну конструктивну форму** комбінованій сталевій ферми за **геометричними параметрами** (рис.3.1), ми ще не досягнули її за

критеріями раціональності - рівність напружень у всіх розрахункових перерізах балки жорсткості, **тобто ми не виконали раціональне проектування** (рис. 3.2).

Отже, з метою вирівнювання напружень у розрахункових перерізах верхнього поясу комбінованої ферми необхідно зменшити напруження в середніх панелях, а в крайніх збільшити.

Ми рекомендуємо кілька варіантів регулювання НДС (рис. 3.2, рис. 3.3). **Основний метод (перший)** розрахункового регулювання НДС в балці жорсткості **раціональної комбінованої ферми** є створення опорних моментів на крайніх опорах, які протилежні дії від зовнішнього навантаження (рис. 3.2). Змінний параметр – величина розрахункового ексцентриситету для створення опорного моменту.

Другий метод – змінний параметр - зміна поперечних перерізів розкосів, стійок і нижнього поясу (раціональне співвідношення маси балки жорсткості до всієї маси ферми – 50%).

Раціональний підбір поперечних перерізів середніх розкосів, дозволив фактично зрівноважити моменти на другій проміжній опорі та у центральних прольотах.

Третій метод - спеціальне створення ексцентриситету у вузлах примикання системи підвіски до балки жорсткості (рис. 3.2). Змінний параметр – величини ексцентриситету.

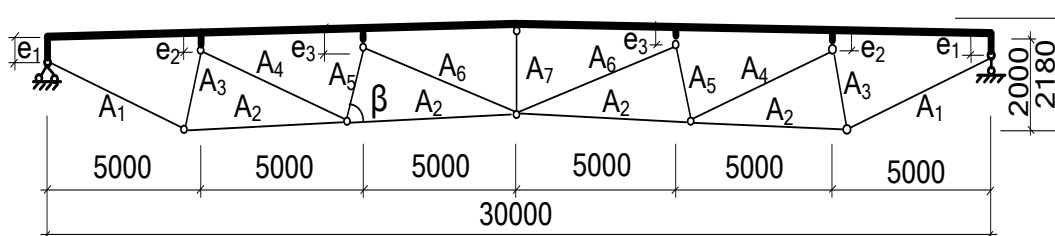


Рис. 3.2. Регулювання НДС в балці жорсткості 30 м комбінованої ферми опорними ексцентриситетами (e_1) та вузловими (e_2 , e_3)

Четвертий метод – зміна довжин панелей верхнього поясу (наприклад, 5200 мм, 5000 мм і 4800 мм, рис. 3.3). Зміну довжин панелей проводиться з метою

зменшення згинальних моментів в середніх панелях цього поясу (балки жорсткості) ферми.

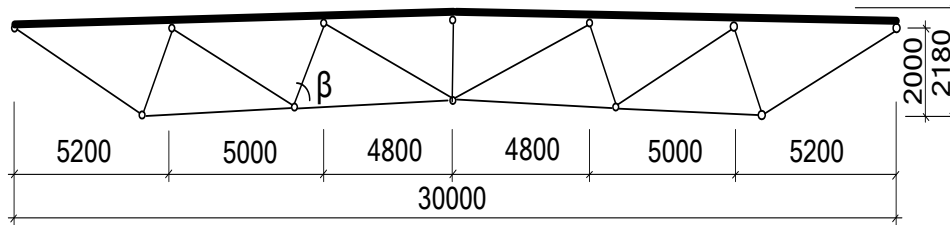


Рис. 3.3. Схема ферми з регулюванням НДС зміною довжини панелей верхнього поясу

Другий етап (ітераційний процес)

19. Раціональне проектування (досягнення максимальних нормальних напружень в розрахункових перерізах балки жорсткості і вирівнювання між собою. Для цього використаєм один, або кілька із запропонованих розрахункових методів регулювання НДС.
20. На кожній розрахунковій ітерації маємо нову розрахункову схему.
21. Перераховуємо нову базову розрахункову схему (наприклад на ПК програмі "LIRA-CAD 2016 R5, або інших) як статично невизначеної системи.
22. Для нової розрахункової схеми знаходимо змінені (покращені) напруження.
23. Повторюємо кроки 19-22 до «стабілізації» максимального вирівнювання напружень балці жорсткості. Тобто, коли зміни напружень стають достатньо малими - одержали раціональну конструкцію, або близьку до неї, значить геометрія вже «підлаштувалася» під прикладене навантаження та регулювання і напруження практично більше не змінюються.

Таким чином, запропонований алгоритм раціонального проектування з використанням розрахункових методів регулювання НДС в сталевих комбінованих фермах дає змогу розраховувати такі конструкції з забезпеченням рівномірного напруженого стану в розрахункових перерізах балки жорсткості і досягненням суттєвої економії матеріалу, залишаючись при

цьому легко здійсненними на практиці, що і відповідає вимогам практики проектування сталевих конструкцій.

3.2. Регулювання НДС в 30 м сталевій комбінованій фермі зміною опорних ексцентриситетів

Одним з основних шляхів підвищення ефективності та економії сталі в будівництві є вдосконалення конструктивних форм будівельних сталевих конструкцій за рахунок розробки та впровадження у виробництво ефективних рішень конструкцій масового застосування. Відомо, що маса кроквяних конструкцій визначається не тільки діючими навантаженнями, а й значною мірою характером конструктивного рішення [21]. Особливо ефективними визнані легкі металеві конструкції [21].

Мета дослідження — розвиток нових конструктивних рішень комбінованих ферм для їх поліпшення та створення нових із пониженими витрати сталі і спрощеною технологічністю виготовлення з урахуванням дійсного розподілу внутрішніх зусиль з метою наближення несучої здатності на згин до епюри внутрішніх зусиль. Відмінною особливістю комбінованих ферм є регулювання зусиль у балці жорсткості для зменшення епюри моментів. Аналіз існуючого досвіду проектування і будівництва показав, що порівняно з балковими і рамними конструкціями, комбіновані фермові системи мають високу ефективність [18].

Для підвищення ефективності роботи сталевих комбінованих ферм, окрім раціонального проектування, доцільно виконувати регулювання напружено деформованого стану (НДС) у верхньому поясі (балці жорсткості) [21]. Проблема їх раціонального проектування насамперед повинна ставитись як комплексна проблема: пошук раціональних параметрів; розрахунку на основі методу декомпозиції системи; врахування деформованого стану балки жорсткості; регулювання НДС розрахунковим методом [21]. Раціональне проектування, яке, на відміну від оптимального, не передбачає існування будь-

якого цільового функціоналу, а виражається в евристичних вимогах до НДС конструкції (рівноміцність, рівнонапруженість, рівномоментність, максимальна жорсткість або мінімальна маса), що гарантує поліпшення її якостей найбільш природним міцністю. При цьому несуча здатність конструкції використовується найповніше.

Основною перевагою комбінованих конструкцій є концентрація матеріалу у верхньому поясі (балці жорсткості), маса якої складає близько 60 - 80% від маси конструкції, а також проектування їх малоелементними. Від умов проектування і металоємності якої – значною мірою залежать техніко-економічні показники усєї системи. За рахунок зменшення кількості вузлів та елементів зменшується кількість необхідних операцій та час виготовлення конструкції.

В свою чергу, регулювання НДС в сталевих комбінованих конструкціях в процесі проектування, не вимагає ніяких додаткових матеріальних витрат. В процесі збільшення зовнішнього навантаження в конструкції відбувається попередньо розрахований раціональний перерозподіл внутрішніх зусиль між елементами.

Основна задача при проектуванні будівельних конструкцій є одержання рівноміцної конструкції, тобто найбільш раціональної системи.

Отже, створення конструкцій з меншими габаритами і матеріаломісткістю в порівнянні з існуючими аналогами, конкурентно здатних є актуальною задачею, яка пов'язана з досягненням найбільшої економії металу, зменшенням трудомісткості виготовлення та скороченням термінів монтажу.

В даний час в Україні одними з найпоширеніших є ферми сталеві кроквяні з гнутозварних профілів прямокутного перерізу при безфасонковому вирішенні вузлів [35]. Такі перерізи зручні для конструювання вузлів та прикріплення конструкцій, що примикають до ферм. Конструктивна форма таких ферм відноситься до типу Хоу (W – ферма).

Аналіз літературних джерел показав, що в спеціальній літературі недостатньо висвітлено проблему раціонального проектування комбінованих

сталевих ферм та відсутні дослідження щодо розрахункового регулювання НДС, які не дають повної картини, а наявний досвід недостатньо узагальнений [18].

Отже, для підвищення конструктивної ефективності сталевих комбінованих ферм необхідно використовувати переваги розрахункового методу регулювання НДС: малоелементність; концентрацію основної маси системи в балці жорсткості; врахування деформованого стану балки жорсткості на основі енерговаріаційного методу Лагранжа; виключення силових способів; забезпечення рівнонапруженого стану балки жорсткості тільки раціональним підбором жорсткостей елементів системи [21].

У попередніх дослідженнях [52, 53, 104-106, 118-122] було знайдено оптимальні фізичні (розподіл матеріалу між елементами ферми) та геометричні (обрис ферми) параметри раціональної комбінованої сталеві ферми (рис.3.4).

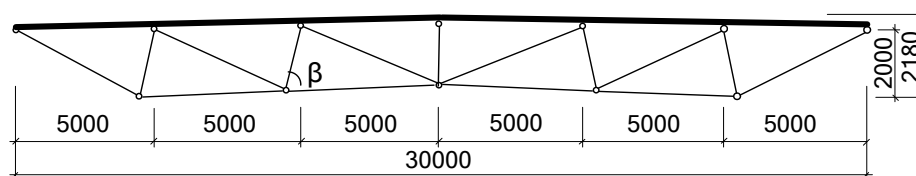


Рис. 3.4. Раціональна комбінована сталева ферма

Для ферми прольотом 30 метрів було прийнято висоту конструкції у 2 метри, що відповідає вимогам ДСТУ. При заданій топології (рис. 3.4) раціональна ферма складається з шести панелей верхнього поясу, а в типовій 10, що на 40 % більше і загальна кількість елементів типової ферми 39 [53], а в раціональній – 16, що на 59 % менше. Дослідження показали раціональний кут нахилу стійок у 80° , що збігається з результатами [127, 128].

Внутрішні зусилля в таких конструкціях суттєво відрізняються в фермах однакових обрисів, але з різними значеннями геометричних параметрів, що надає можливості створення такого розподілу зусиль, яке дозволило б запроектувати верхній пояс постійного перерізу з найбільш повним використанням його несучої спроможності в максимальній кількості перерізів.

Отримавши раціональну конструктивну форму комбінованої сталеві фермиза геометричними параметрами, ще не досягнули її за критеріями раціональності - рівність напружень у всіх характерних перерізах в балці жорсткості.

Тому для цього рекомендується різні розрахункові методи регулювання НДС в балці жорсткості. Оскільки регулювання НДС використовується для покращення якості комбінованих сталевих ферм, тоді його можна вважати частковою оптимізацією.

Основний метод (перший) розрахункового регулювання НДС в балці жорсткості **раціональної комбінованої ферми** є створення опорних моментів на крайніх опорах, які протилежні дії від зовнішнього навантаження (рис. 3.5). Для отримання необхідного розподілу згинальних моментів у балці жорсткості ферми використовується опорні моменти e_1 . Змінний параметр – величина розрахункового ексцентриситету e_1 для створення опорного моменту.

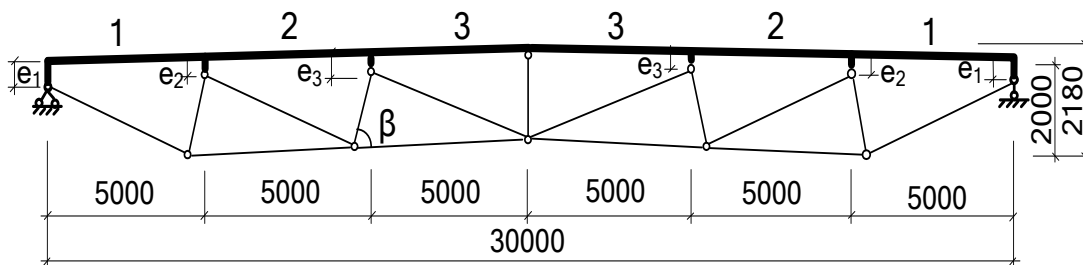


Рис. 3.5. Схема для регулювання НДС ферми опорним ексцентриситетом e_1 та вузловими ексцентриситетами e_2 і e_3 і нумерація панелей балки жорсткості

Задля перевірки ефективності та пошуку раціональних величин ексцентриситету були проведені числові дослідження такого методу регулювання.

Розрахункове регулювання має на меті досягнути стану наближеного до рівнонапруженого, тобто такого де різниця між максимальним і мінімальним напруженням близька до 0.

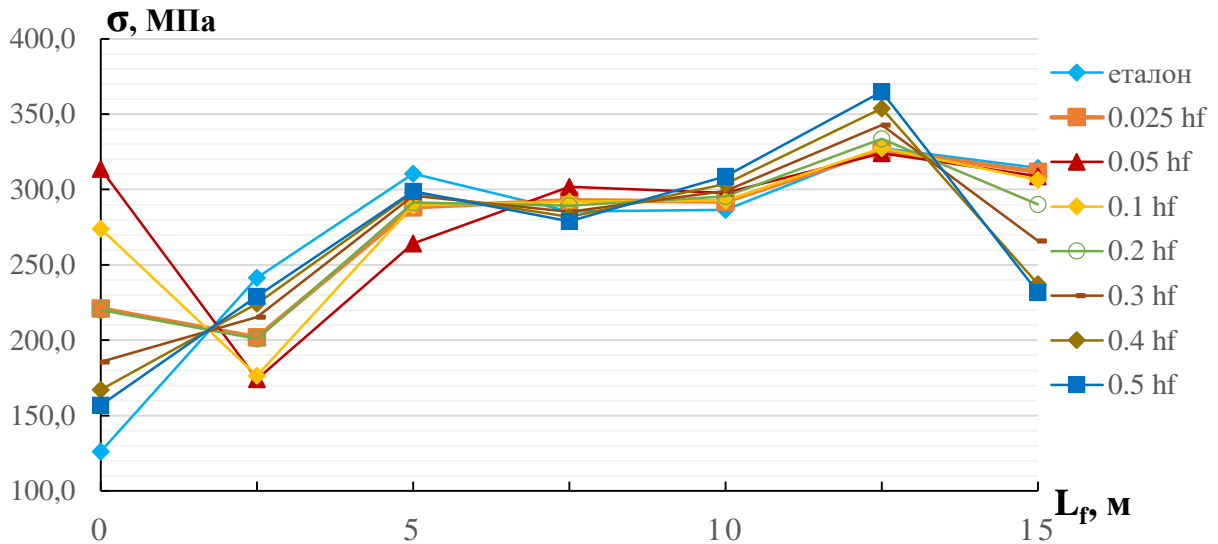


Рис. 3.6. Величини нормальних напружень в балці жорсткості при різних значення опорного ексцентриситету

Наприклад, надаємо результати числового експерименту розрахункового регулювання НДС в 30 - метровій фермі від дії рівномірно розподіленого навантаження $q = 18 \text{ кН/м}$. Розглянемо два випадки: перший - ексцентриситет e_1 більший за половину висоти балки жорсткості - h_b і він змінюється від $e_1 = 0.1$ до $0.5 h_f$ (h_f - висота ферми), крок зміни $0.1 h_f$. І другий - межах висоти балки жорсткості - $e_1 = 0.025 h_f$ та $e_1 = 0.05 h_f$. При симетричній фермі, розглядаємо лише її половину довжиною 15 м (рис. 3.6). Еталоном служить ферма, в якій $e_1 = e_2 = e_3 = 0$. Результати представлені на рис. 3.6.

Як видно із діаграми на рис. 3.6 найменший перепад напружень забезпечується при $e_1 = 0.025 h_f$, що найближче до рівнонапруженого стану.

Метою раціонального проектування є досягнення напружено-деформованого стану, де різниця між максимальним і мінімальним напруженням мінімальна (рис. 3.7). Отже, вирівнюючи напруження в панелях балки жорсткості, можна, наприклад, в панелі 3 зменшити максимальні напруження, а в панелі 1 - навпаки, збільшити їх.

Таким чином відбувається тенденція до їх вирівнювання. Наведемо різницю нормальних напружень (рис. 3.8) між дійсним і рівнонапруженим станом на основі даних з рис. 3.6.

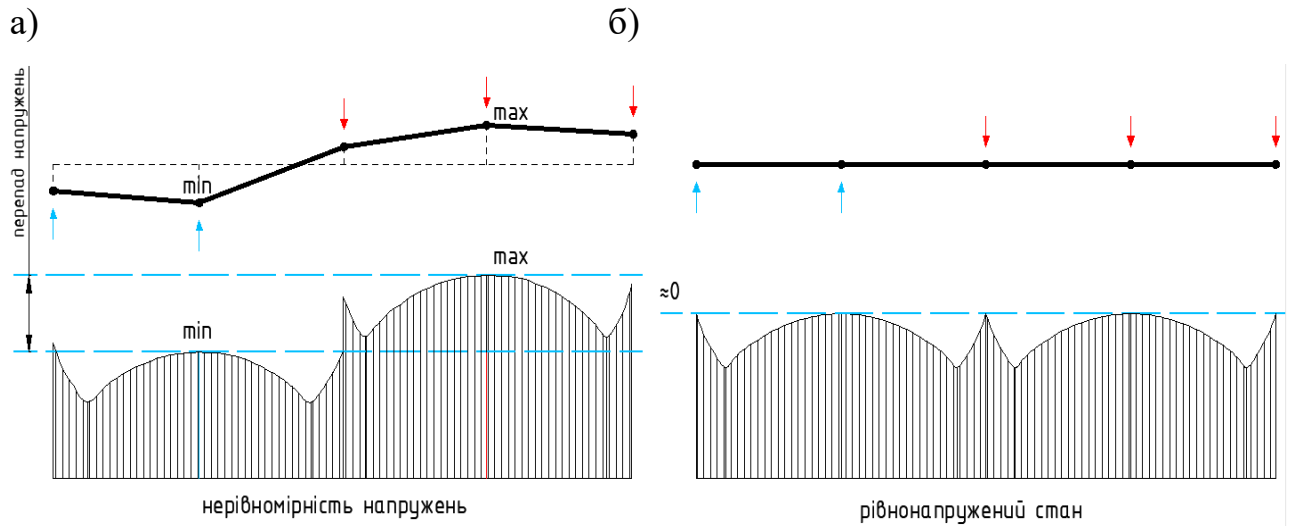


Рис. 3.7. Епюри напружень: а – при нерівномірності напружень; б – при рівнонапруженому стані

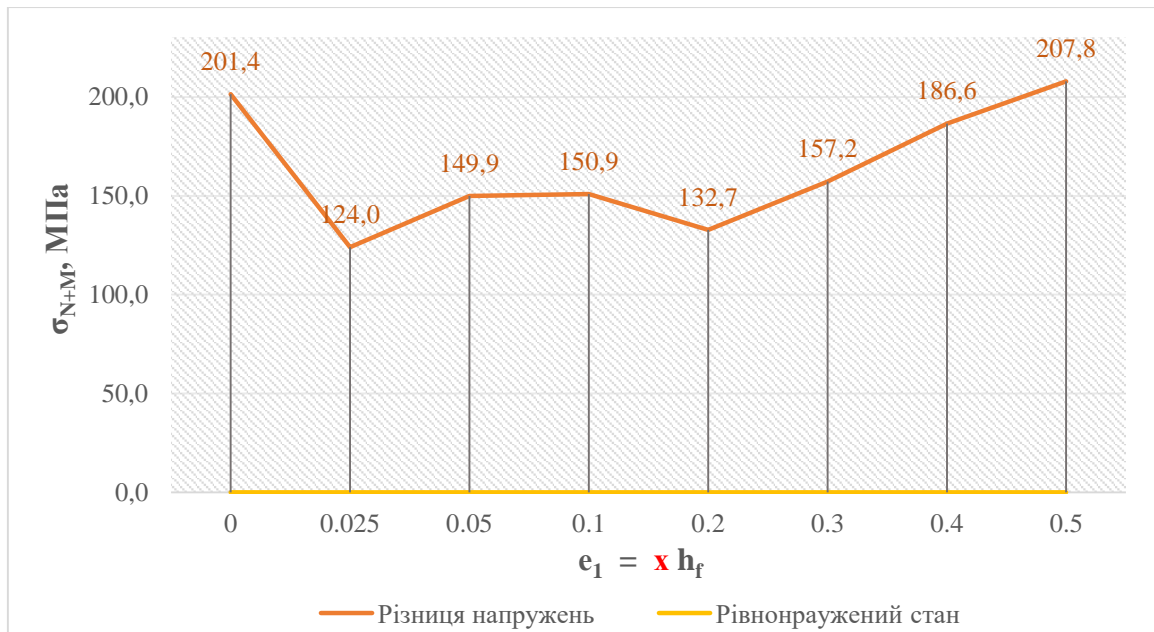
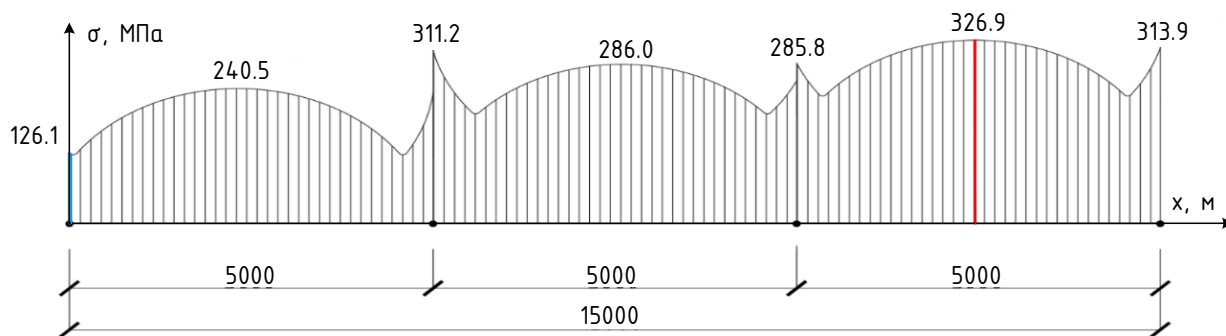


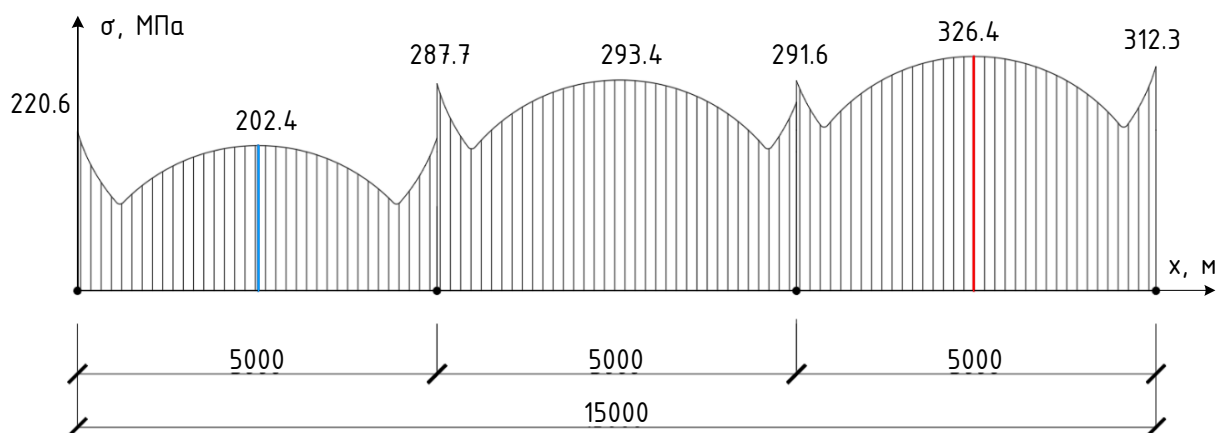
Рис. 3.8. Різниця нормальних напружень між дійсним і рівнонапруженим станом

Як видно із рис. 3.8 максимальні значення напружень в 1 і 3 панелях вдалось майже вирівняти, але по середині панелей ще не має їх рівності. Тому, побудуем сумарні епюри напружень для еталонної ферми, і при $e_1 = 0,025 h_f$, при $e_1 = 0,2 h_f$ (рис. 3.9).

а)



б)



в)

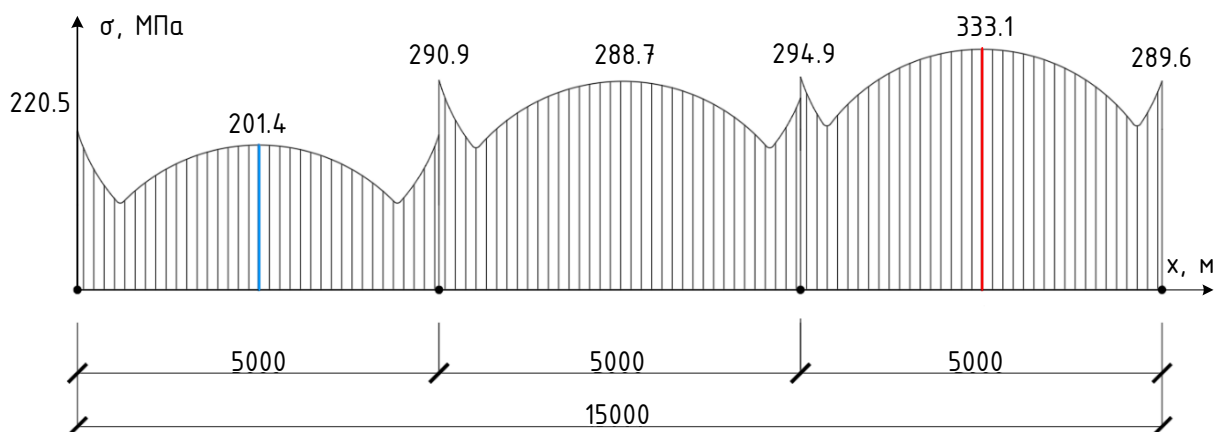


Рис. 3.9. Епюри нормальних напружень: а – еталонної ферми; б – при $e_1 = 0.025 h_f$; в – при $e_1 = 0.2 h_f$

Аналіз ефективності таких епюр з рис. 3.9 можна провести, побудувавши епюри недовантаженості балки жорсткості порівняно з межею для класу міцності прокату сталі панелей (рис. 3.10).

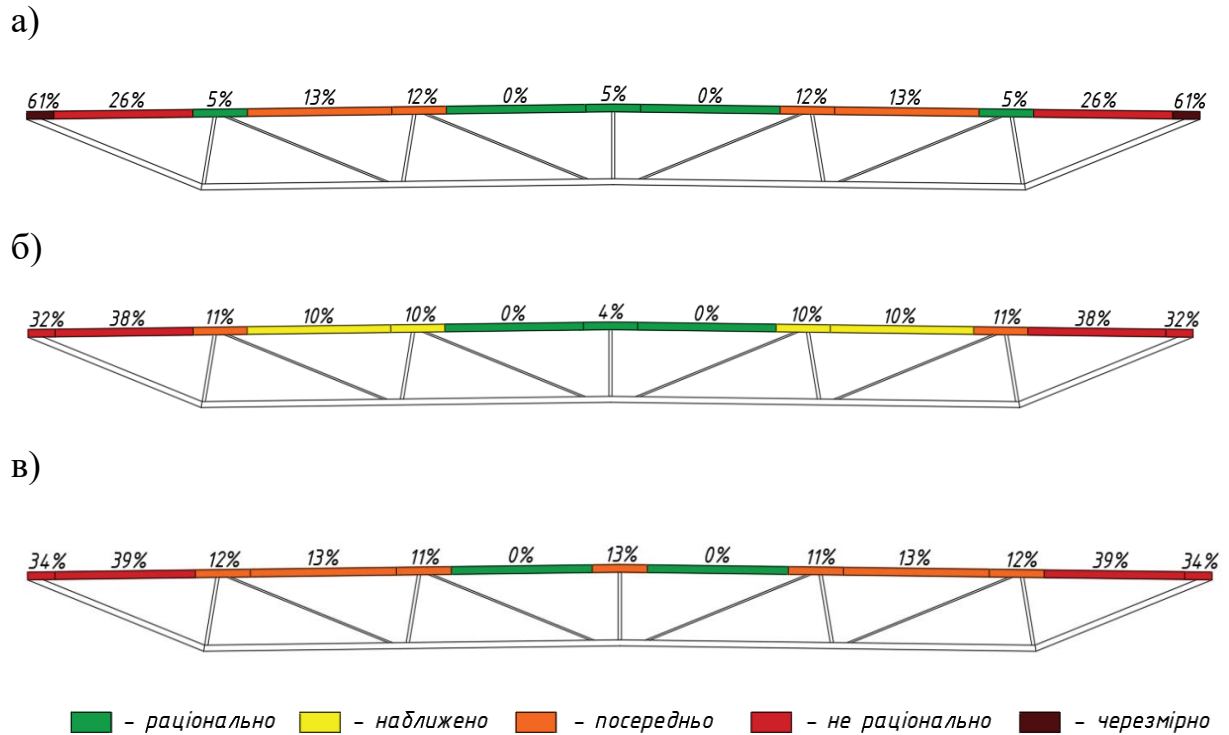


Рис. 3.10. Епюри недовантаженості балки жорсткості порівняно з межею для класу міцності прокату сталі панелей: а – еталонної ферми;

б – при $e_1 = 0.025 h_f$; в – при $e_1 = 0.5 h_f$

Отже, із рис. 3.10 видно, що найбільш рівномірно завантажена балка жорсткості при $e_1 = 0.025 h_f$.

3.3. Регулювання НДС в 30 м сталевій комбінованій фермі зміною вузлових ексцентриситетів

Другим методом розрахункового регулювання НДС в балці жорсткості раціональної комбінованої ферми є створення ексцентриситету $e_2 - e_3$ (рис. 3.11) у вузлах примикання системи підвіски до балки жорсткості. Змінний параметр – величини ексцентриситету $e_2 - e_4$.

За рахунок прикладення ексцентриситетів у вузлах змінюється значення згинальних моментів на проміжних опорах балки жорсткості.

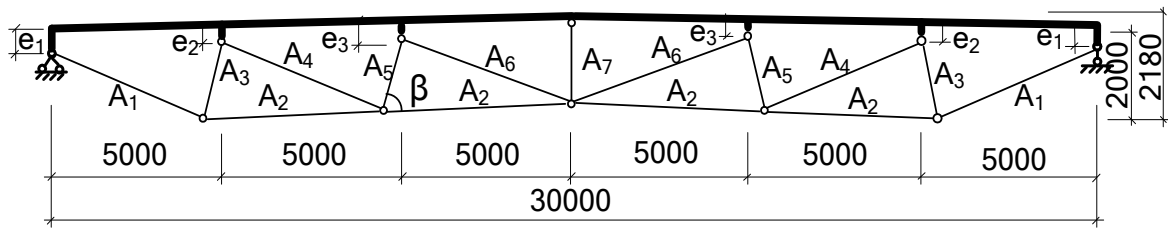


Рис. 3.11. Загальна схема регулювання НДС в комбінованій фермі зміною поперечних перерізів $A_1 - A_7$ і зміною ексцентриситетів $e_1 - e_3$

Крім того, раціонально і найбільш просто, здійснювати розрахункове регулювання НДС в балці жорсткості зміною поперечних перерізів розкосів, стійок і нижнього поясу $A_1 - A_7$ (рис. 3.11). Але, раціональний підбір поперечних перерізів середніх розкосів, дозволяє зрівноважити моменти тільки на другій проміжній опорі та у центральних панелях балки жорсткості, а цього замало і тому необхідно використовувати інші способи, наприклад, ціленаправленим створенням ексцентриситетів $e_2 - e_4$. На відміну від крайнього ексцентриситету e_1 , величину середніх можем змінювати в межах висоти балки жорсткості h_b .

Для подальшого дослідження одиночного впливу ексцентриситетів на епюри напружень від моментів M_u та повздовжніх сил N розглянемо, наприклад, вплив тільки ексцентриситету e_3 . При цьому інші ексцентриситети, як опорний так і інші вузлові не прикладались. Результати числового експерименту розрахункового регулювання НДС в 30 - метровій фермі (епюри моментів в балці жорсткості) на ПК «ЛІРА-САПР» методом скінчених елементів, яка працює на рівномірно розподілене навантаження $q = 18$ кН/м, з допомогою $e_1 = 0$, $e_2 = 0$, $e_3 =$ змінний, $e_4 = 0$ балки жорсткості (рис. 3.11). Оскільки ферма симетрична, розглядаємо зміни напружень лише в її половині довжиною 15 м.

Як зазначено вище, вузловий ексцентриситет можливо змінювати лише в межах висоти балки жорсткості $e_n = 0 \div h_b$. Величину цього ексцентриситету e_3 змінюватимемо в межах $e_3 = 0.1 \dots 0.5 h_b$ (висота балки жорсткості) з кроком $0.1 h_b$. Тоді вплив зміни ексцентриситету e_3 на епюру нормальних напружень балці жорсткості буде такий - рис. 3.12 Еталоном є комбінована ферма, яка не має ніяких ексцентриситетів.

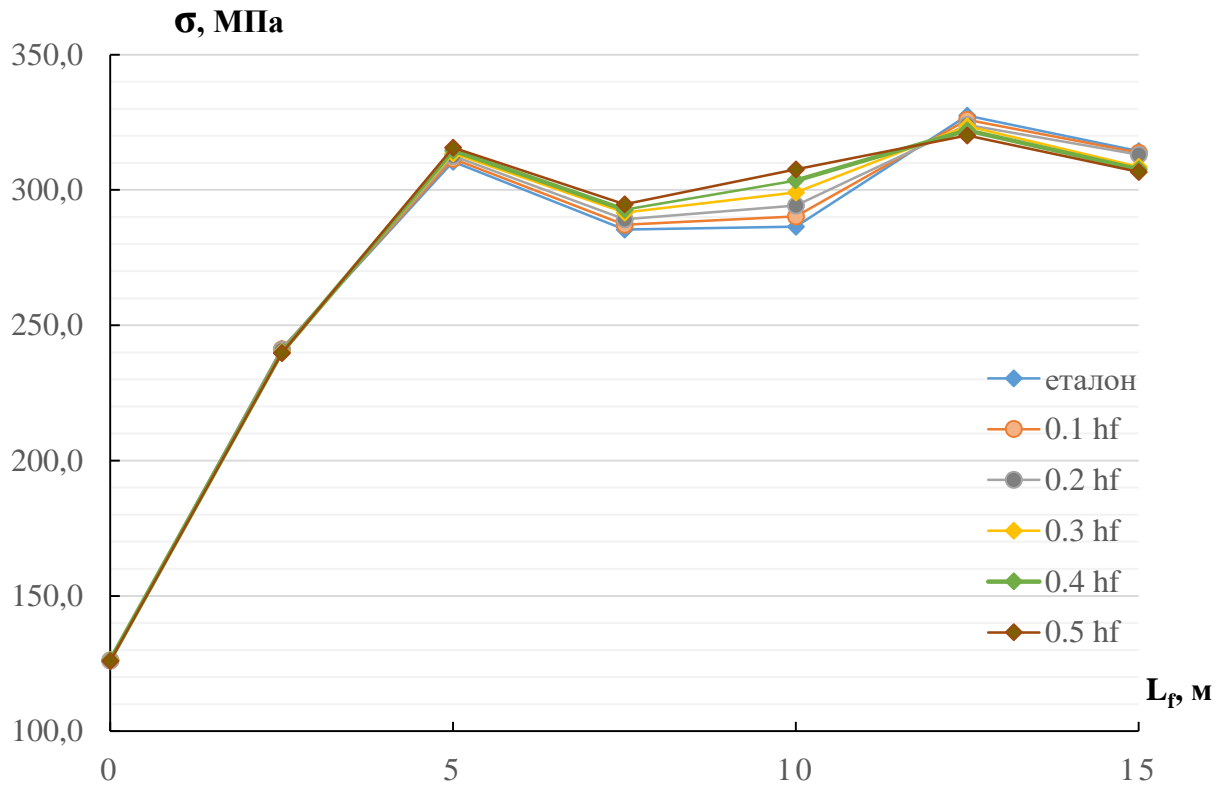


Рис. 3.12. Сумарні значення епюри нормальних напружень в балці жорсткості по довжині ферми від дії навантаження і з зміною ексцентриситету e_3

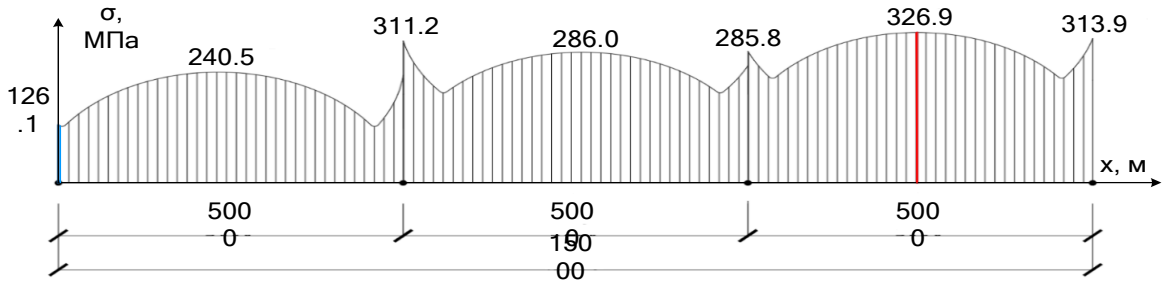
Отже, за результатами числового експерименту розрахункового регулювання зміною ексцентриситету e_3 (рис. 3.12) видно, що його вплив на напруження відбувається тільки місці його прикладання на опорі та частково в суміжних панелях - для e_3 це 2 і 3 прольоти, для e_2 відповідно – 1 і 2. Найбільша зміна напружень відбулась при $e_3 = 0.5 h_b$.

Таким чином можна змінювати напруження у недонапружених елементах, а при максимальному значенні e_3 частково зменшити напруження в 3 панелі. Відповідно, прикладаючи ексцентриситети у необхідних вузлах можливо регулювати напруження по усій довжині балки жорсткості.

Визначивши найбільш раціональне значення вузлового ексцентриситету e_3 , проведемо аналіз впливу на значення напружень у балці жорсткості при $e_3 = 0$ та $e_3 = 0.5 h_b$.

Наведемо епюри нормальних напружень в балці жорсткості по довжині ферми на рис. 3.13.

а)



б)

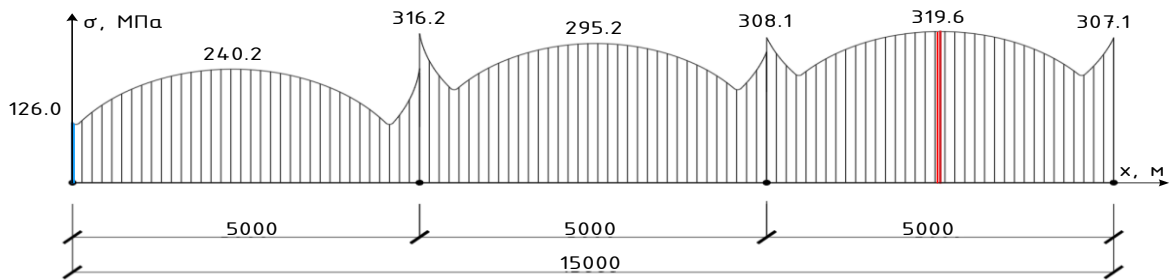
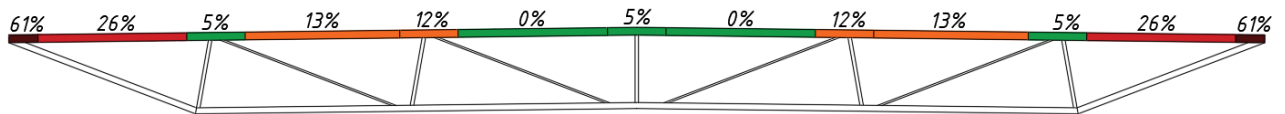


Рисунок 3.13. Сумарна еюра напружень: а – при $e_3 = 0$, б – при $e_3 = 0.5 h_b$

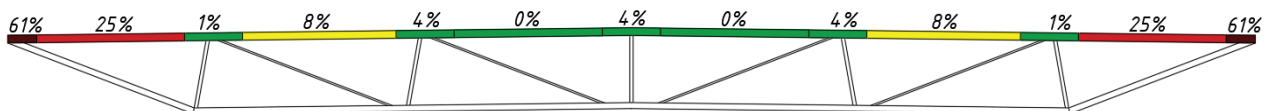
Як видно із рис. 3.13, максимальне значення напружень в 3 панелі еталонної ферми з 327,5 МПа тільки від дії $e_3 = 0.5 h_b$ зменшилось до 320,1 МПа. Це відносно не багато, але це вплив тільки одного ексцентриситету.

Оцінимо величини недонапруження в балці жорсткості комбінованої ферми відносно марки сталі С 345 (рис. 3.14) на базі графіка рис. 3.13.

а)



б)



■ - раціонально ■ - наближено ■ - посередньо ■ - не раціонально ■ - черезмірно

Рис. 3.14. Недонапруження в балці жорсткості комбінованої ферми відносно марки сталі С 345: а – еталонної ферми; б – при $e_1 = 0.5 h_b$

Як видно із рисунку, напруження в фермі з регулюванням напружень більш рівномірні, тобто така епюра більш близька до рівнонапруженого стану. Цей графік показує не тільки величини недонапруження, але й рівномірність таких епюр напружень в верхньому поясі комбінованої ферми, а також надає можливість провести оцінку як проводити регулювання з метою досягнення рівності напружень в розрахункових перерізах балки жорсткості (рис. 3.14).

3.4. Числовий аналіз раціональних величин опорних і вузлових ексцентриситетів для регулювання НДС в 30 м сталевій комбінованій фермі

Для визначення раціональних величин розрахункового регулювання НДС одночасною зміною висоти опорних і вузлових ексцентриситетів комбінованої ферми – (з метою досягнення рівнонапруженого стану в розрахункових поперечних перерізах балки жорсткості) розглянемо варіант, коли опорний ексцентриситет e_1 в межах нижньої половини висоти балки жорсткості.

Проведемо аналіз з допомогою програми Excel. Розглянемо еталонну комбіновану ферму прольотом 30 м з рівномірно розподіленим навантаженням $q = 18$ кН/м без опорних і вузлових ексцентриситетів, тобто $e_1 = e_2 = e_3 = 0$ (рис. 3.15). Верхній пояс ферми із сталі С 345.

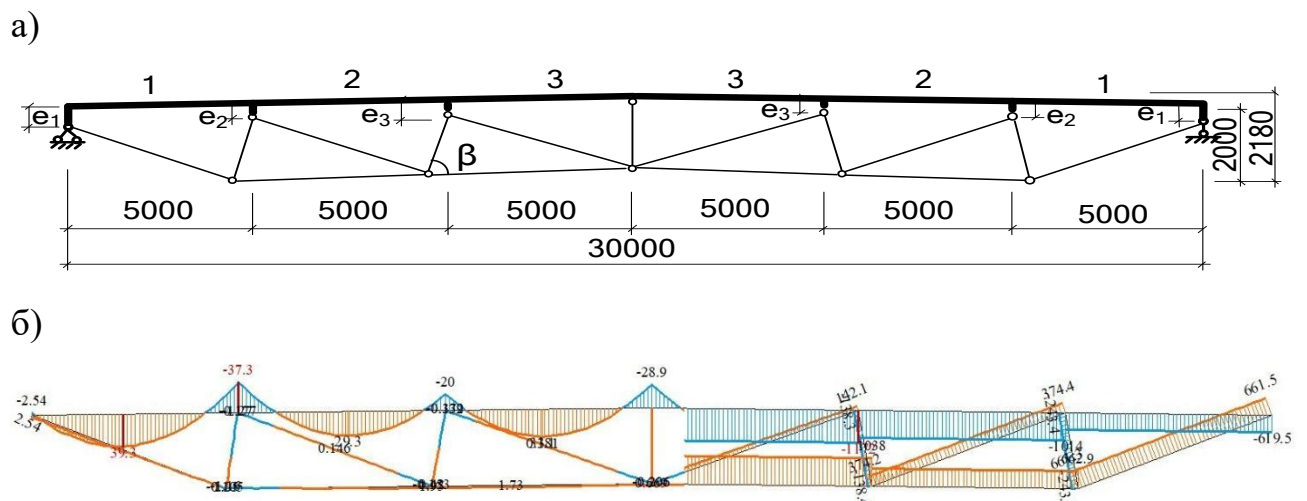


Рис. 3.15: а – розрахункова схема; б – епюри моментів і нормальних сил

Сумарні значення нормальних напружень від моментів і нормальних сил в балці жорсткості наведені в таблиці 3.1 (при симетричній фермі розглядаєм тільки половину ферми довжиною 15 м).

Таблиця 3.1

Сумарні напруження від моментів і нормальних сил

x, м	0	2.5	5	7.5	10	12.5	15
$\Sigma\sigma$, мПа	126.1	240.5	311.2	286.0	285.8	326.9	313.9

Тоді, виразимо ці величини напружень по відношенню до міцності сталі верхнього поясу у відсотковому відношенні (табл. 3.2).

Таблиця 3.2

Величини запасу міцності верхнього поясу у відсотках до міцності сталі

x, м	0	2.5	5	7.5	10	12.5	15
Запас міцності, %	62	26	4	12	12	0	5

Як видно із табл. 3.2 – найбільш недовантажена перша панель верхнього поясу, запас міцності складає 62% і 26%, а це можна виправити зміною ексцентриситетів e_1 та e_2 . А це надає можливість максимально вирівняти напруження і забезпечити найбільш повне використання міцності сталі.

Нерозрізна балка жорсткості буде раціональною – рівномічною і рівнонапруженою коли максимальні розрахункові напруження в кожному перерізі балки жорсткості ферми будуть однакові. Використання міцносних критеріїв раціональності - рівноміцності і рівнонапруженості має важливе значення і дозволяє значно спростити проблему раціонального проектування та звести її до вирішення обернених задач теорії міцності в статиці.

Тобто, висувається вимога відсутності резервів міцності, або одночасного руйнування всіх панелей балки жорсткості ферми.

У рамках розрахунку на міцність кроквяної комбінованої ферми реалізуємо нормативну оцінку балок жорсткості та їх стійкості на прогин. Також весь розрахунок базується на використанні тільки стандартних профілів. Проведем числовий аналіз впливу зміни ексцентриситетів e_1, e_2 і e_3 на напружений стан балки жорсткості (табл. 3.3).

Таблиця 3.3

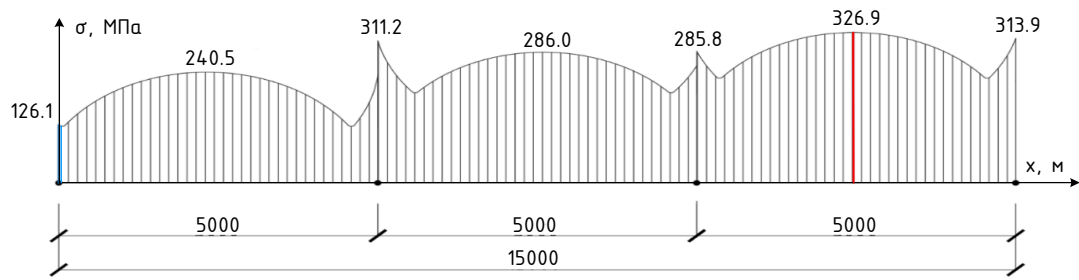
Вплив зміни ексцентриситетів e_1, e_2 і e_3 на напружений стан балки жорсткості
(відсоток запасу несучої здатності)

e_1	e_2	e_3	x, м						
			0	2.5	5	7.5	10	12.5	15
0	0	0	62%	26%	4%	12%	12%	0%	5%
$0.05h_f$	$0.5h_b$	$0.5h_b$	4%	39%	0%	12%	12%	5%	7%
$0.045h_f$	$0.4h_b$	$0.5h_b$	7%	38%	0%	10%	9%	3%	5%
$0.045h_f$	$0.3h_b$	$0.5h_b$	4%	39%	1%	6%	5%	0%	2%
$0.04h_f$	$0.6h_b$	$0.5h_b$	11%	37%	0%	7%	6%	0%	3%
$0.04h_f$	$0.2h_b$	$0.5h_b$	10%	39%	4%	5%	4%	0%	3%
$0.045h_f$	$0.2h_b$	$0.5h_b$	4%	40%	4%	4%	3%	0%	1%

Порівняння сумарних епюр нормальних напружень в балках жорсткості еталонної ферми і ферми з регулюванням НДС опорними і вузловими ексцентриситетами приведено на рис. 3.16 і зміна величин напружень по довжині ферми на рис. 3.17.

Як видно із рис. 3.17, еюра в фермі з регулюванням НДС опорними і вузловими ексцентриситетами є більш рівномірною і максимальне напруження зменшилось приблизно на 10% з 327,5 МПа до 293,9 МПа.

а)



б)

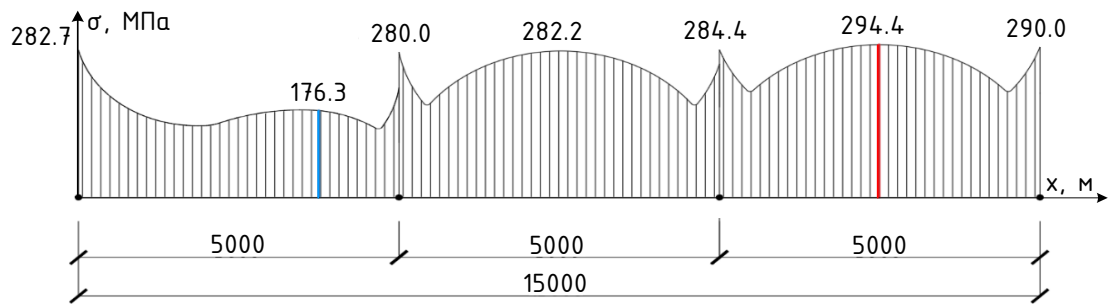


Рис. 3.16. Епюри напружень в балці жорсткості: а – еталонної ферми;
б – ферми з регулюванням ексцентриситетами

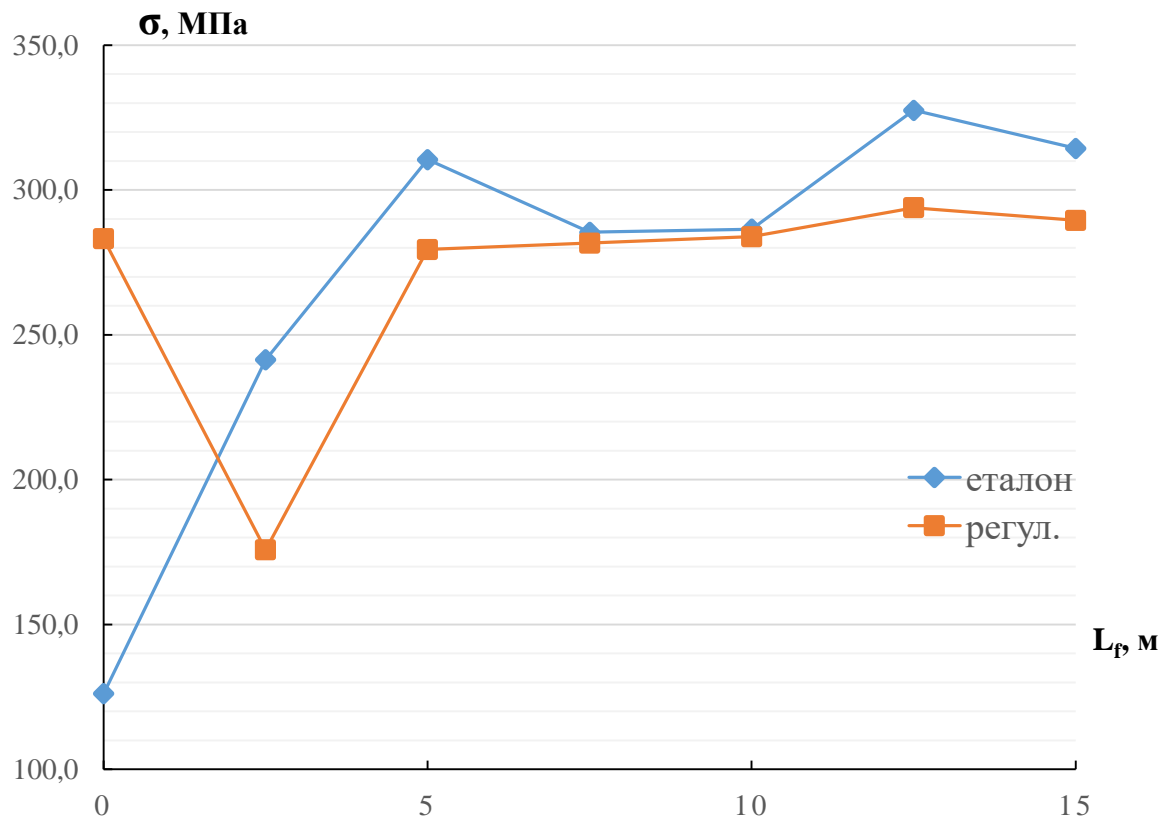
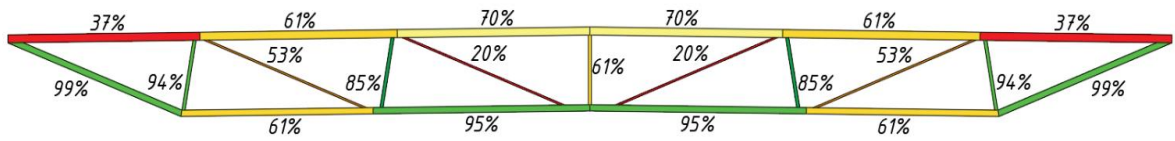


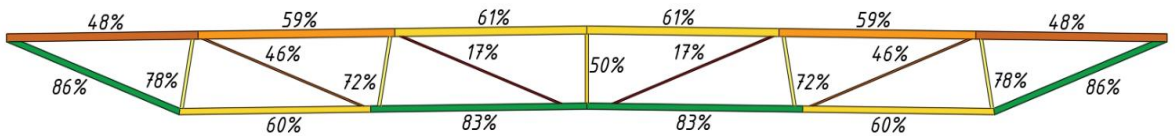
Рис. 3.17. Напруження в балці жорсткості

На рис. 3.18 наведено відсоток використання несучої здатності балки жорсткості.

а)



б)



■ - оптимально напружені ■ - середньо напружені ■ - недонапружені ■ - практично не використовують несучої здатності

Рис. 3.18. Відсоток використання несучої здатності балки жорсткості: а – еталонної ферми; б – ферми з регулюванням ексцентриситетів

Також, за даними розрахунку таких ферм із зміною ексцентриситетів вдалося їх максимальні прогини зменшити з 147 мм, до 139 мм, а допустимий прогин складає $1/200 \cdot l = 150$ мм. Отже, така ферма з розрахунковим регулюванням НДС зміною ексцентриситетів має запас міцності і жорсткості, що дозволяє зменшити поперечні перерізи її елементів (рис. 3.19 і табл. 3.4).

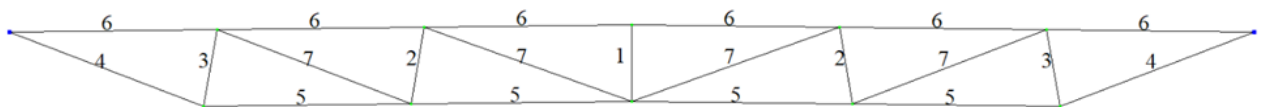


Рис. 3.19. Нумерація стержнів

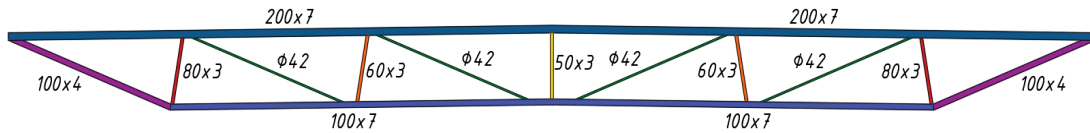
Таблиця 3.4

Експлікація елементів ферми

№	Тип елементу	Сталь	Січення	Маса, кг
6	Верхній пояс	С345	□180х6	961,6
5	Нижній пояс	С345	□100х8	441,4
4	Нижній пояс	С345	□100х4	117,2
3	Стійки	С255	□70х3	22,7
2	Стійки	С255	□60х3	19,2
1	Стійки	С255	□50х3	7,7
7	Розкоси	С345	●ø40	203,1
Кількість елементів 21 шт, довжина зварних швів – 19,8 м				
			Загальна маса:	1772,9 кг

Жорсткість ферми з новими перерізами в межах норм, та порівнюємо її з еталонною (рис. 3.20).

а)



б)

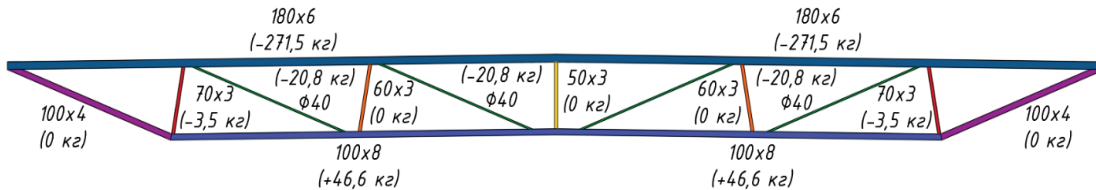


Рис. 3.20. Перерізи елементів ферм, кг: а – еталонна ферма; б – ферма з регулюванням ексцентриситетами (в дужках показано зміну маси відносно еталонної ферми)

Перевірка верхнього поясу комбінованої ферми з регулюванням НДС на загальну стійкість згинальних елементів суцільного перерізу показала, що вона забезпечена.

Отже, маса ферми за ДСТУ - 2455,5 кг, маса еталонної комбінованої ферми – 2022,1 кг, а маса комбінованої ферми з розрахунковим регулюванням (регулюванням ексцентриситетами) – 1772,9 кг. Звідси, маса комбінованої ферми з розрахунковим регулюванням менша 27,8 % від маси ферми за ДСТУ і на 12,3 % від комбінованої ферми без регулювання НДС.

Це дозволяє зробити висновок, що розрахункове регулювання НДС зміною опорних і вузлових ексцентриситетів дозволяє більшою мірою використовувати резерви конструкції, не змінюючи її надійність, відповідно до практично доцільних величин.

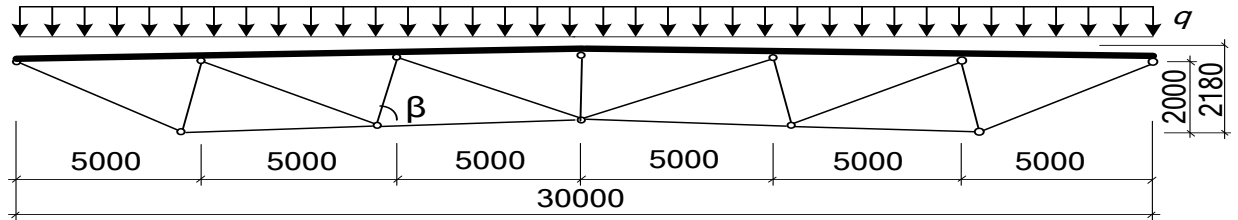
3.5. Регулювання НДС в 30 м сталевій комбінованій фермі зміною довжин панелей верхнього поясу

Для отримання раціональної конструктивної форми комбінованої сталеві ферми за критеріями раціональності - рівність напружень у всіх розрахункових перерізах балки жорсткості пропонується наступне. Для цього використаємо розрахунковий метод регулювання НДС в балці жорсткості з використанням раціонального проектування [18, 21].

З метою підвищення ефективності такої комбінованої ферми (зменшення її маси) розглянемо нову конструктивну форму ферми (різні довжини панелей балки жорсткості) - розрахункове регулювання її НДС зміною довжини панелей верхнього поясу. Зміну довжин панелей будемо проводити з метою зменшення згинальних моментів в цьому поясі.

Розглянемо варіант розрахункового регулювання напружень у верхньому поясі (балці жорсткості) комбінованої сталеві ферми прольотом 30 м, яка працює на рівномірно розподілене навантаження $q = 18 \text{ кН/м}$ (рис. 3.21, а) змінної довжини панелей верхнього поясу, яка буде еталоном для порівняння.

а)



б)

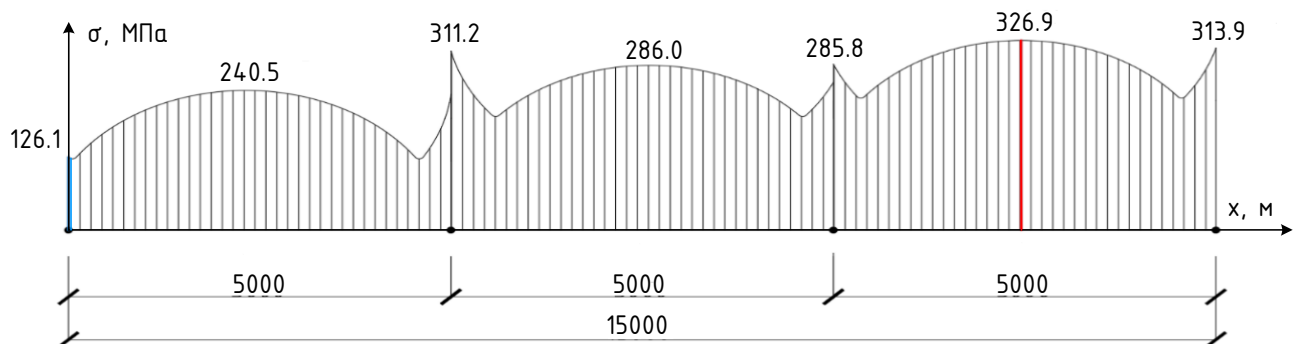


Рис. 3.21: а – схема етalonної комбінованої 30 м ферми; б - сумарна епора нормальних напружень у верхньому поясі (зображена половина довжини)

Як видно із рис. 3.21, б, максимальні напруження в першій панелі рівні 241,4 МПа, другій – 285,4 МПа і третій центральній – 327,5 МПа. Різниця між ними коливається від 14 до 18%. Недонапруження перерізу у першій та другій панелі становить 28% та 15% відповідно. Доцільно виконати регулювання напружень для їх вирівнювання.

З метою вирівнювання напружень в панелях верхнього поясу необхідно підібрати таке зменшення напружень, яке б мало приблизно таку обернено пропорційну залежність, як різниця між ними. Для цього дослідимо їх співвідношення в однопролітній балці змінної довжини в межах 3...6 м з перерізом як і у верхньому поясі еталонної ферми (200x7) та за рівномірно розподіленого навантаження $q = 18 \text{ кН/м}$ (рис. 3.22).

Для цього проведемо розрахунок низки розрахункових схем із різними довжинами панелей. Для кожної розрахункової схеми фіксуємо максимальне значення напружень у панелі. Для аналізу впливу зміни довжини панелі на зміну величини максимального напруження у ній побудуємо діаграму на рис. 3.22.

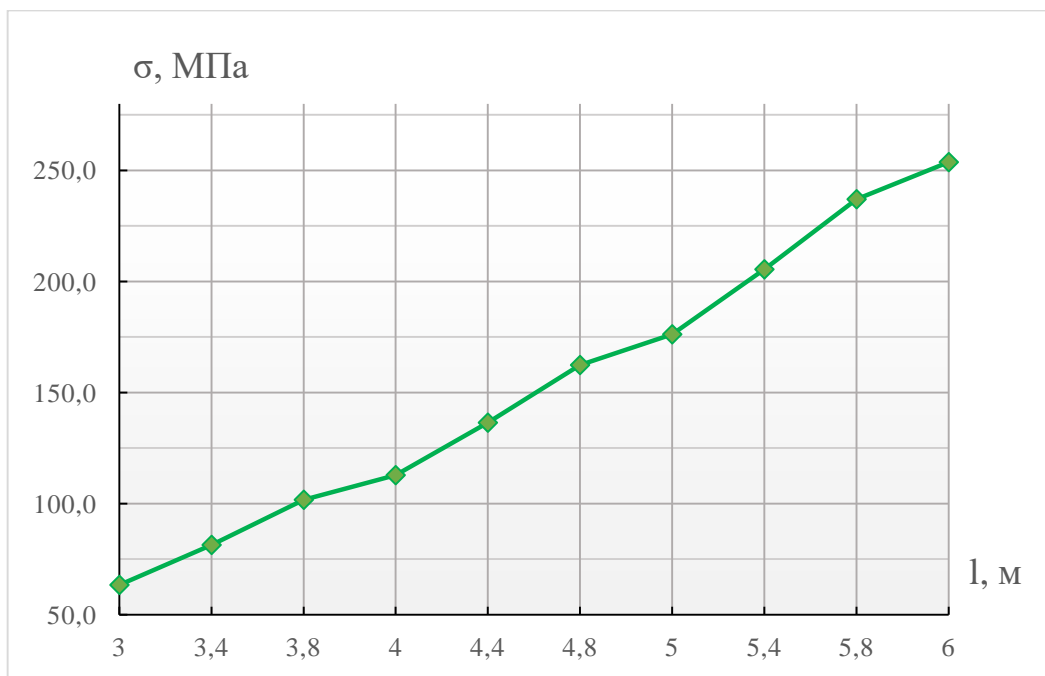


Рис. 3.22. Залежність нормальних напружень від довжини панелі

З рис. 3.22 видно, що напруження від довжини панелі прямопропорційно залежні. Це надає можливість проводити зміни довжин панелей

цілеспрямовано і наступним чином - в панелях з максимальними напруженнями зменшуємо їх довжини, а в панелях з мінімальними напруженнями – збільшуємо з метою одержання вирівнювання напружень розрахункових перерізах балки жорсткості. Якщо змінити довжини панелей (з врахуванням мінімальних технологічних складностей при виготовленні): середню панель залишити незмінною - 5 м, а панелі, починаючи від опори, будуть змінюватись наступним чином: 6-5-4 м (рис. 3.23).

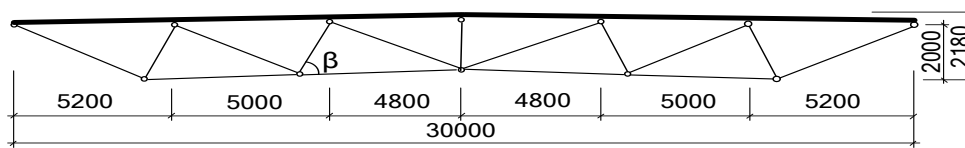


Рис. 3.23. Схема ферми з різними довжинами панелей верхнього поясу

Проведемо аналіз зміни сумарної епюри нормальних напружень у верхньому поясі як до, так і після зміни конструктивної форми ферми. Відповідно, епюра нормальних напружень у верхньому поясі при зміні конструктивної схеми ферми по рис. 3.23, матиме вигляд (рис. 3.24).

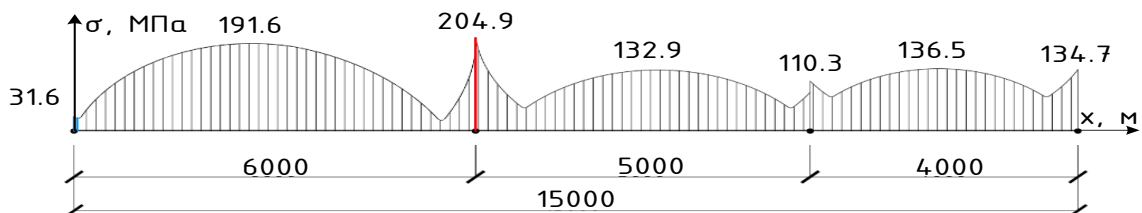


Рис. 3.24. Сумарна епюра нормальних напружень у верхньому поясі після регулювання зміною довжин панелей

Здійснимо аналіз змін напружень після зміни довжин панелей (рис. 3.25).

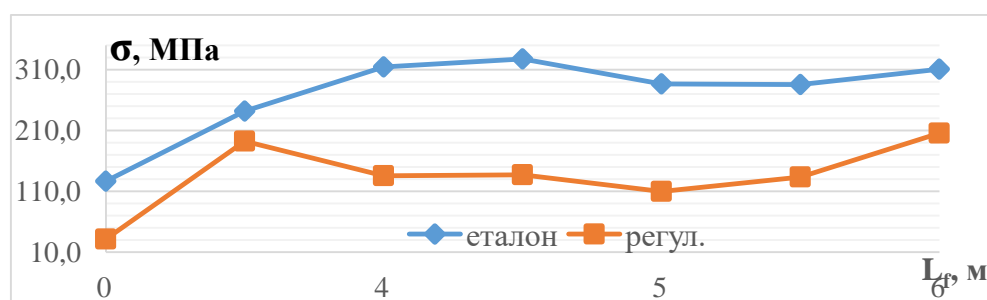


Рис. 3.25. Графік зміни нормальних напружень у верхньому поясі ферми

Як видно із рис. 3.21, б сумарна епюра напружень від згинального моменту і нормальної сили у верхньому поясі до зміни конструктивної форми ферми характеризується нерівномірністю і великим перепадом по абсолютній величині: змінюється від 126,1 МПа (крайня панель) до 327,5 МПа (середня панель). Отже, з метою вирівнювання напружень у розрахункових перерізах верхнього поясу комбінованої ферми необхідно зменшити напруження в середній панелі, а в крайній збільшити. Після зміни довжин панелей одержали епюру з майже рівними напруженнями (176,6 МПа; 129,9 МПа; 176,3 МПа) в розрахункових перерізах панелей верхнього поясу ферми, тобто близьку до рівнонапруженого стану – раціональне проектування (рис. 3.21, б). Отже, завдяки зміні довжин панелей, суттєво зменшились напруження у верхньому поясі з 327,5 МПа до 205,4 МПа, що складає 37,3%. При цьому прогини балки жорсткості рівні 125 мм, тобто рамках допустимих нормами [34] і становлять менше 1/240l.

Для ферми із різними величинами довжин панелей підбираєм поперечні перерізи (табл. 3.21):

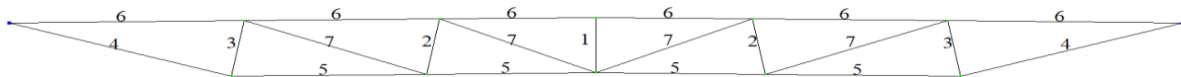


Рис. 3.26. Нумерація стержнів ферми

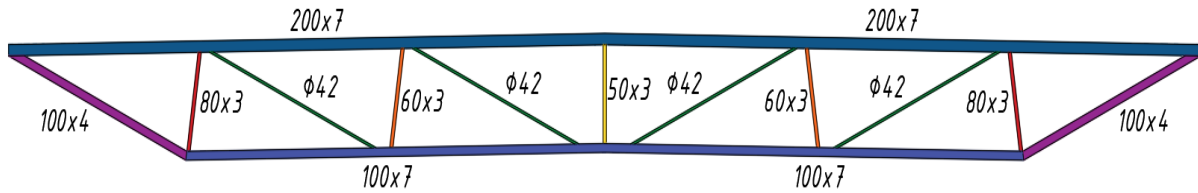
Таблиця 3.5

Специфікація сталі на 30 м комбіновану сталеву ферму з регулюванням зусиль
зміною довжин панелей

№	Тип елементу	Сталь	Переріз	Маса, кг
6	Верхній пояс	C345	□180x5	809,2
5	Нижній пояс	C345	□100x8	433,3
4	Нижній пояс	C345	□100x5	149,1
3	Стійки	C255	□80x4	34,2
2	Стійки	C255	□60x3	19,2
1	Стійки	C255	□50x3	7,7
7	Розкоси	C345	●ø40	199,2
Кількість елементів 21 шт, довжина зварних швів – 19,8 м				
			Загальна маса:	1651,9 кг

Для оцінки техніко-економічного ефекту здійснимо порівняння результатів з еталонною фермою. Для цього виконаємо порівняння по масі окремих елементів і загальних мас регульованої та еталонної ферм (рис. 3.27).

а)



б)

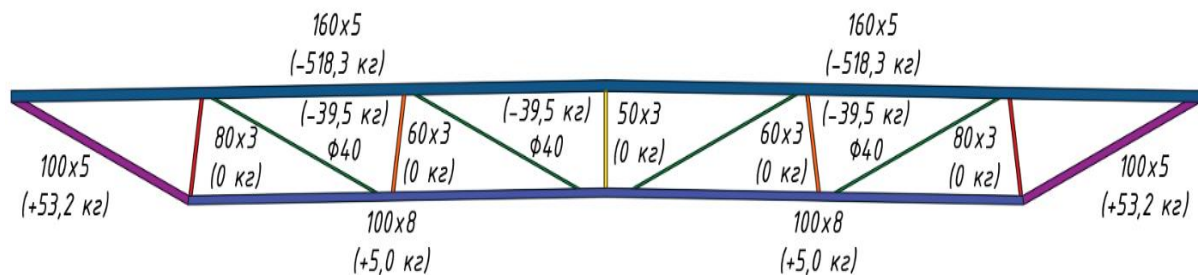


Рис. 3.27: а – маса елементів еталонної ферми; б - маса елементів ферми з регулюванням і величини їх зменшення

За результатами проведеного дослідження: маса ферми за ДСТУ Б В.2.6-74:2008. складає 2455,5 кг (розділ 2), маса еталонної комбінованої ферми – 2022,1 кг (розділ 2), а маса ферми вже з розрахунковим регулюванням зміною довжин панелей верхнього поясу – 1651,9 кг. Таким чином матеріаломісткість цієї ферми на 18,3 % менша за еталонну та на 32,7 % менша від ферми за ДСТУ.

Отже, нова конструктивна форма раціональних комбінованих сталевих ферм досягнута зміною довжини панелей верхнього поясу є ефективною з точки зору зменшення маси ферми, але має підвищену працемісткість виготовлення і вимагає додаткової технологічної складності в процесі виготовлення індивідуальних панелей. Альтернативою такої конструктивній формі може виступати регулювання НДС в фермі теж розрахунковим методом в процесі проектування зміною опорних і вузлових ексцентриситетів.

3.6. Дослідження ефективності використання сталевих комбінованих ферм в залежності від інтенсивності навантаження і величини прольоту

Для оцінювання технічної ефективності раціональних кроквяних сталевих ферм, які не вимагають додаткових затрат, вважаємо доцільним застосувати критерій порівняльної ефективності, яка характеризує технічні переваги одного варіанта над іншими при різних величинах навантаження та прольотів ферми.

За основний критерій технічної ефективності конструкцій приймаємо масу конструкції та відсоток її зміни, порівняно із іншою конструктивною формою, тобто зменшення витрат матеріалу є найважливішою умовою оцінки ефективності раціональної конструктивної форми [18]. У свою чергу зниження маси конструкції пов'язано зі зменшенням трудомісткості виготовлення і монтажу. Ці фактори взаємопов'язані й ефективність їх впливу на конструктивну форму тим більша, чим повніше при проектуванні враховані вимоги забезпечення технологічності конструкції [25]. Отже, раціональна конструкція це така, яка має мінімальну масу, технологічність і мінімальну трудомісткість її виготовлення.

Проведем аналіз порівняльної технічної ефективності раціональних комбінованих сталевих ферм прольотами 18, 24 і 30 м при різних величинах рівномірно розподіленого навантаження, що відповідає величинам ДСТУ Б.В.2.6-74:2008 методом порівняння з типовими фермами, що працюють на такі ж навантаження і однакових прольотах (рис. 3.28 - 3.30). До уваги приймалися такі прольоти і величини навантаження, які наведено у стандарті. Вага ферм обраховувалась відповідно до довжин елементів та типів перерізів, наведених у довідкових таблицях стандарту.

На рис. 3.28 показана залежність маси кроквяної сталеві ферми, що наведено у ДСТУ Б.В.2.6-74:2008, від величини навантаження. Графік було побудовано для прольотів 18, 24 та 30 м.

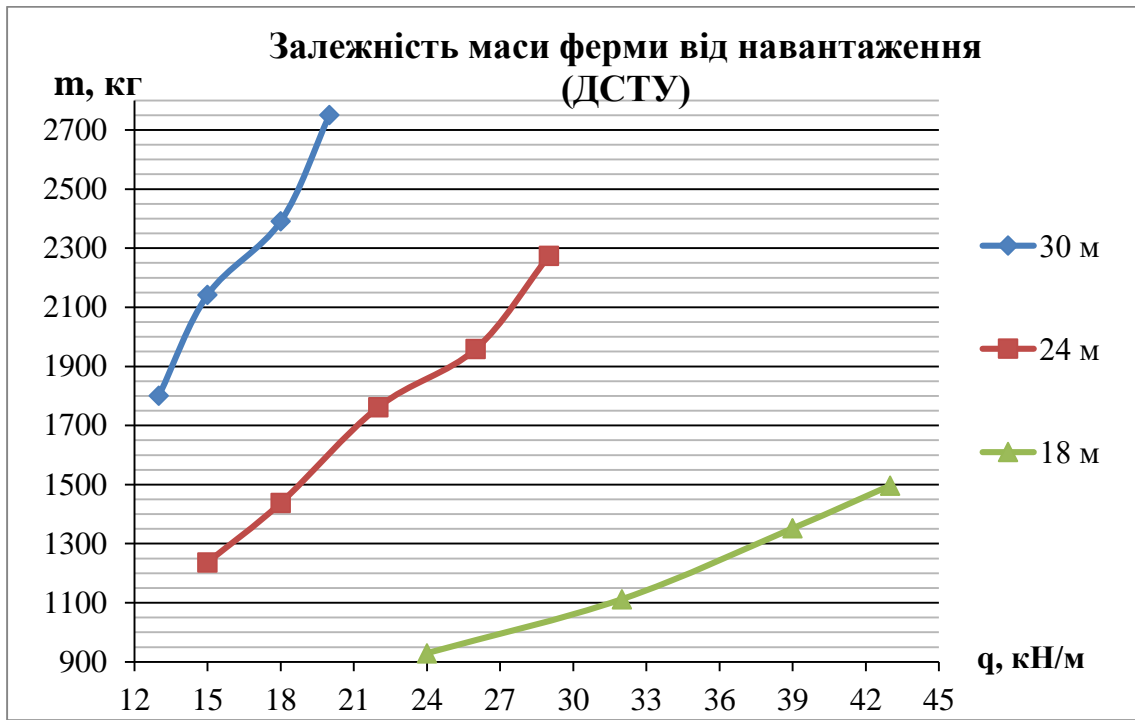


Рис.3.28. Залежність маси типової ферми по ДСТУ від величини рівномірно розподіленого навантаження q

Для раціональної комбінованої сталеві ферми залежність маси від величини рівномірно розподіленого навантаження q наведена на рис. 3.29.

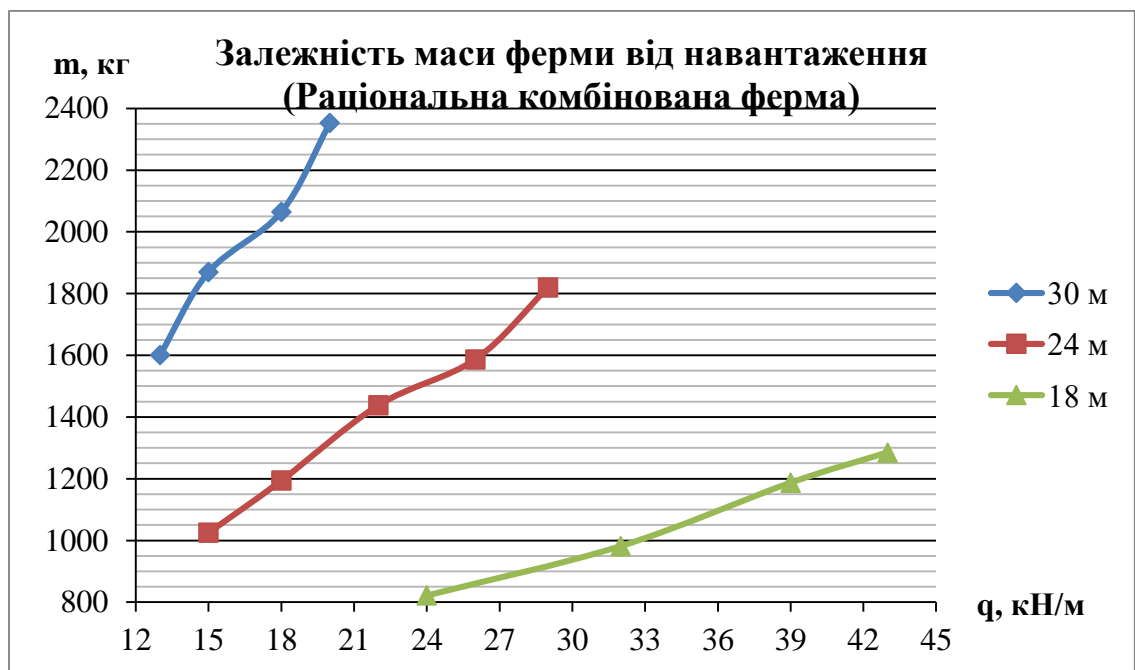


Рис.3.29. Залежність маси раціональної комбінованої сталеві ферми від величини рівномірно розподіленого навантаження q

На рис. 3.30 наведено ефективність (порівняння мас) раціональної комбінованої сталевій ферми (у відсотках) порівняно з типовою фермою по ДСТУ.

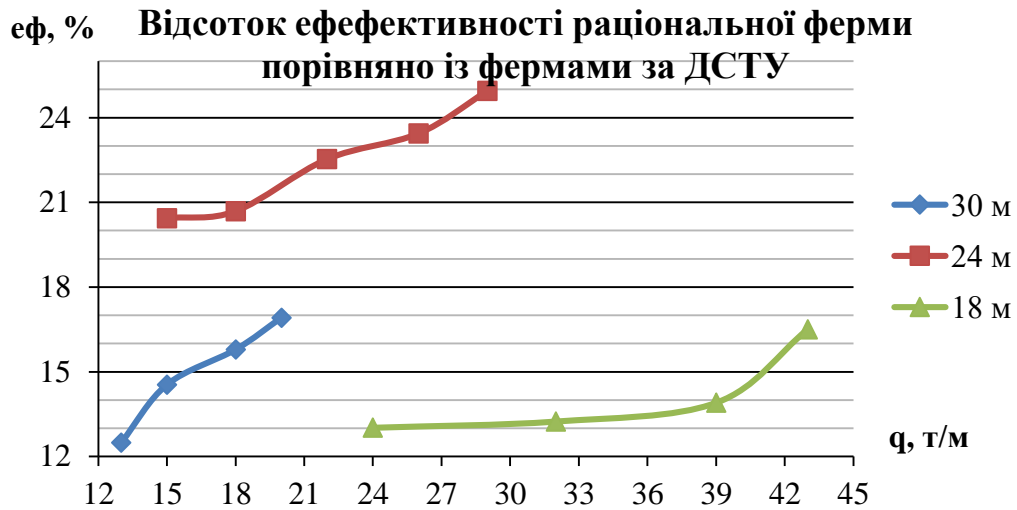


Рис. 3.30. Ефективність (порівняння мас) раціональної комбінованої сталевій ферми (у відсотках) порівняно з типовою фермою по ДСТУ

Як видно із рис. 3.29, маса раціональної комбінованої сталевій ферми прольотом 18 м менша порівняно з типовою на 13 % до 16,5 % залежності від величини навантаження, для комбінованої ферми прольотом 24 м маса менша на 20,5 % до 25 %, а для 30 м – із 12,5 % до 17 %.

Наприклад, для 30 м раціональної комбінованої сталевій ферми (рис. 3.31) при погонному навантаженні $q = 18$ кН/м, поперечні перерізи елементів становлять (табл.3.6):

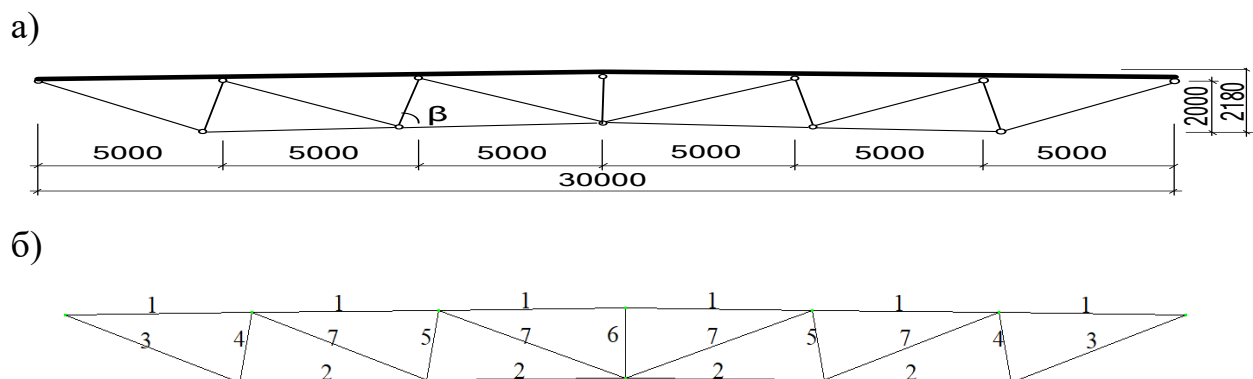


Рис.3.31: Раціональна комбінована сталевій ферма $L = 30$ м: а - загальний вид; б – нумерація елементів

Таблиця 3.6

Специфікація сталі на 30 м раціональну комбіновану сталеву ферму

№	Тип елементу	Сталь	Переріз	Маса, кг
1	Верхній пояс	C345	□200x7	1233,1
2	Нижній пояс	C345	□100x7	394,8
3	Нижній пояс	C345	□100x4	117,2
4	Стійки	C255	□80x3	26,2
5	Стійки	C255	□60x3	19,2
6	Стійки	C255	□50x3	7,7
7	Розкоси	C390	●ø42	223,9
Кількість елементів 21 шт, довжина зварних швів – 19,8 м				
Загальна маса:				2022,1 кг

Порівняння ефективності такої ферми із типовою фермою - еталоном наведено у таблиці 3.7.

Таблиця 3.7

Порівняння техніко-економічної ефективності раціональної комбінованої сталеві ферма L = 30 м і типової ферми відповідно з ДСТУ

Показник	Од. вим.	Ферма за ДСТУ	Раціональна ферма
Вартість сталі	грн	61 973	53 795
Вартість робіт	грн	12 865	8 806
Загальна вартість	грн	74 838	62 601
Маса ферми	кг	2455,5	2022,1
Довжина зварних швів	м	39,2	19,8
Кількість елементів	шт	41	21
Кількість вузлів	шт	23	12
Максимальне напруження	%	84,7	99,0
Мінімальне напруження	%	0,2	20,2
Витрати енергії	кВт·год	1102	862
Викиди CO ₂	т	0,431	0,354

Як видно з табл. 3.7, зменшено витрату сталі на 15,2 %, вартість робіт на 46 %, масу ферми на 21,4 %, кількість елементів і кількість вузлів майже два рази, а також витрату енергії при виготовленні та викиди діоксиду вуглецю. Проведені дослідження дали змогу отримати раціональну топологію комбінованих сталевих ферм прольотом 30 метрів, а також визначити оптимальні параметри такої ферми. За рахунок зменшення кількості, вузлів, елементів, кількості необхідних операцій та, як результат, часу виготовлення технологічність конструкції зросла на 40-45%, порівняно з типовими рішеннями. Теоретично обрахована енерговитрата на виготовлення розробленої комбінованої сталеві ферми, включаючи витрати на виплав сталі, склала 862 КВт·год, проти 1102 КВт·год для типової конструкції. Різниця в енерговитратах стає особливо помітною при масовому виробництві конструкцій на сучасних автоматизованих лініях.

Загалом, застосування нових конструктивних форм та організаційно технічних заходів дозволяє комплексно вирішувати питання енергетичної ефективності та ресурсозбереження при виготовленні сталі та сталевих конструкцій. За рахунок зменшення витрат сталі та економії на виробничих витратах досягається економічний ефект економії енергоресурсів до 22%, що в свою чергу тягне за собою і екологічний ефект, оскільки зменшується емісія діоксиду вуглецю в атмосферу від вироблення енергії.

Завдяки внутрішній будові ферми вдалося досягти перерозподілу зусиль в стрижнях, що дало змогу використати перерізи меншої площі і знизити витрату сталі від 12 % до 17% для ферм прольотом 18 м, від 12.5 % до 18% для прольоту 30 м та від 20.5% до 25% для 24 м, відповідно.

Висновки до розділу

1. Розглянуті розрахункові методи регулювання НДС як основа для підвищення ефективності сталевих комбінованих ферм, що забезпечує раціональний розподіл внутрішніх зусиль. Показано, що розрахунок кожного

виду таких конструкцій відомими методами дає нерівномірний напружений стан по довжині основного елемента – балки жорсткості, який полягає у істотній різниці між опорними і прольотними моментами, а це робить їх не завжди раціональними і економічними.

2. Сформульовано задачу розрахункового регулювання НДС в сталевих комбінованих фермах, суть якої полягає в тому, щоб максимально забезпечити одержання рівнонапруженого стану в перерізах балки жорсткості.

3. Відзначено, що для підвищення ефективності роботи сталевих комбінованих ферм, мінімізації їх маси та зменшення працемісткості необхідне, окрім розрахункових методів регулювання НДС, раціональне проектування.

4. Показано, що розрахункове регулювання НДС опорними і вузловими ексцентриситетами ефективно і раціонально при їх величині рівній половині висоти балки жорсткості.

5. Маса ферми за ДСТУ - 2455,5 кг, маса еталонної комбінованої ферми – 2022,1 кг, а маса комбінованої ферми з розрахунковим регулюванням (регулюванням ексцентриситетами) – 1772,9 кг. Звідси, маса комбінованої ферми з розрахунковим регулюванням менша 27,8 % від маси ферми за ДСТУ і на 12,3 % від комбінованої ферми без регулювання НДС.

6. Розрахункове регулювання НДС зміною опорних і вузлових ексцентриситетів дозволяє більшою мірою використовувати резерви конструкції, не змінюючи її надійність, відповідно до доцільних величин. Розрахункове регулювання напружень у верхньому поясі (балці жорсткості) комбінованої сталеві ферми прольотом 30 м, змінною довжини панелей верхнього поясу, суттєво зменшило напруження у верхньому поясі з 327,5 МПа до 205,4 МПа, що складає 37,3%. При цьому прогини балки жорсткості рівні 125 мм, тобто в рамках допустимих нормами і становлять менше $1/240l$. За результатами проведеного дослідження: маса ферми за ДСТУ Б В.2.6-74:2008. складає 2455,5 кг, маса еталонної комбінованої ферми – 2022,1 кг, а маса ферми вже з розрахунковим регулюванням зміною довжин панелей верхнього поясу –

1651,9 кг. Таким чином матеріаломісткість цієї ферми на 18,3 % менша за еталонну та на 32,7 % менша від ферми за ДСТУ.

7. Раціональне проектування, з використанням розрахункових методів регулювання НДС, дає можливість саме на стадії проектування знайти форму ферми і розподіл внутрішніх зусиль у ній відповідно до схеми прикладання зовнішнього навантаження за мінімальних затрат матеріалу. Отже, раціоналізація топології ферм і методики розрахунку є провідним шляхом в їх розвитку. Показано простоту і наочність запропонованого методу.

8. Оцінено ефективність НДС розрахунковим методом, що дало змогу використати перерізи меншої площі і знизити витрату сталі від 12 % до 17% для ферм прольотом 18 м, та від 20.5% до 25% для 24 м, відповідно, від 12.5 % до 18% для прольоту 30 м.

РОЗДІЛ 4

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО- ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ КОМБІНОВАНИХ СТАЛЕВИХ ФЕРМ

4.1. Мета і задачі експериментальних досліджень. Планування і підготовка експериментів

Програмою наукових досліджень передбачено, окрім теоретичних досліджень роботи комбінованих кроквяних ферм, практичну частину, що полягає у силових випробуваннях дослідних зразків ферм. З метою перевірки теоретичних розрахунків і порівняння їх із одержаними практичними результатами було заплановано та проведено низку експериментальних випробувань. Комплекс проведених випробувань вирішував, окрім загальної мети експериментальних досліджень, низку інших задач, які потребували практичного вирішення:

1. Дослідження роботи зразків комбінованих сталевих ферм, аналіз НДС балки жорсткості, як основного елемента конструкції
2. Перевірка несучої здатності за I та II групою граничних станів в пружній стадії
3. Дослідження роботи зразків при несиметричному навантаженні, перевірка наявності знакозмінних зусиль
4. Перевірка запропонованого методу регулювання НДС у балці жорсткості, порівняння із НДС еталонного зразку
5. Визначення величини руйнуючого навантаження, визначення коефіцієнту запасу, аналіз та характеристика видимих руйнувань при виході конструкції з експлуатації

Для цього були запроектовані масштабні моделі дослідних зразків із раціональними параметрами, що були досліджені теоретично у попередніх розділах: задана топологія, кількість проміжних опор балки жорсткості, кут нахилу стійок до поясів. Також було запроектовано та виготовлено серії зразків,

зокрема, у яких було застосовано запропонований метод регулювання НДС – вузловими ексцентриситетами, у вузлі та на опорах, раціональні значення яких було також попередньо досліджено.

4.2. Методика випробувань. Використовувані прилади і апаратура. Спеціальне обладнання

Враховуючи габарити досліджуваної моделі, а також специфіку зразка конструкції, що випробовується вперше, методику випробувань, необхідно було запроектувати та виконати установку для проектування.

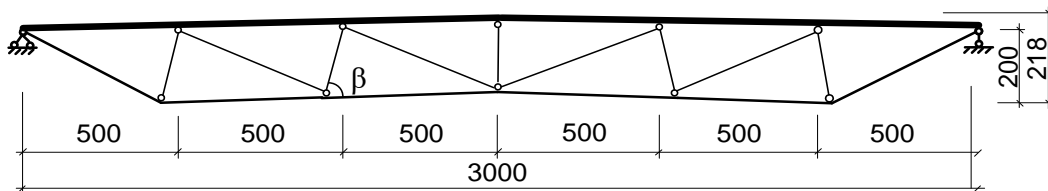


Рис. 4.1. Розрахуноква схема дослідного зразка моделі комбінованої сталевій ферми із раціональними параметрами

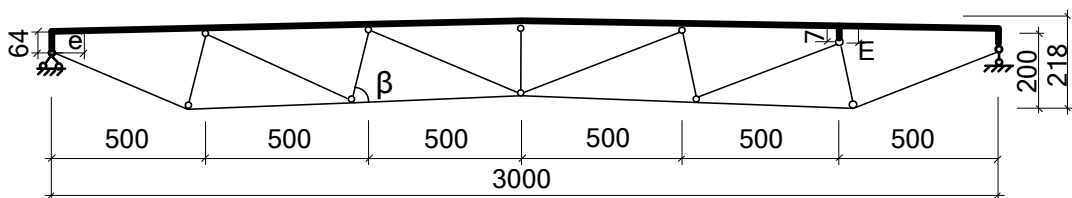


Рис. 4.2. Розрахуноква схема дослідного зразка моделі комбінованої сталевій ферми із раціональними параметрами та регулюванням НДС

Для початку, необхідно було задатись загальною схемою розташування конструкцій на опорах та розробити опорну частину для зразків. Далі було прийняте рішення про одночасне випробування двох дослідних зразків одночасно. Це давало би змогу закріпити зразки із площини і одночасно контролювати перебіг експерименту, порівнюючи отримані дані на кожній стадії завантаження.

Для встановлення однакового рівня обох зразків на кінцях ферм прикріплено U-подібну опорну деталь.

На силову підлогу встановлюються основні стійки для зразків. Зразки ферм, які мають власну опорну частину, встановлюються на основні стійки через опорні котки. Схеми випробування наведені на рис. 4.3 - 4.6.

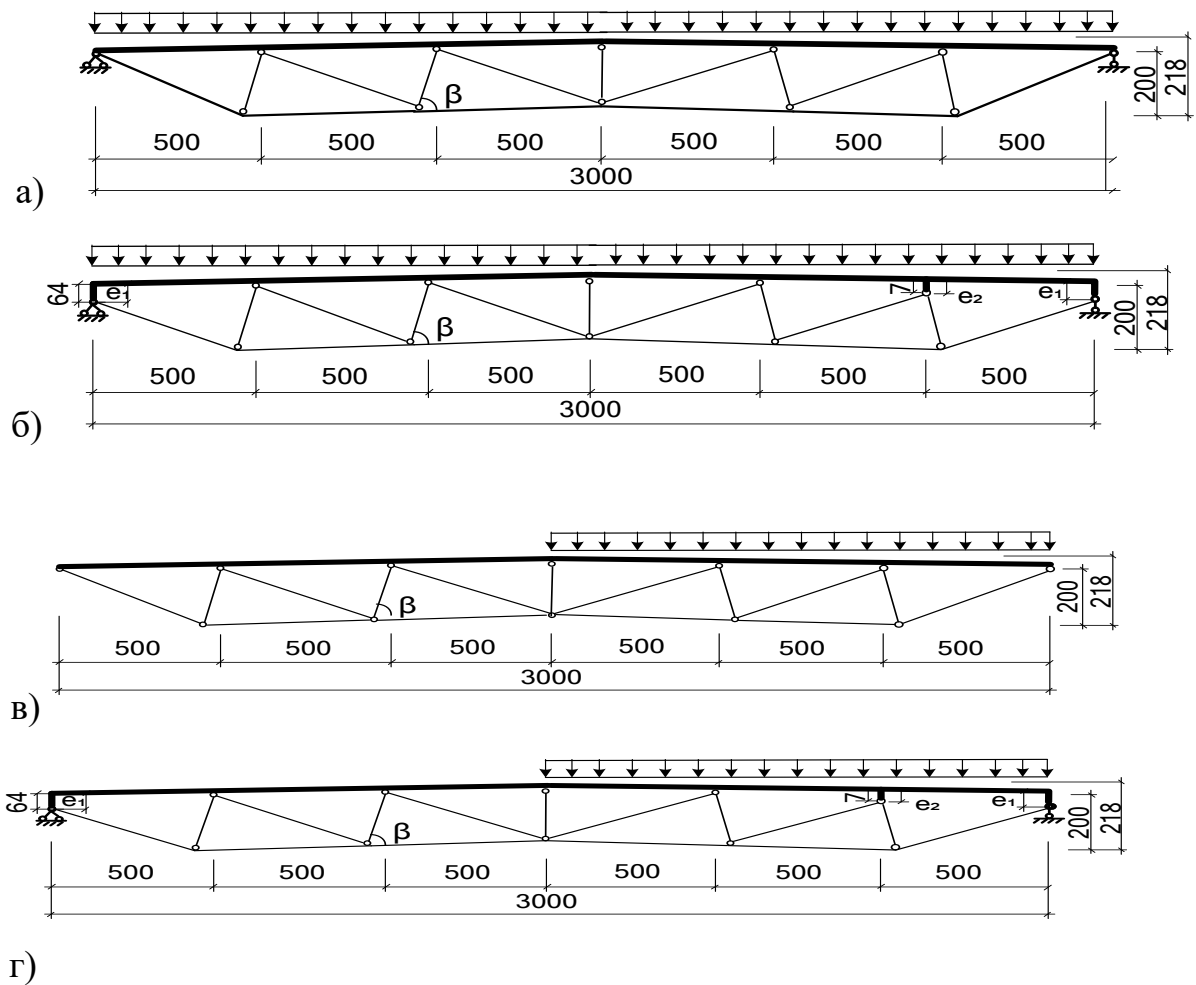


Рис. 4.3. Схеми випробування зразків моделей комбінованих кроквяних ферм: а - ферми із раціональними параметрами при симетричному навантаженні; б - ферми із раціональними параметрами та регулюванням НДС за допомогою вузлового ексцентриситету $e_2=7$ мм та опорного ексцентриситету $e_1=64$ мм при симетричному навантаженні; в - ферми із раціональними параметрами при несиметричному навантаженні; г - ферми із раціональними параметрами та регулюванням НДС за допомогою вузлового ексцентриситету $e_2=7$ мм та опорного ексцентриситету $e_1=64$ мм при несиметричному навантаженні

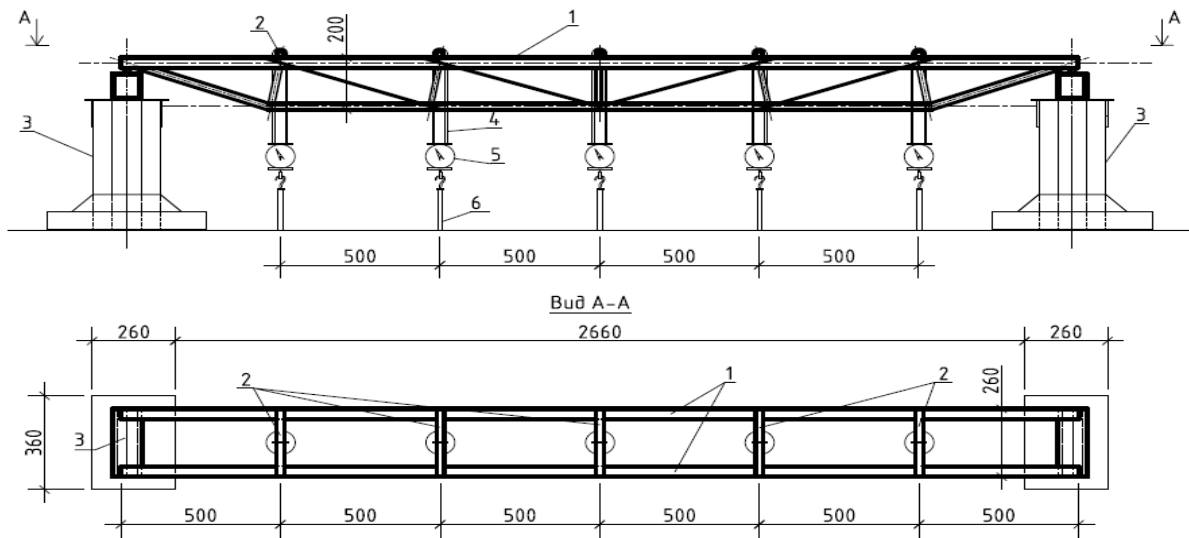


Рис. 4.4. Установка для випробування ферм: 1 - зразок; 2 - траверса; 3 –підвищуючі опори; 4 - тяги; 5 - динамометр; 6 –гідравлічний циліндр

Один з котків приварюється до стійки, тим самим моделюючи роботу нерухомого шарніру. Інша опора залишається вільною аналогічно до рухомого шарніру.

Така схема закріплення повторює роботу балки на двох опорах. Зразки ферм запроектовано прольотом 3 метри. Ферми розташовуються горизонтально, паралельно одна одній на віддалі 180 мм по осях. Для забезпечення стійкості конструкції сполучаються між собою поперечними елементами. За допомогою U-подібних елементів поверх поперечних зв'язків, кріпиться система тяг. Навантаження на вузли передається через тяги за допомогою гідравлічних циліндрів, приєднаних до силової підлоги.

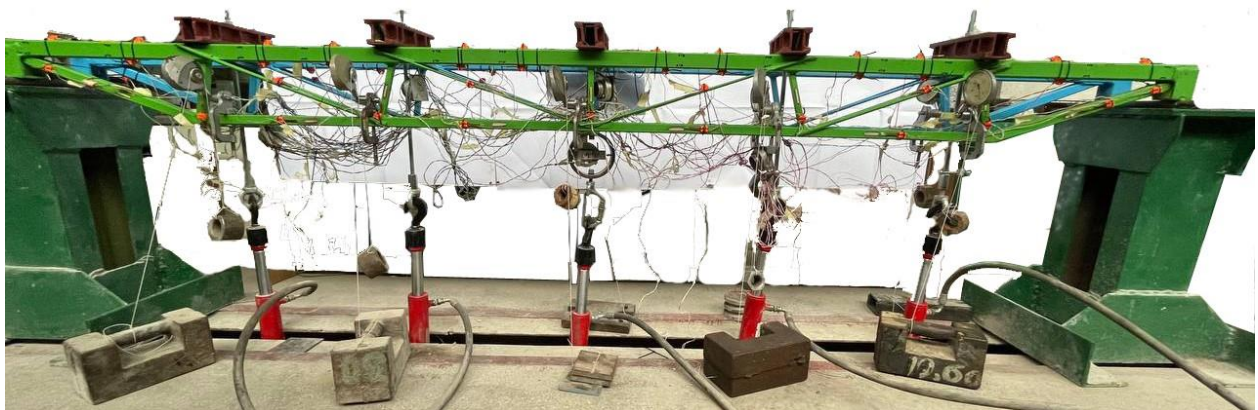


Рис. 4.5. Установка для випробування ферм в натуральну величину (вид збоку)



Рис. 4.6. Установка для випробування ферм в натуральну величину (вид зверху)

Модель для випробувань виконана у масштабі 1:10 від габаритів ферми прольотом 30м. Проліт масштабної моделі складає 3м, а висота 0.2 м відповідно. Топологія, пропорції та геометричні параметри аналогічні доповнорозмірної конструкції. Одночасно випробовувались два зразки ферм: без ексцентриситету та з прикладеним ексцентриситетом у вузлах (Рис.4.5).

Дослідивши параметри ферми та підбравши їх раціональні значення, запроєктовано два типи дослідних зразків сталевих раціональних ферм (рис. 4.7, 4.8).

Перший тип зразків (рис. 4.7) запроєктований виходячи із отриманих раціональних геометричних параметрів без регулювання НДС. Другий тип зразків (рис. 4.8) запроєктований аналогічно, але з регулюванням НДС завдяки прикладеним ексцентриситетам: опорному ексцентриситету $e_1 = 1,6 \cdot h$ балки жорсткості; та вузловому ексцентриситету $e_2 = 1/6 h$ (рис.4.8).

Відповідно до специфікації елементів зразків ферм (рис. 4.3) верхній пояс прийнято із квадратної труби $\square 40 \times 3$, відповідно $h=40$ мм. Таким чином,

величина ексцентриситетів для даного зразка складає $e_1 = 64$ мм, $e_2 = 7$ мм відповідно.

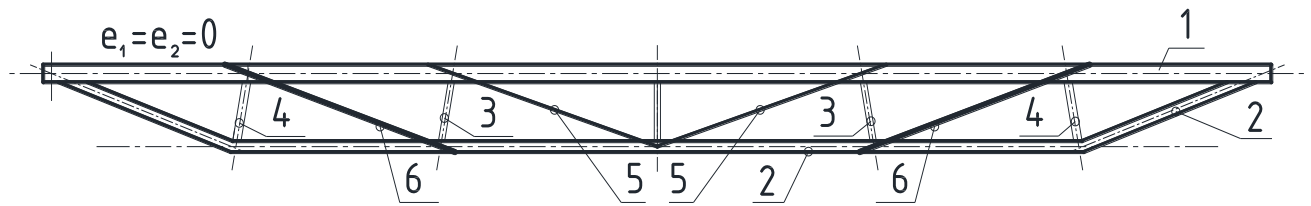


Рис. 4.7. Конструкція зразків раціональних комбінованих ферм без регулювання



Рис. 4.8. Конструкція зразків раціональних комбінованих ферм з регулюванням ексцентриситетами $e_1 - e_2$

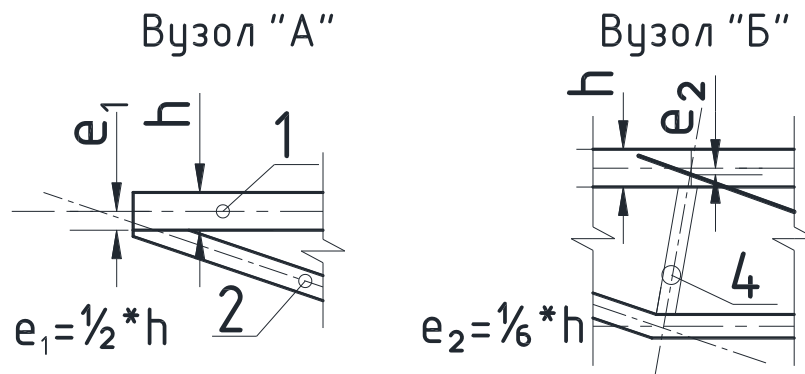


Рис. 4.9. Вузли «А» і «Б»



Рис. 4.10. Загальний вид «еталонного» зразка комбінованої ферми з раціональними параметрами



Рис. 4.11. Загальний вид зразка комбінованої ферми з раціональними параметрами та регулюванням НДС

Пояси ферми та стійки виготовлені зі сталі класу С235, розтягнуті елементи решітки із високоміцної арматури класу А400С. Усі з'єднання у конструкції зварні. Специфікацію елементів (відповідно рисунків 4.10 та 4.11) наведено у табл. 4.1.

Таблиця 4.1

Специфікація елементів зразків ферм

<i>Ферма із раціональними параметрами</i>				<i>Ферма із регулюванням НДС</i>			
<i>№</i>	<i>Тип елементу</i>	<i>Січення</i>	<i>Маса, кг</i>	<i>№</i>	<i>Тип елементу</i>	<i>Січення</i>	<i>Маса, кг</i>
1	Верхній пояс	□40x3	10.08	1	Верхній пояс	□40x3	10.08
2	Нижній пояс	□25x3	5.82	2	Нижній пояс	□25x3	5.94
3	Стойки	□15x2	0.32	3	Стойки	□15x2	0.32
4	Стойки	□20x2	0.31	4	Стойки	□20x2	0.31
5	Розкоси	●ø6	0.53	5	Розкоси	●ø6	0.53
6	Розкоси	●ø8	0.95	6	Розкоси	●ø8	0.95
Загальна маса:			18.01	Загальна маса:			18.13

Окрім конструктивної частини установки, на дослідний зразок кріпляться вимірювальні прилади. За допомогою них визначаються деформації у конструкції. Програма експерименту передбачає два способи вимірювання деформацій: механічний та електричний.

Механічним способом вимірюють прогини конструкції – вертикальні переміщення вузлів за допомогою прогиномірів. Прогиноміри кріпляться у

вузлах на нижньому поясі за допомогою затискних гвинтів. Точність вимірювання дозволяє отримувати покази прогинів до сотої долі міліметра.

Електричний спосіб вимірювання деформацій називається електротензометрія. На поверхню конструкції у відповідних точках кріпляться тензорезистори. Під дією навантаження у цих точках виникають деформації. Такі ж деформації сприймає тензорезистор і змінює значення свого опору. Величина зміни опору є еквівалентом величині деформації. Іншою складовою вимірювань є прилад, що зчитує покази з датчиків та обраховує конкретну величину деформацій. Зокрема, також можливо обрахувати величину напружень в елементах.

Процес випробування розділений на десять етапів завантажень, від 10% до 100% відповідно. На кожен етап навантаження збільшується на 40кгс у вузлі, досягаючи максимального навантаження у вузлі у $N=400\text{кгс}$ (4кН), що еквівалентно величині рівномірно розподіленого навантаження $q=800\text{кгс/м}$ (8 кН/м). Навантаження створюється за рахунок системи тяг та гідравлічних домкратів. Величина зусилля контролюється за допомогою динамометру. При досягненні необхідної кількості поділок на динамометрі (необхідної величини зусилля на домкратах) перекривається кран між насосною станцією та системою шлангів. Завдяки цьому тиск у системі та зусилля на домкратах залишається сталим впродовж всього етапу випробувань. Після процесу стабілізації знімаються покази приладів. Спочатку знімаються покази механічних приладів, а після – покази тензорезисторів. Запірний кран відкривається, подається додаткове навантаження до досягнення наступного етапу завантаження. Алгоритм дій із кожним етапом повторюється до моменту досягнення 100% навантаження $q=800\text{кгс/м}$ (8кН/м). Після того, як записані покази приладів на останньому етапі завантаження, повністю знімається навантаження з конструкції. Записуються покази приладів після зняття навантаження, т.зв. «залишкові покази». Таким чином перевіряється чи присутні залишкові деформації після навантаження.

4.3. Експериментальне дослідження роботи раціональної комбінованої сталевій ферми при симетричному навантаженні

Базовою моделлю для випробувань, в якості «еталонної», було обрано ферму із раціональними параметрами без регулювання зусиль. Відносно цього зразка в подальшому порівнювались результати теоретичних розрахунків, а також значення деформацій другого зразка, в якому застосовувались регулювання зусиль. Задля позначення зразка, модель «еталонної» ферми було пофарбовано у яскравий світло-синій колір, що можна поміти на графічних матеріалах, виконаних під час випробувань. Окрім функції маркування, шар фарби виконує захисну функцію та захищає вузли та деталі зразків від корозії.

Кінцеві опрацьовані результати випробувань показали ефективність роботи комбінованих сталевих ферм і достовірність теоретичних розрахунків.

Тут і далі в розділі брались до уваги прогини у вузлах на всіх стадіях завантаження, а епюри напружень будувались для кінцевої стадії при 100% від розрахункового навантаження.

Отже, як було зазначено вище у п.4.2, процес випробувань було розділено на 10 стадій завантаження по 10% на етап. Ламані лінії, що відображають прогин конструкції моделі, на діаграмі рисунку 4.12 побудовано для кожного етапу випробувань.

Максимальне значення прогину сягнуло 1.488 см у центральному вузлі при 100% розрахункового навантаження, що рівне експлуатаційному. Різниця між розрахунковим і дійсним значенням прогинів склала 0.12 мм, що свідчить про достовірність та відповідність розрахунків отриманим результатам.

Діаграма на рис. 4.13 засвідчує рівномірність та лінійність роботи конструкції, оскільки віддалі між точками на зламах фактично також рівномірні та майже однакові. Найбільший приріст прогинів спостерігається на перший двох етапах завантаження: 1.74 та 1.48 мм відповідно.

Такі значення прогинів на перших двох стадіях, можливо, пояснюється тим, що на початкових стадіях не усі елементи зразка включились у роботу.

Однак, починаючи із третьої стадії завантаження і до десятої (досягнення 100% навантаження), віддалі між точками ламаних ліній стають більш рівномірними, а форма самих ламаних ліній наближається до параболи.

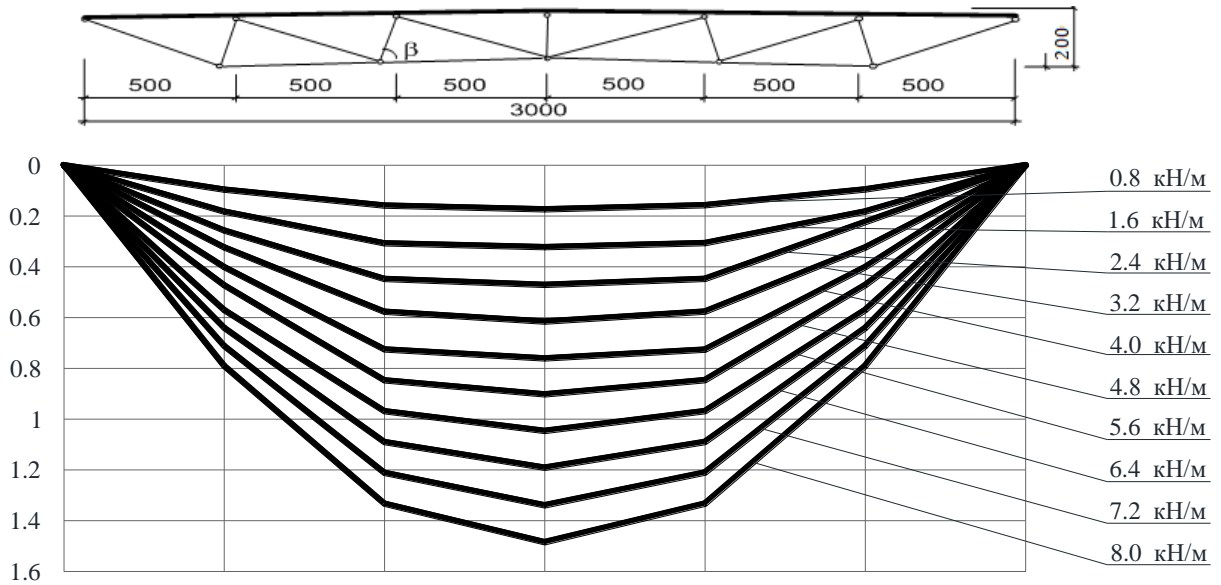


Рис. 4.12. Епюра прогинів комбінованої ферми із раціональними параметрами

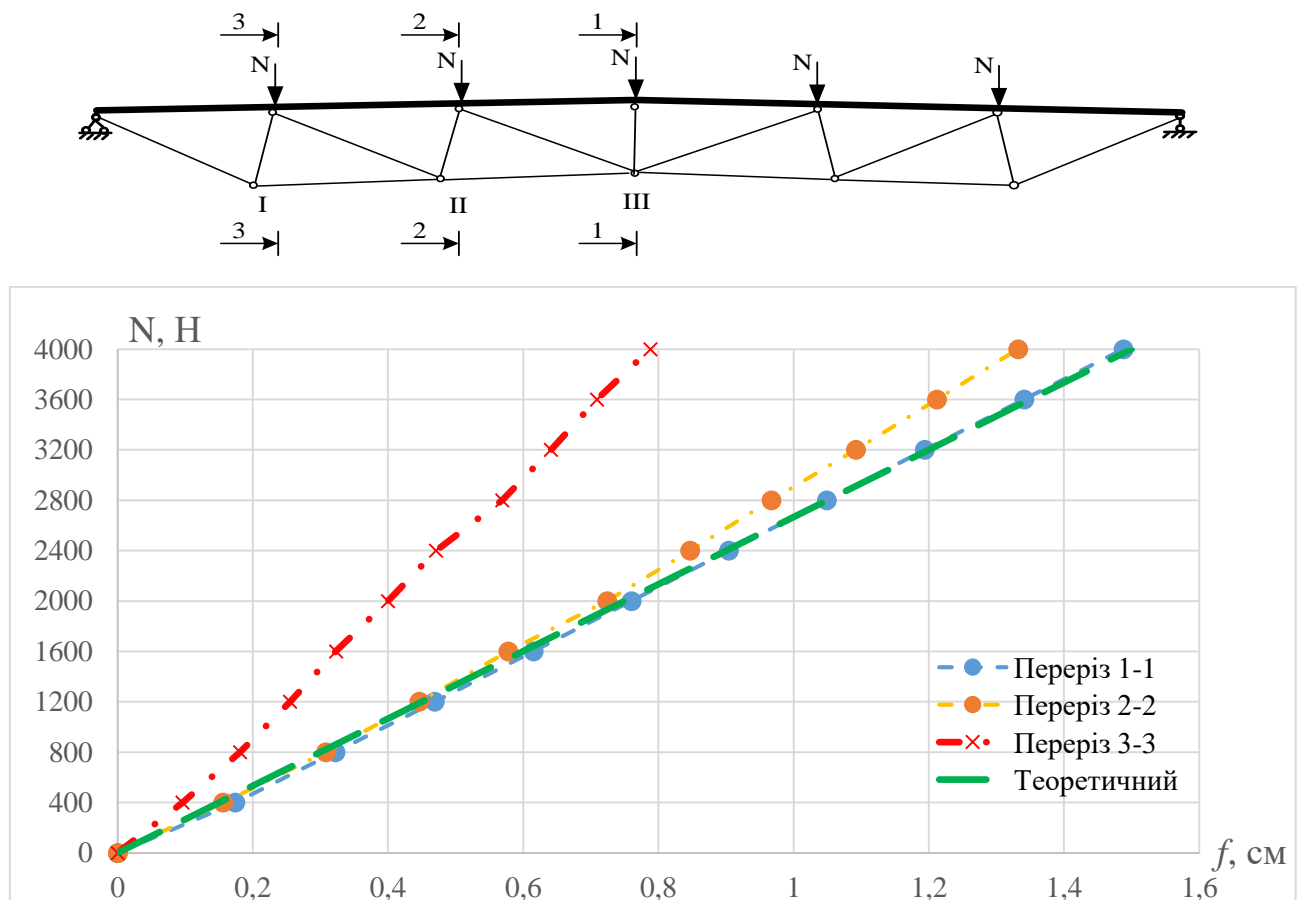


Рис. 4.13. Діаграма прогинів ферми із раціональною топоогією

Значення прогинів у вузлах конструкції

Етап	Завантаження, %	N, кг	Прогин, мм		
			I	II	III
1	10	40	0,960	1,56	1,74
2	20	80	1,81	3,08	3,22
3	30	120	2,55	4,46	4,69
4	40	160	3,23	5,78	6,15
5	50	200	4,0	7,24	7,60
6	60	240	4,71	8,47	9,04
7	70	280	5,69	9,67	10,49
8	80	320	6,41	10,92	11,94
9	90	360	7,09	12,12	13,41
10	100	400	7,88	13,32	14,88

Прирости прогинів у центральному вузлі (окрім I та II стадій завантаження) коливаються у межах 1.44 -1.47 мм.

Отже, можна зробити висновок, що конструкція працює лінійно та рівномірно. При 100% навантаження від розрахункового прогини у центральному вузлі досягають максимального значення у 1.488 см, що відповідає величині $f = l/202$. Таким чином, виконується умова $f \leq l/200$ щодо граничних прогинів за II групою граничних станів.

Дані, отримані завдяки електротензометрії, дають змогу отримати уявлення про дійсну роботу конструкції та її напружено-деформований стан.

У даному розділі розглядатиметься НДС верхнього поясу у вигляді балки жорсткості, як елементу у якому зосереджена основна (50%) маса конструкції. Зокрема, верхній пояс комбінованої ферми розглядається з точки зору регулювання НДС на стадії проектування конструкції. Для початку було досліджено НДС «еталонного» зразка. Таким чином отримано базові результати для порівняння із наступними дослідженнями інших зразків. Випробування базової моделі дало свого роду відправну точку для подальших досліджень. Результати наступних експериментів порівнювались із даними по базовій моделі, задля оцінки ефективності запропонованих методів

регулювання НДС. На рис.4.14 побудовано епюру напружень у середній лінії балки жорсткості.

Для визначення достовірності теоретичного розрахунку було порівняно дві епюри. Одна з них побудована на основі даних, отриманих з програмного комплексу «Ліра», де виконувався теоретичний розрахунок методом скінчених елементів. Друга епюра побудована у відповідності із отриманими даними експерименту, що відображають дійсну роботу моделі комбінованої сталевій ферми. Загалом, можна вважати, що дійсна робота зразка моделі комбінованої ферми відповідає теоретичним розрахункам. Суттєві відмінності у характері розподілу зусиль не спостерігаються. Напруження зростають від опори до прольоту по усій довжині ферми. Характер ліній епюри загалом співпадає із лініями, побудованими теоретично, за винятком окремих точок та/або ділянок, де відрізняються значення напружень, що не впливає на загальний розподіл. Це може пояснюватись тим, що неможливо подекуди закріпити тензорезистори у місцях характерних перерізів, на яких будується епюра напружень, отримана з ПК «Ліра». Такі датчики було розташовано максимально близько до характерних перерізів (як наприклад на опорах) аби мінімізувати похибку у результатах.

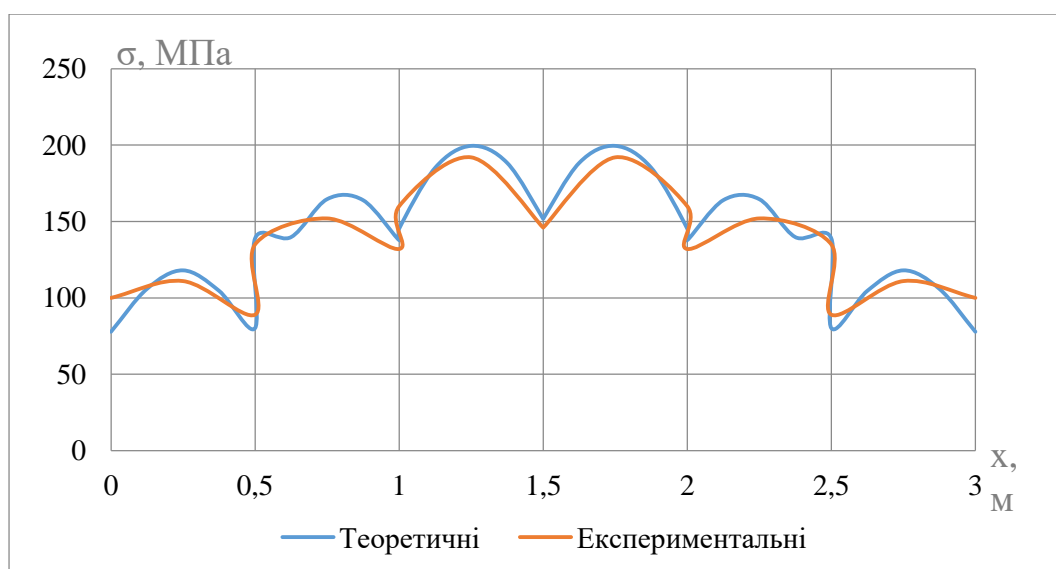


Рис. 4.14. Епюра напружень у середній лінії балки жорсткості комбінованої ферми із раціональними параметрами (симетричне навантаження)

При аналізі видно, що найбільші напруження спостерігаються у прольоті центральних панелей (на віддалі 1,25 та 1,75 м відповідно) та на стиках другої панелі із центральною (на віддалі 1 та 2 м). Величина максимального напруження у дослідному зразку моделі комбінованої ферми склала 192 МПа при 200 МПа теоретичного розрахунку. Таким чином, різниця між теоретичним та практичним результатом склала 4%, що в межах точності інженерного розрахунку.

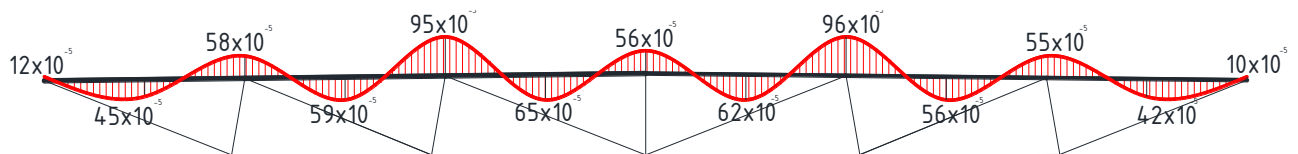


Рис. 4.15. Розподіл фібрових деформацій $\epsilon \times 10^{-5}$ в балці жорсткості ферми від симетричного навантаження (комбінована сталева ферма із раціональними параметрами)

Практичне значення склало 160 МПа при 142 МПа, отриманих з розрахунку у ПК «Ліра». Ділянки епюри в межах панелей мають форму оберненої донизу параболи із вершиною у середині прольоту панелі. На проміжних опорах парабола зміщується в сторону збільшення на величину збільшення напруження, що створюється внаслідок збільшення величини поздовжньої сили, яка діє у поясі. У верхньому поясі діють зусилля стиску.

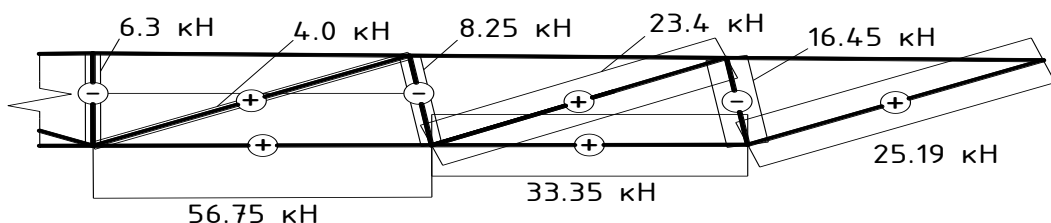


Рис. 4.16. Нормальні зусилля в шпренгельній системі комбінованої сталевій ферми з раціональними параметрами при симетричному навантаженні (+ розтяг; - стиск)

По всій довжині балки жорсткості сумарні напруження від згинальних та стискаючих зусиль не перевищують значення у 230 МПа. Значення напружень не переходять за межу текучесті, відповідно, конструкція працює у пружній стадії. Таким чином, можлива нормальна робота конструкції при експлуатаційному навантаженні. Вимоги щодо обмежень за I групою граничних станів забезпечуються. Після зняття навантаження з конструкції залишкові деформації та/або напруження не виявлено.

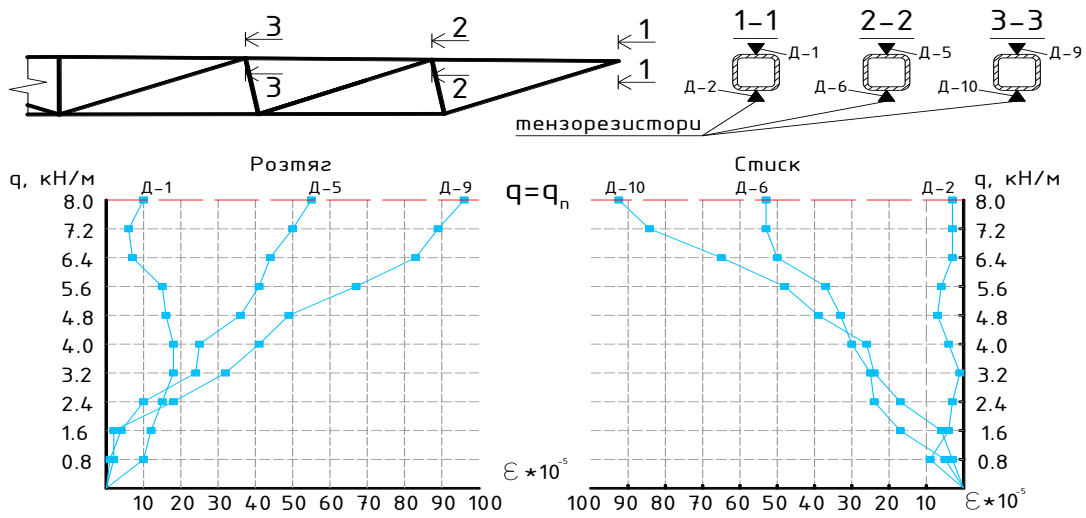


Рис. 4.17. Графіки зміни фібрових деформацій в приопорних зонах балки жорсткості комбінованої ферми із раціональними параметрами від симетричного навантаження

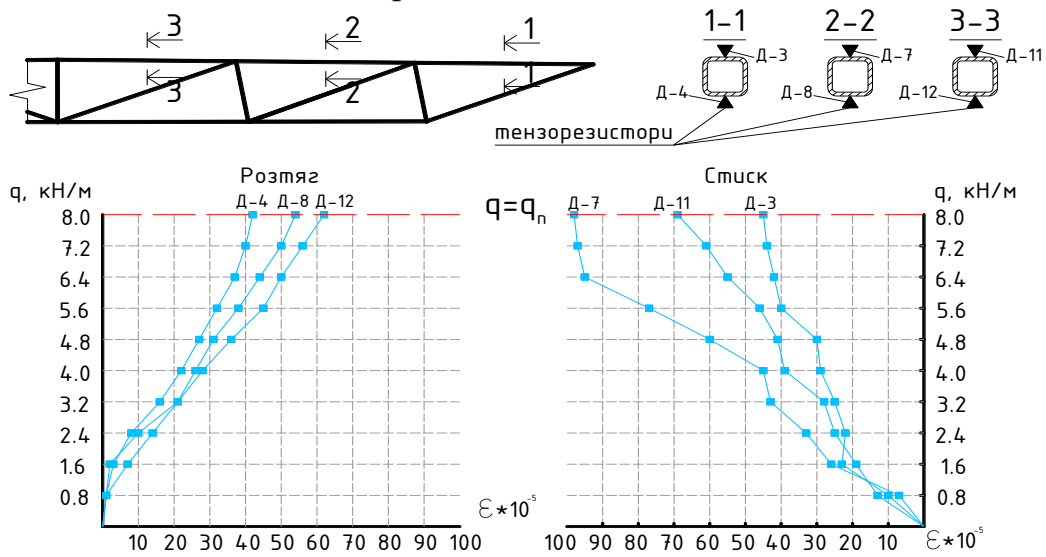


Рис. 4.18. Графіки зміни фібрових деформацій в прольотних зонах балки жорсткості комбінованої ферми із раціональними параметрами від симетричного навантаження

4.4. Експериментальне дослідження комбінованої сталеві ферми з раціональними параметрами і розрахунковим регулюванням НДС при симетричному навантаженні

4.4.1 Розрахункове регулювання НДС за допомогою опорного ексцентриситету при симетричному навантаженні. На рис. 4.19 показана схема комбінованої сталеві ферми із раціональними параметрами та регулюванням НДС. На лівій половині ферми можна побачити ексцентриситет, прикладений лише на опорі (e_1), в той час як на правій половині ферми прикладений як опорний, так і вузловий ексцентриситет (e_1, e_2).

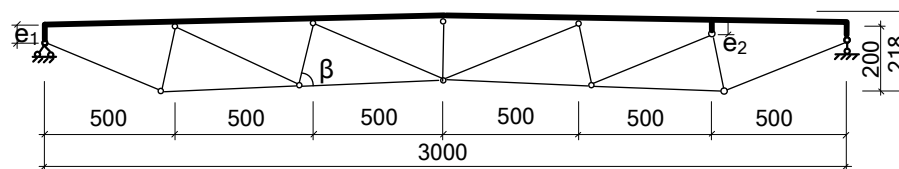


Рис. 4.19. Загальна схема комбінованої сталеві ферми із раціональними параметрами та регулюванням НДС (показаний опорний ексцентриситет e_1 та вузловий ексцентриситет e_2)

Окрім еталонного зразка, було запроєктовано модель зразка комбінованої сталеві ферми із розрахунковим регулюванням НДС запропонованим методом.

Результати випробувань, як прогини так і напруження, порівнювались із результатами теоретичних розрахунків, а також із значеннями деформацій та напружень «еталонного» зразка без регулювання НДС, що зазначалось вище. Даний зразок, на відміну від «еталонної» ферми, було пофарбовано у яскравий світло-зелений колір, задля однозначного розрізнення двох типів зразків, що також видно на графічних матеріалах, що відображають процес проведення експерименту. Аналогічно до «еталонного» зразка, шар фарби захищає вузли та деталі зразка від корозії.

Після опрацювання результатів випробувань була підтверджена ефективність роботи комбінованих сталевих ферм із розрахунковим регулюванням НДС, що виявилась навіть більшою, у порівнянні із «еталонним» зразком. Зокрема, підтверджена і достовірність теоретичних розрахунків. Процес випробувань проводився аналогічно до наведеної у п.4.2 методики. Усі величини та стадії навантажень аналогічні.

На рис. 4.20 надано розподіл фібрових деформацій у розтягнутій зоні для половини конструкції, де прикладено лише опорний ексцентриситет. У опорній зоні спостерігається скачок деформацій на величину у 49×10^{-5} . Такий скачок зумовлений дією опорного моменту, що виникає внаслідок дії нормальної сили у нижньому поясі, прикладеної до опорного вузла із ексцентриситетом e .

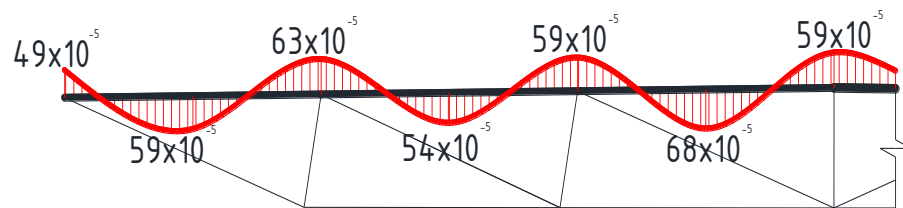


Рис. 4.20. Розподіл фібрових деформацій $\epsilon \times 10^{-5}$ в балці жорсткості ферми від симетричного навантаження (комбінована сталева ферма із раціональними параметрами та регулюванням НДС за допомогою опорного ексцентриситету)

Під дією такого моменту фактично зрівноважуються деформації у першому прольоті та на першій проміжній опорі, 59 та 63 одиниці відповідно. Різниця між ними складає приблизно 7%. Однак, спостерігається різниця між деформаціями на другій проміжній опорі та наступних прольотах.

Якщо різниця між першим та другим прольотом не є значно великою (5×10^{-5}), то між другим та третім ця величина є значно більшою (9×10^{-5}), що складає більш як 15%. В той же час зберігається значна різниця в деформації між третім прольотом та третьою і середньою опорами (68×10^{-5} та 59×10^{-5} відповідно).

Розподіл зусиль у системі підкріплень показаний на рис.4.21. У нижньому поясі спостерігається збільшення нормальної сили від опорної ділянки до середини конструкції від 29.01 до 59.42 кН. Стискаюче зусилля зменшується у стійках від опори до центральної стійки від 17.11 до 5.9 кН.

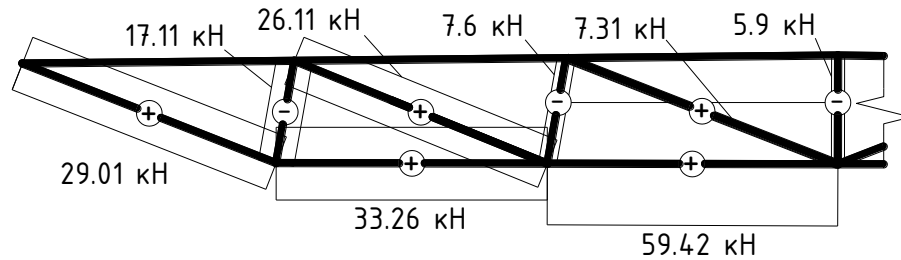


Рис. 4.21. Нормальні зусилля в шпренгельній системі комбінованої сталеві ферми з раціональними параметрами та регулюванням НДС за допомогою опорного ексцентриситету при симетричному навантаженні (+ розтяг; - стиск)

Така ж тенденція спостерігається і у розкосах, де розтягуюче зусилля зменшується від опорної частини до центральної. Так у першому від опори розкосі зусилля складає 26.11 кН, а у центральному 7.31 кН. Загалом, як характер розподілу зусиль у решітці, так і їх значення фактично співпадають із теоретичними розрахунками.

4.4.2. Розрахункове регулювання НДС за допомогою опорного та вузлового ексцентриситету при симетричному навантаженні. Друга ж половина конструкції, відповідно до схеми на рис. 4.19 виконана із двома прикладеними ексцентриситетами: один опорний e_1 та вузловий ексцентриситет e_2 . Далі розглянемо розподіл зусиль та деформацій у цій половині конструкції та порівняємо з попередньою.

Як видно з рис. 4.22, спостерігається аналогічний скачок деформацій на опорі, що викликаний тою ж поздовжньо силою, що діє у нижньому поясі із прикладеним у вузлі ексцентриситетом.

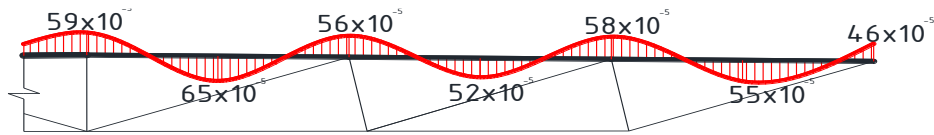


Рис. 4.22. Розподіл фібрових деформацій $\epsilon \times 10^{-5}$ в балці жорсткості ферми від симетричного навантаження (комбінована сталева ферма із раціональними параметрами та регулюванням НДС)

Різниця між першим прольотом і першою опорою складає 5% при деформації у 55×10^{-5} та 58×10^{-5} відповідно. Щодо першої та другої проміжної опори, то тут спостерігається несуттєва різниця у 2 одиниці, що складає приблизно 3% (58×10^{-5} та 56×10^{-5} відповідно). Помітно зменшена різниця у деформаціях між другим прольотом та проміжними опорами. У даному випадку різниця складає 10% та 7% відповідно для першої та другої проміжних опор, порівнюючи їх із значенням деформації у другому прольоті. Загалом можна вважати, що прикладення ексцентриситету у вузлі дає можливість регулювати зусилля у верхньому поясі. Прикладення двох ексцентриситетів дало більший ефект з огляду на епюру та характер розподілу фібрових деформацій у верхньому поясі. Порівняно із одним ексцентриситетом на опорі, прикладення двох ексцентриситетів дозволило фактично зрегулювати деформації розтягу у верхньому поясі та збільшити вплив на розподіл зусиль у балці жорсткості. Розподіл зусиль у системі підкріплень показаний на рис.4.23. У нижньому поясі спостерігається збільшення нормальної сили від опорної ділянки до середини конструкції від 28.27 до 57.04 кН.

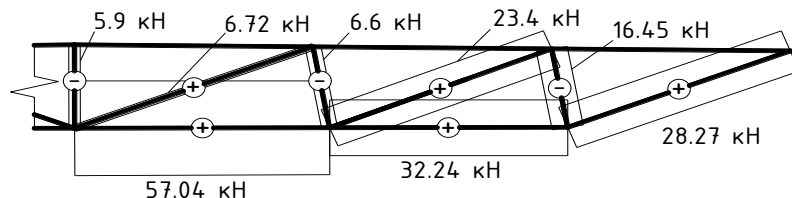


Рис. 4.23. Нормальні зусилля в шпренгельній системі комбінованої сталевій ферми з раціональними параметрами та регулюванням НДС при симетричному навантаженні (+ розтяг; - стиск)

Стискаюче зусилля зменшується у стійках від опори до центральної стійки від 16.45 до 5.9 кН. Така ж тенденція спостерігається і у розкосах, де розтягуюче зусилля зменшується від опорної частини до центральної. Так у першому від опори розкосі зусилля складає 23.4 кН, а у центральному 6.72 кН. Загалом, як характер розподілу зусиль у решітці, так і їх значення фактично співпадають із теоретичними розрахунками. В цілому експеримент підтвердив ефективність конструкції.

На рис. 4.24, 4.25 показано порівняння графіків зміни фібрових деформацій у балці жорсткості комбінованої ферми із раціональними параметрами та комбінованої ферми із раціональними параметрами та регулюванням НДС. Було порівняно деформації у перерізах на опорних та прольотних ділянках.

У «еталонному» зразку спостерігається значна різниця у величинах фібрових деформацій від крайньої опори до наступних проміжних опор при 100% завантаження конструкції. Найбільше значення сягає 96×10^{-5} на другій проміжній опорі. Зокрема, помітна й різниця між значеннями на кожній опорі: 45×10^{-5} та 41×10^{-5} відповідно.

У зразку моделі комбінованої ферми із раціональними параметрами та регулюванням НДС характер розподілу деформацій очевидно відрізняється від «еталонного» зразка. В даному випадку ламані лінії на діаграмі практично збігаються в зоні $45-60 \times 10^{-5}$. Характерною є лінія, що відповідає крайній опорній ділянці, де прикладено опорний ексцентриситет.

На останніх ділянках від 70% до 100% завантаження ця зона починає особливо активно включатись у роботу. За такого розподілу зменшується не лише максимальне значення деформацій, але й різниця у значеннях на опорних ділянках. Так, у фермі із регулюванням НДС максимальне значення деформацій складає 59×10^{-5} , порівняно із 96×10^{-5} у «еталонній», що на 38% менше. Зокрема, різниця між значеннями на опорах знизилась до 10×10^{-5} та 3×10^{-5} відповідно.

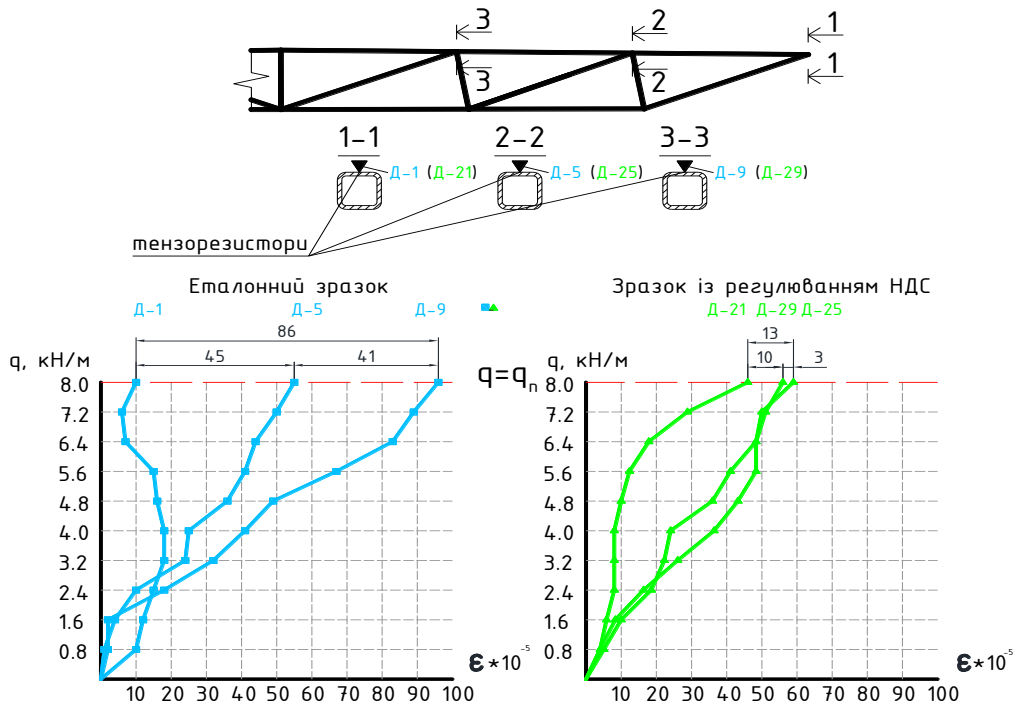


Рис. 4.24. Порівняльні графіки зміни фібрових деформацій в приопорних зонах балки жорсткості комбінованої ферми із раціональними параметрами та аналогічної із регулюванням НДС від симетричного навантаження

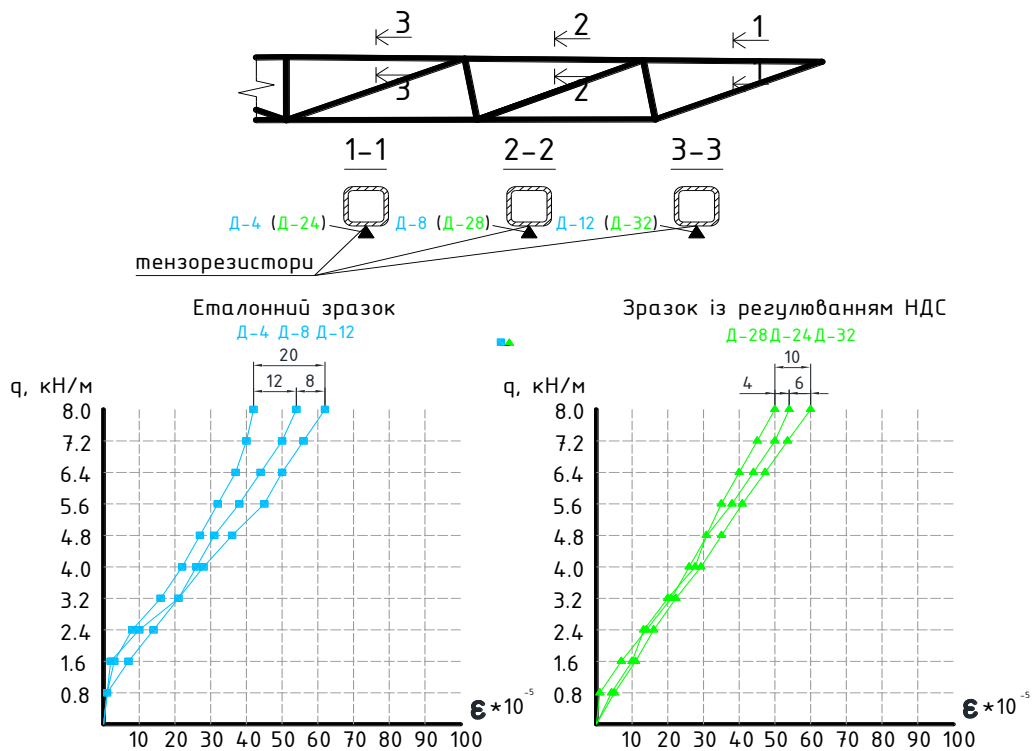


Рис. 4.25. Порівняльні графіки зміни фібрових деформацій в приопорних зонах балки жорсткості комбінованої ферми із раціональними параметрами та аналогічної із регулюванням НДС від симетричного навантаження

Щодо прольотних ділянок, розподіл деформацій є більш рівномірним, лінії більш наближені до прямих. Однак, і на прольотних ділянках в комбінованій фермі із регулюванням НДС значення деформацій менше на 2×10^{-5} : 62×10^{-5} та 60×10^{-5} відповідно, у порівнянні із «еталонною фермою». Таку різницю можна було б вважати похибкою при вимірюваннях, оскільки різниця складає $\sim 3\%$.

Проте, якщо взяти до уваги різницю між значеннями деформацій у прольотних ділянках, то у комбінованій фермі із регулюванням НДС вона рівно удвічі менша. У «еталонній» фермі різниця між прольотами становить 12×10^{-5} та 8×10^{-5} , проти 6×10^{-5} та 4×10^{-5} у фермі із регулюванням НДС. Сумарна різниця становить 20×10^{-5} , на противагу 10×10^{-5} .

4.4.3. Загальний аналіз роботи комбінованої сталеві ферми із раціональними параметрами та регулюванням НДС.

Як видно на рис. 4.26 конструкція працює рівномірно без значного та очевидного збільшення значень прогинів між стадіями завантажень. В усіх вузлах спостерігається фактично лінійне зростання прогинів. Конструкція працює аналогічно до «еталонної», де найбільший приріст також на перших двох етапах завантаження: 1.49 та 1.48 мм відповідно.

У даному випадку максимальний прогин склав 1.352 см у центральному вузлі аналогічно при 100% розрахункового навантаження. Однак, різниця між теоретичним (1.5 см) і дійсним значенням прогинів очевидно більша і складає 10%.

Конструкція ферми із розрахунковим регулюванням НДС виявилась ефективнішою за «еталонну» та у порівнянні із розрахунковими даними.

Оскільки на даній моделі прогиноміри були закріплені на усіх п'яти вузлах нижнього поясу (рис. 4.27), можна помітити відмінність у характері ламаних ліній на епюрі.

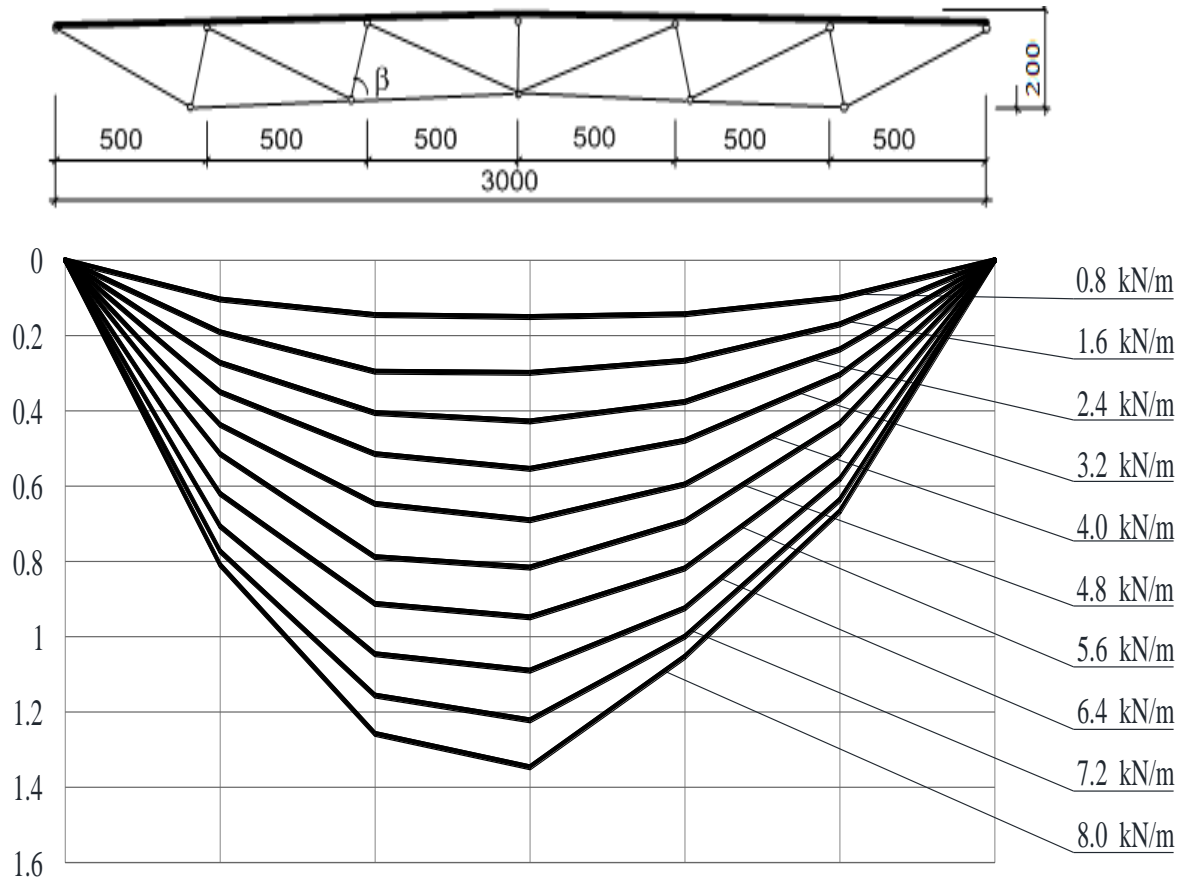


Рис. 4.26. Епюра прогинів комбінованої ферми із раціональними параметрами та розрахунковим регулюванням НДС (симетричне навантаження)

Конструкція ферми із розрахунковим регулюванням НДС виявилась ефективнішою за «еталонну» та у порівнянні із розрахунковими даними.

Оскільки на даній моделі прогиноміри були закріплені на усіх п'яти вузлах нижнього поясу (рис. 4.27), можна помітити відмінність у характері ламаних ліній на епюрі.

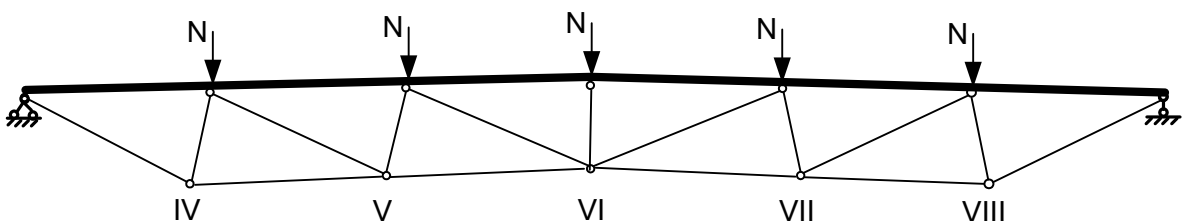


Рис. 4.27. Схема закріплення прогиномірів

Значення прогинів у вузлах конструкції

Етап	Завантаження , %	N, кг	Прогин, мм				
			IV	V	VI	VII	VIII
1	10	40	1,05	1,49	1,55	1,47	1,03
2	20	80	1,93	2,97	3,03	2,71	1,75
3	30	120	2,75	4,07	4,33	3,82	2,42
4	40	160	3,53	5,19	5,57	4,85	3,05
5	50	200	4,39	6,51	6,94	6,00	3,73
6	60	240	5,18	7,91	8,21	6,99	4,35
7	70	280	6,23	9,19	9,52	8,23	5,19
8	80	320	7,09	10,50	10,94	9,31	5,86
9	90	360	7,79	11,63	12,26	10,05	6,39
10	100	400	8,14	12,65	13,52	10,60	6,73

Для вузлів зі сторони нерухомої опори ламана лінія наближена до форми параболи, у той час як для вузлів зі сторони рухомої – більш наближена до лінійної. Однак, в межах кожного окремого вузла приріст значень прогинів залишається лінійним. Прирости прогинів у центральному вузлі (окрім 1 та 2 стадій завантаження) коливаються у межах 1.26-1.35 мм.

Як і у випадку з «еталонною», ферма із розрахунковим регулюванням НДС працює лінійно та рівномірно. При 100% навантаження від розрахункового прогину у центральному вузлі складають 13.52 мм, що у відносному значенні дорівнює прогину $f=l/222$. Умова щодо граничних прогинів за II групою граничних станів $f \leq l/200$ виконується, отже конструкція експлуатується за нормальних умов.

Також були опрацьовані результати електротензометрії для зразка із розрахунковим регулюванням НДС. Аналогічно побудовано епюру напружень для верхнього поясу у вигляді балки жорсткості та проведено аналіз дійсного напружено-деформованого стану.

Зокрема, проведено порівняння із напружено-деформованим станом зразка «еталонної» ферми. Вище було виявлено ефективнішу роботу зразка ферми із регулюванням НДС на прикладі значень прогинів двох конструкцій.

Не менш важливо порівняти дійсний НДС обох зразків. Оскільки однією із задач експерименту є перевірка та оцінка ефективності запропонованого методу розрахункового регулювання НДС. На рис. 4.28 показано дійсну епюру напружень у середній лінії балки жорсткості ферми із розрахунковим регулюванням НДС.

У першу чергу, задля перевірки достовірності теоретичного розрахунку епюру напружень при дійсній роботі конструкції було порівняно із даними, отриманих з програмного комплексу «Ліра», де виконувався теоретичний розрахунок. Характер розподілу зусиль, форма ліній на епюрі дійсної роботи зразка моделі комбінованої ферми із розрахунковим регулюванням НДС в цілому збігається із лінією, побудованою за теоретичним розрахунком (рис. 4.29).

При цьому можна відзначити, що вздовж усього верхнього поясу, практично у всіх характерних перерізах значення напружень менші, аніж розрахункові значення.

Найбільші значення напружень спостерігаються у прольотах середніх панелей, а також на другій проміжній опорі. Однак, слід зауважити, що значні напруження виникають на приопорних ділянках, оскільки прикладено опорні ексцентриситети. Опорні ділянки є найменш навантаженими і матеріал у них використовується найменше.

Це дозволяє збільшити значення згинального моменту на крайній опорі, що викликає обернений момент на першій проміжній опорі. Таким чином розвантажується друга панель, а епюра напружень вирівнюється. Характер ліній епюри загалом співпадає із лініями, побудованими теоретично, за винятком окремих точок та/або ділянок, де відрізняються значення напружень, що не впливає на загальний розподіл.

Найбільше значення напружень у моделі комбінованої ферми із розрахунковим регулюванням НДС складає 187 МПа, у той час як теоретичне значення складає 200 МПа.

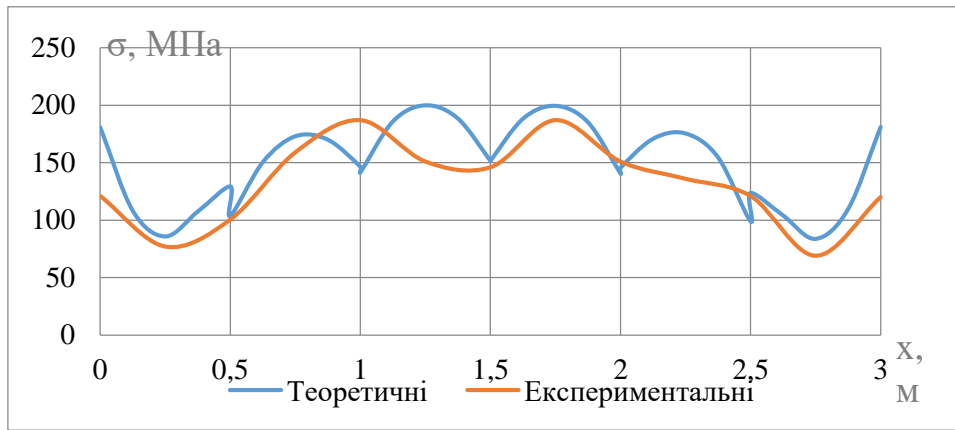


Рис. 4.29. Епюра напружень у середній лінії балки жорсткості комбінованої ферми із раціональними параметрами та регулюванням НДС

Детально аналізуючи ділянки епюри, спостерігаються найбільші значення напружень у прольоті центральних панелей та на другій проміжній опорі. Слід зауважити, що різниця між найбільшим теоретичним та практично одержаним результатом склала 7%. Таким чином вкотре підтверджується ефективність роботи комбінованих ферм при запропонованому розрахунковому методі регулювання НДС. Щодо характеру ліній, то у даному випадку у крайніх точках спостерігається різке зростання напружень через прикладений на опорі ексцентриситет, завдяки якому поздовжня сила, що діє у нижньому поясі створює додатковий згинальний момент. Далі значення напружень йдуть по спадній вздовж прольоту першої панелі. Завдяки опорному моменту досягається рівномірність напружень на першій проміжній опорі та зменшується різниця напружень. На проміжних опорах, як уже було помічено та є характерним, парабола зміщується в сторону збільшення на величину збільшення напруження, що створюється внаслідок збільшення величини поздовжньої сили, яка діє у поясі.

По всій довжині балки жорсткості сумарні напруження від згинальних та стискаючих зусиль не перевищують значення у 230 МПа. Значення напружень не переходять за межу текучесті, відповідно, конструкція працює у пружній стадії. Таким чином, можлива нормальна робота конструкції при експлуатаційному навантаженні. Вимоги щодо обмежень за I групою

граничних станів забезпечуються. Після зняття навантаження з конструкції залишкові деформації та/або напруження не виявлено.

4.5. Експериментальне дослідження роботи раціональної комбінованої сталеві ферми при несиметричному навантаженні

Окрім дослідження роботи комбінованих сталевих ферм при нормальних умовах за рівномірно розподіленого навантаження, було також досліджено їх роботу при несиметричному навантаженні (рис. 4.30). Питання роботи сталевих ферм покриття при дії несиметричного навантаження є актуальним на сьогодні. Оскільки, як показала практика, спираючись на вітчизняний та закордонний досвід, не всі конструкції однаково ефективні при роботі одночасно як на рівномірно розподілене, так і на несиметричне навантаження. Що було неодноразово висвітлено у наукових публікаціях.

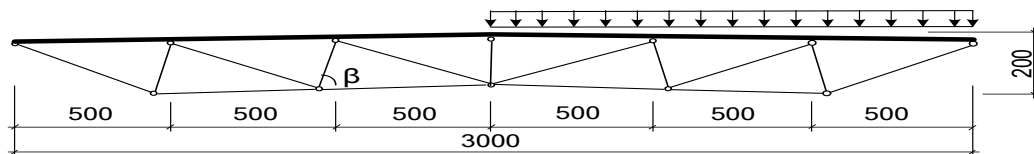


Рис. 4.30. Схема завантаження комбінованої ферми із раціональними параметрами

Задля цього було запроєктовано додаткову серію зразків, аналогічні тим, що випробовувались у попередніх двох дослідках. Однак, навантаження прикладалось лише на одну половину ферми, у трьох вузлах, але досягаючи того ж значення у $q=800\text{кгс/м}$ (8кН/м).

Як видно з результатів досліджень, результати прогинів, отриманих в результаті випробувань, виявились меншими за теоретичні: $0,993\text{ см}$ реального прогину порівняно із теоретичною величиною у $1,072\text{ см}$. Експериментальний прогин конструкції становить $f=l/302$. Таким чином, виконується умова $f \leq l/200$ щодо граничних прогинів за II групою граничних станів.

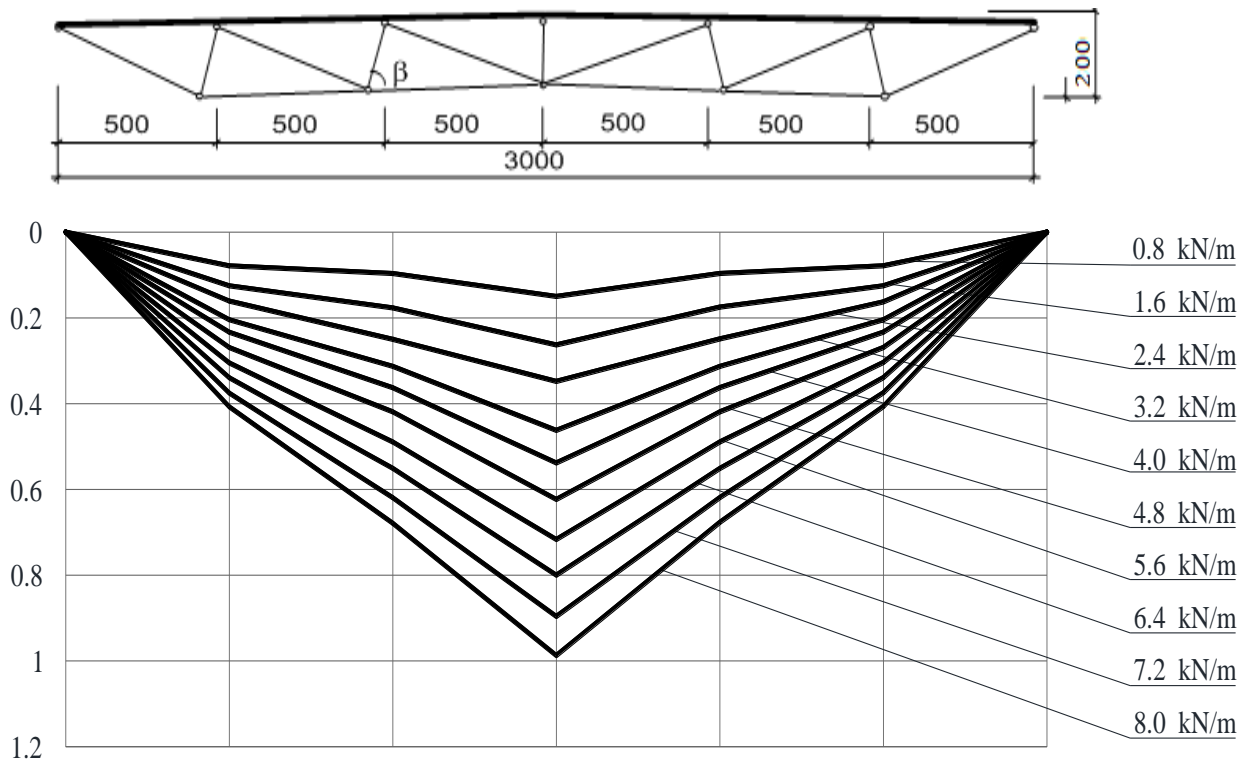


Рис. 4.31. Епюра прогинів комбінованої ферми із раціональними параметрами (несиметричне навантаження)

Аналізуючи дані із таблиці 4.6, де наведено значення прогинів на усіх стадіях завантаження, спостерігається лінійна залежність між збільшенням прогину від навантаження. Таким чином можна вважати, що при дії несиметричного навантаження конструкція працює рівномірно, без значних скачків деформацій по довжині.

Результати доводять ефективність роботи таких конструкцій та конструктивних рішень загалом при використанні комбінованих сталевих ферм у випадках несиметричного навантаження.

Дані, отримані за результатами електротензометрії показано на рис.4.32. Наведено розподіл напружень у балці жорсткості, як основного елементу, у якому сконцентровано основна частина (50%) маси усієї ферми. У порівнянні із розрахунковими (теоретичними) значеннями напружень реальні дані експерименту виявились меншими.

Значення прогинів у вузлах конструкції

Етап	Завантаження, %	N, кг	Прогин, мм		
			I	II	III
1	10	40	0,82	1,00	1,53
2	20	80	1,30	1,80	2,66
3	30	120	1,65	2,53	3,52
4	40	160	2,09	3,17	4,66
5	50	200	2,38	3,67	5,43
6	60	240	2,72	4,23	6,30
7	70	280	3,08	4,93	7,23
8	80	320	3,42	5,56	8,05
9	90	360	3,80	6,22	9,01
10	100	400	4,12	6,82	9,93

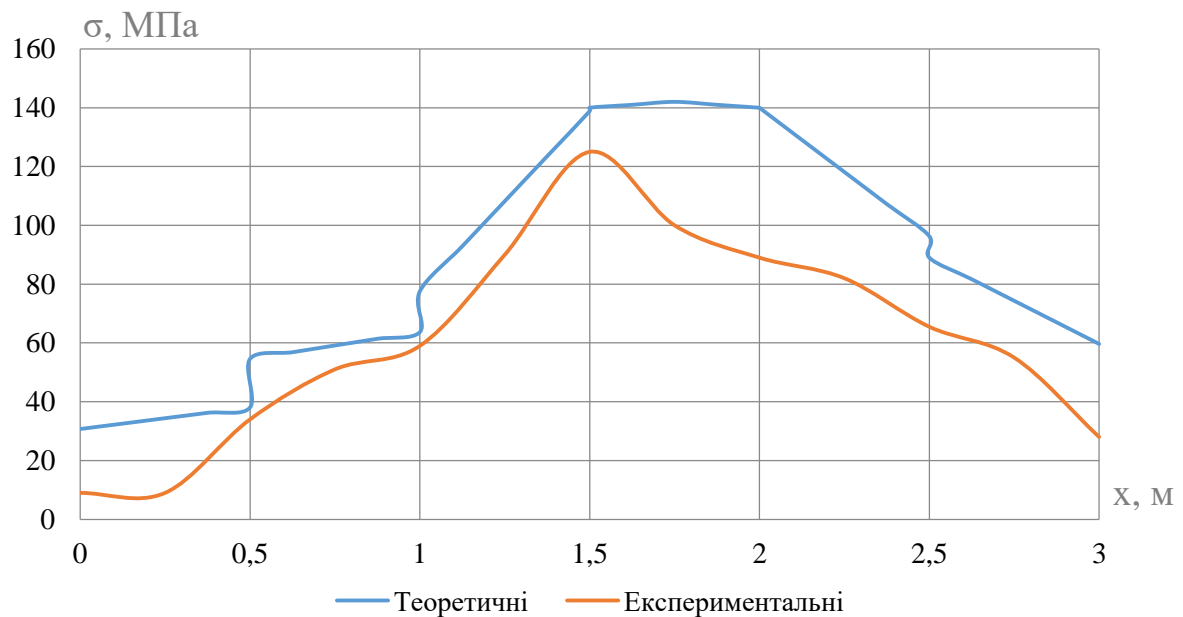


Рис. 4.32. Епюра нормальних напружень в середній лінії балки жорсткості

Максимальне теоретичне значення склало 150 МПа у середній секції під навантаженням, порівняно із реальним значенням у 135 МПа у тій самій секції. Аналогічно до значень прогинів, величини напружень показують наявність певного запасу надійності. Також слід зазначити, що значення напружень у будь-якій точці не перевищують значення у 230 МПа. Відповідно конструкція працює у пружній стадії, не перетинаючи межу текучості. Ознак

знакозмінності, порівняно із значеннями напружень та деформацій при симетричному навантаженні, не виявлено.

На рис. 4.33 показаний розподіл фібрових деформацій розтягнутої зони балки жорсткості. Як видно з розподілу, пік деформацій припадає на другу проміжну опору та третій проліт. Аналогічна поведінка конструкції спостерігалась у навантаженій частині при симетричному навантаженні. Далі, від центру конструкції до опорної частини ненавантаженої половини ферми, значення деформацій спадають. Водночас значення деформацій і напружень на ненавантаженій половині ферми менше на усіх ділянках, як прольотних, так і опорних, порівняно із аналогічними ділянками навантаженої частини ферми.

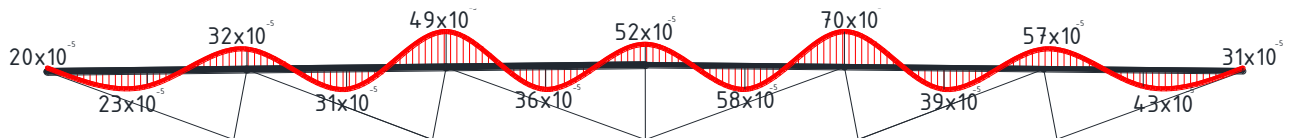


Рис. 4.33. Розподіл фібрових деформацій $\epsilon \times 10^{-5}$ в балці жорсткості ферми від несиметричного навантаження (комбінована сталева ферма із раціональними параметрами)

У решітці спостерігається закономірний розподіл зусиль (рис. 4.34). Величина стискаючого зусилля збільшується від центральних стійок до крайніх в межах від 1.40 до 6.80 кН у навантаженій частині ферми.

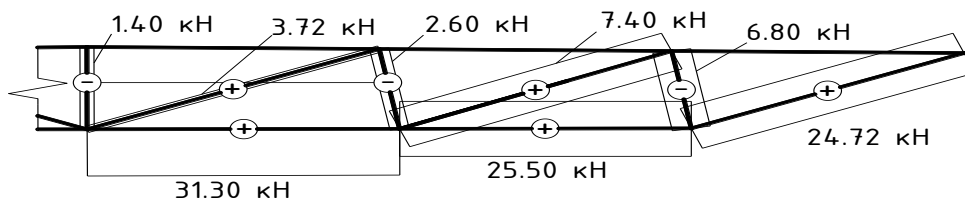


Рис. 4.34. Нормальні зусилля в шпренгельній системі комбінованої сталевій ферми з раціональними параметрами при несиметричному навантаженні (+ розтяг; - стиск)

У розтягнутих розкосах також зусилля збільшується від центру до опори,

при цьому у крайньому розкосі приблизно удвічі більше, ніж у середньому, що підтвердило теоретичні значення зусиль. Нижній же пояс характеризується збільшенням зусиль від опорної частини до центральної. Зусилля у нижньому поясі змінюються від 24.72 кН в опорній зоні до 31.30 кН в середній секції.

На рисунках 4.35 та 4.36 показані графіки фібрових деформацій балки жорсткості на опорних та прольотних ділянках відповідно.

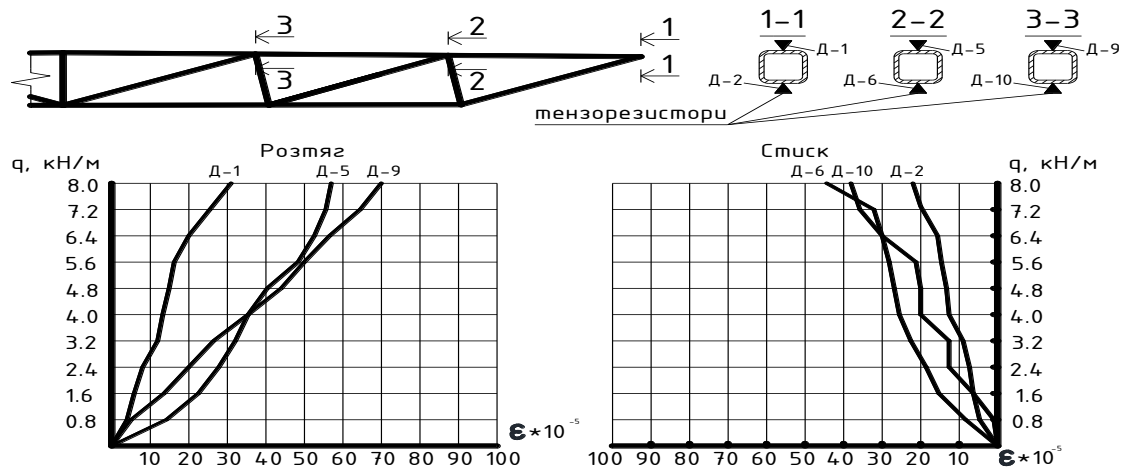


Рис. 4.35. Графіки зміни фібрових деформацій в приопорних зонах балки жорсткості комбінованої ферми із раціональними параметрами від несиметричного навантаження

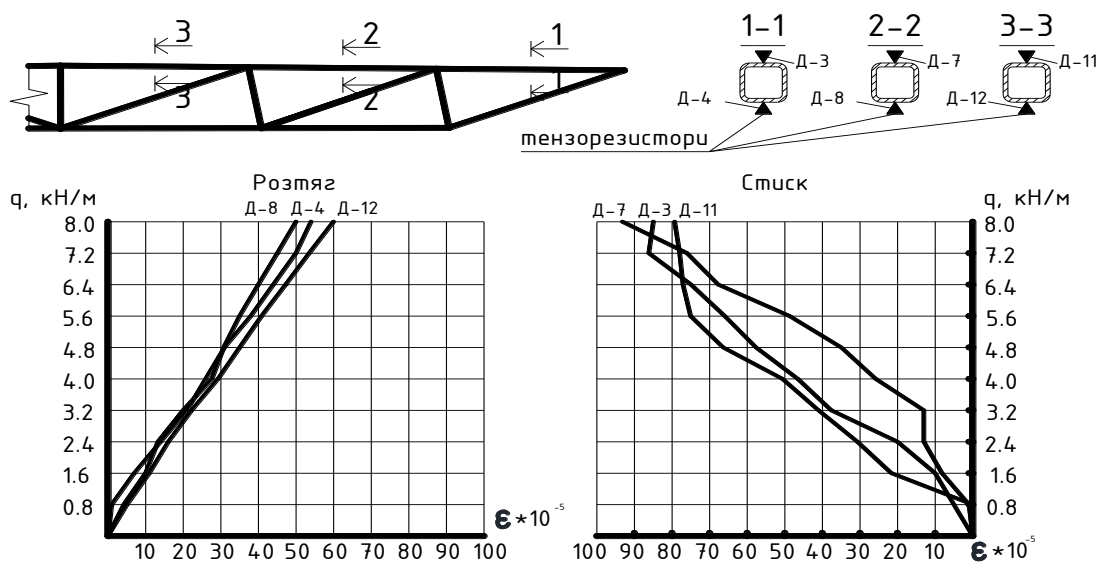


Рис. 4.36. Графіки зміни фібрових деформацій в прольотних зонах балки жорсткості комбінованої ферми із раціональними параметрами від несиметричного навантаження

4.6. Експериментальне дослідження комбінованої сталеві ферми з раціональними параметрами і розрахунковим регулюванням НДС при несиметричному навантаженні

4.6.1 Розрахункове регулювання НДС за допомогою опорного ексцентриситету при несиметричному навантаженні. Аналогічно до дослідів у пп. 4.4 та 4.5. , було проведено випробування зразка комбінованої сталеві ферми із розрахунковим регулюванням НДС запропонованим методом. Схема зразка відповідає зразку на рис. 4.3, а схема завантаження аналогічна схемі у підрозділі 4.5.

Обробка результатів, порівняння прогинів і напружень із результатами теоретичних розрахунків, а також із значеннями деформацій та напружень «еталонного» зразка без регулювання НДС залишається незмінним. Проектування та виготовлення зразків аналогічне до тих, які випробовувались на симетричне навантаження.

Робота комбінованих сталевих ферм із розрахунковим регулюванням НДС при несиметричному навантаженні підтвердила їх ефективність, що у свою чергу, зокрема, підтвердило правильність теоретичних розрахунків. Процес випробувань проводився аналогічно до наведеної у п. 4.5 методики. Усі величини та стадії навантажень аналогічні.

На рис. 4.37 показано розподіл фібрових деформацій у розтягнутій зоні для половини конструкції, де прикладено лише опорний ексцентриситет.

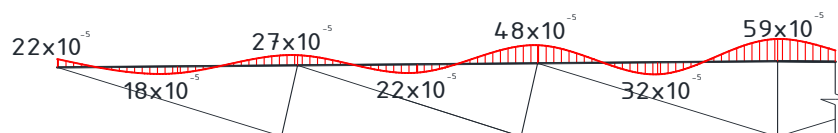


Рис. 4.37. Розподіл фібрових деформацій $\epsilon \times 10^{-5}$ в балці жорсткості ферми від несиметричного навантаження (комбінована сталеві ферма із раціональними параметрами та регулюванням НДС за допомогою опорного ексцентриситету)

В той же час зберігається значна різниця в деформації між третьою і другою проміжною опорами (59×10^{-5} та 48×10^{-5} відповідно).

Розподіл зусиль у системі підкріплень показаний на рис.4.38. У нижньому поясі спостерігається збільшення нормальної сили від опорної ділянки до середини конструкції від 11.40 до 29.76 кН.

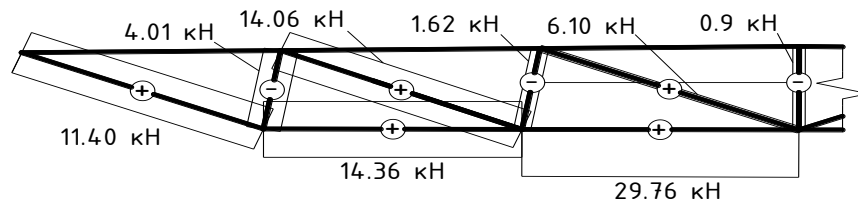


Рис. 4.38. Нормальні зусилля в шпренгельній системі комбінованої сталевій ферми з раціональними параметрами та регулюванням НДС за допомогою опорного ексцентриситету при несиметричному навантаженні (+ розтяг; - стиск)

Стискаюче зусилля зменшується у стійках від опори до центральної стійки від 4.01 до 0.9 кН. Така ж тенденція спостерігається і у розкосах, де розтягуюче зусилля зменшується від опорної частини до центральної. Так у першому від опори розкосі зусилля складає 14.06 кН, а у центральному 6.10 кН. Загалом, як характер розподілу зусиль у решітці, так і їх значення фактично співпадають із теоретичними розрахунками, однак, подекуди значення зусиль відрізнялись, однак розподіл при цьому не змінювався.

На рис. 4.39, 4.40 показані графіки зміни фібрових деформацій в приопорних та прольотних зонах балки жорсткості комбінованої ферми із раціональними параметрами та регулюванням НДС від несиметричного навантаження.

Найбільші значення фібрових деформацій в приопорних зонах спостерігається на другій проміжній опорі. В розтягнутій зоні на другій проміжній опорі становить 48×10^{-5} , в той час як у стиснутій – 60×10^{-5} .

У прольотних зонах найбільші фіброві деформації спостерігаються у третій панелі. В розтягнутій зоні у третій панелі становить 32×10^{-5} , в той час як у стиснутій – 58×10^{-5} .

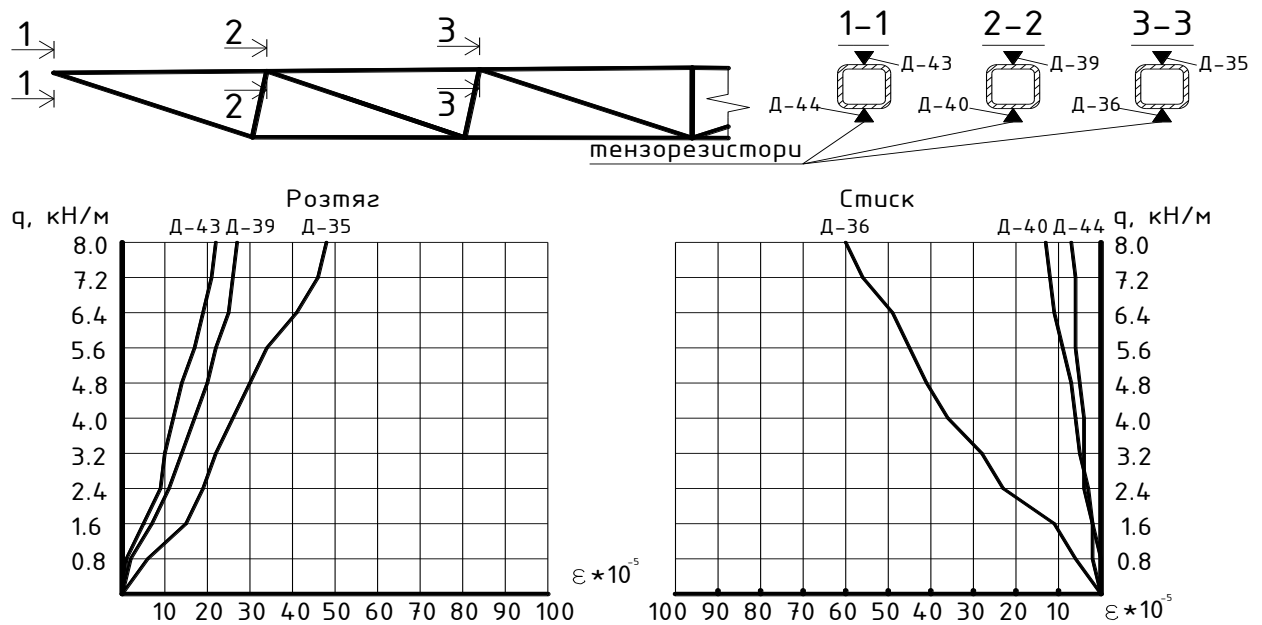


Рис. 4.39. Графіки зміни фібрових деформацій в приопорних зонах балки жорсткості комбінованої ферми із раціональними параметрами та регулюванням НДС від несиметричного навантаження

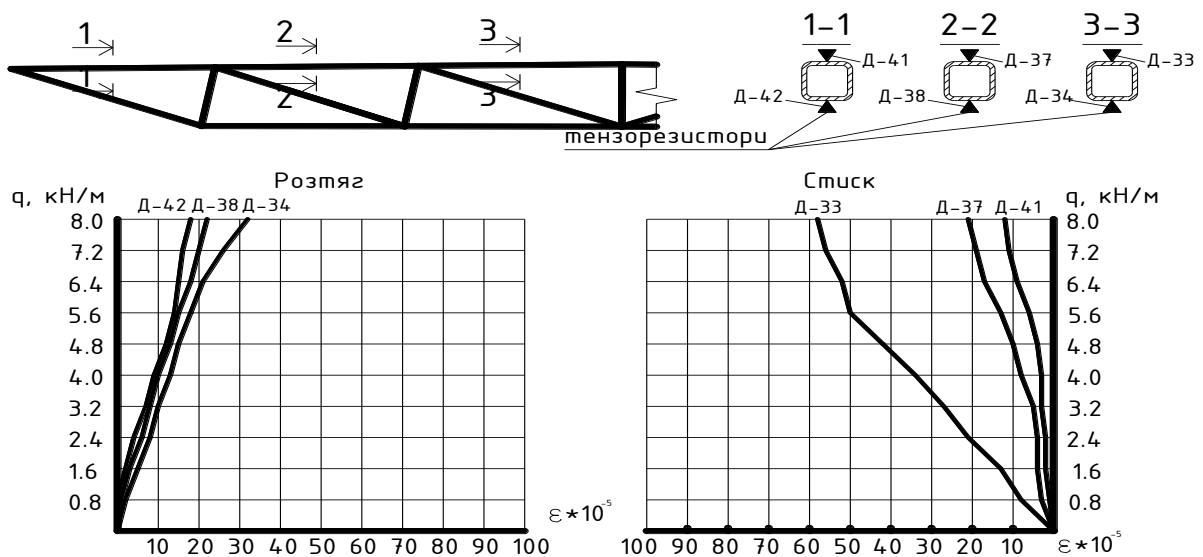


Рис. 4.40. Графіки зміни фібрових деформацій в прольотних зонах балки жорсткості комбінованої ферми із раціональними параметрами та регулюванням НДС від несиметричного навантаження

4.6.2. Розрахункове регулювання НДС за допомогою опорного та вузлового ексцентриситету при несиметричному навантаженні. Друга половина конструкції, запроектована аналогічно до схеми на рис. 4.19: один опорний e_1 та вузловий ексцентриситет e_2 . Наведено розподіл зусиль та деформацій у даній половині конструкції.

Як видно з рис.4.41, розподіл зусиль дещо відрізняється від того, який спостерігався при симетричному навантаженні. В першу чергу слід зауважити невелике значення деформацій на опорі. Невідомо, чим спричинене таке значення: відсутністю ефекту від ексцентриситету або ж відмовою датчику у даному перерізі.

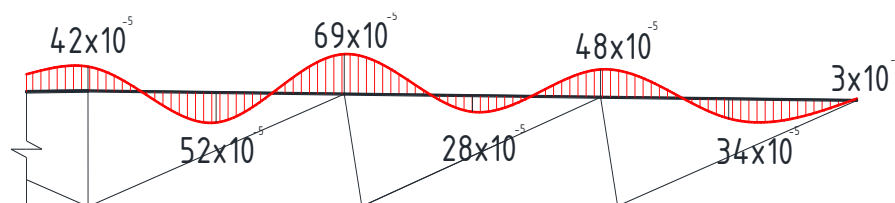


Рис. 4.41. Розподіл фібрових деформацій $\epsilon \times 10^{-5}$ в балці жорсткості ферми від несиметричного навантаження (комбінована сталева ферма із раціональними параметрами та регулюванням НДС)

Різниця між першим прольотом і першою опорою складає 40% при деформації у 34×10^{-5} та 48×10^{-5} відповідно. Щодо першої та другої проміжної опори, то тут спостерігається істотний скачок у 20×10^{-5} , що складає приблизно 43% (48×10^{-5} та 69×10^{-5} відповідно).

Загалом складно оцінити, чи прикладення ексцентриситету дає можливість регулювати зусилля при несиметричному навантаженні. Проте, деформації помітно менші, ніж у фермі без ексцентриситетів. Таким чином можна вважати, що ексцентриситет як такий покращує роботу верхнього поясу, однак питання саме регулювання зусиль при несиметричному навантаженні потребує додаткових досліджень.

Розподіл зусиль у системі підкріплень показаний на рис. 4.42. У нижньому поясі спостерігається збільшення нормальної сили від опорної ділянки до середини конструкції від 26.11 до 37.69 кН.

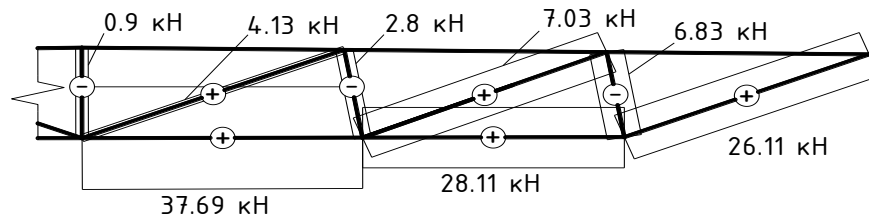


Рис. 4.42. Нормальні зусилля в шпренгельній системі комбінованої сталевій ферми з раціональними параметрами та регулюванням НДС при несиметричному навантаженні (+ розтяг; - стиск)

Стискаюче зусилля зменшується у стійках від опори до центральної стійки від 6.83 до 0.9 кН. Така ж тенденція спостерігається і у розкосах, де розтягуюче зусилля зменшується від опорної частини до центральної. Так у першому від опори розкосі зусилля складає 7.03 кН, а у центральному 4.13 кН. Загалом, як характер розподілу зусиль у решітці, так і їх значення фактично співпадають із теоретичними розрахунками. В цілому можна судити, що експеримент підтвердив ефективність конструкції.

Зокрема, ознак знакозмінності у жодній з секцій ферми не виявлено.

На рис. 4.43, 4.44 показані графіки зміни фібрових деформацій в приопорних та прольотних зонах балки жорсткості комбінованої ферми із раціональними параметрами та регулюванням НДС від несиметричного навантаження.

Найбільші значення фібрових деформацій в приопорних зонах спостерігається на другій проміжній опорі. В розтягнутій зоні на другій проміжній опорі становить 69×10^{-5} , в той час як у стиснутій – 20×10^{-5}

У прольотних зонах найбільші фіброві деформації спостерігаються у третій панелі. В розтягнутій зоні у третій панелі становить 74×10^{-5} , в той час як у стиснутій – 52×10^{-5}

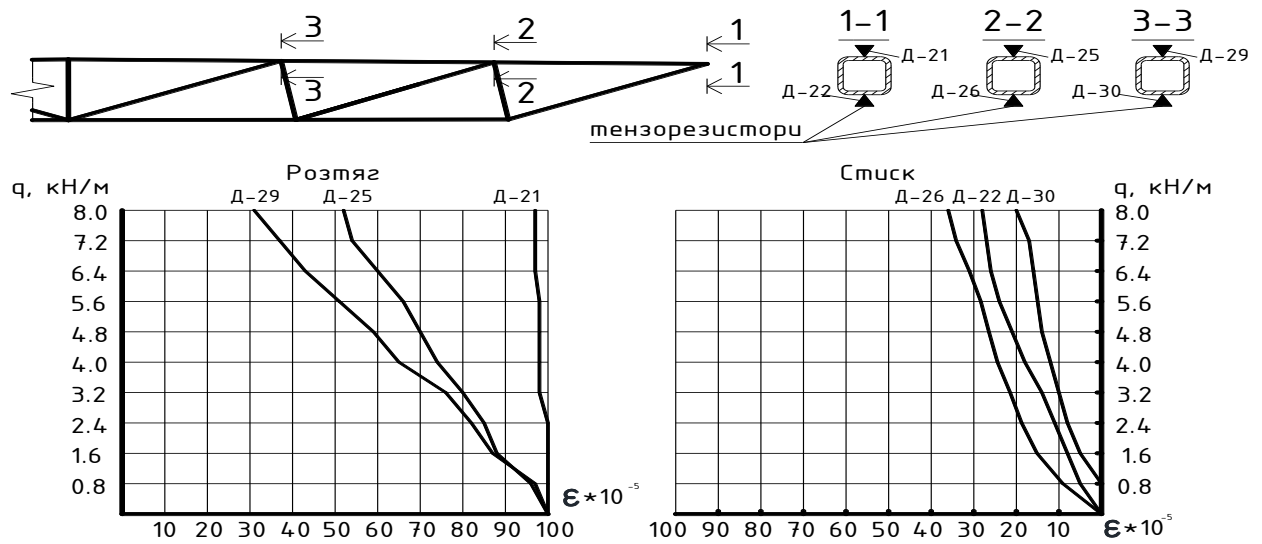


Рис. 4.43. Графіки зміни фібрових деформацій в приопорних зонах балки жорсткості комбінованої ферми із раціональними параметрами та регулюванням НДС від несиметричного навантаження

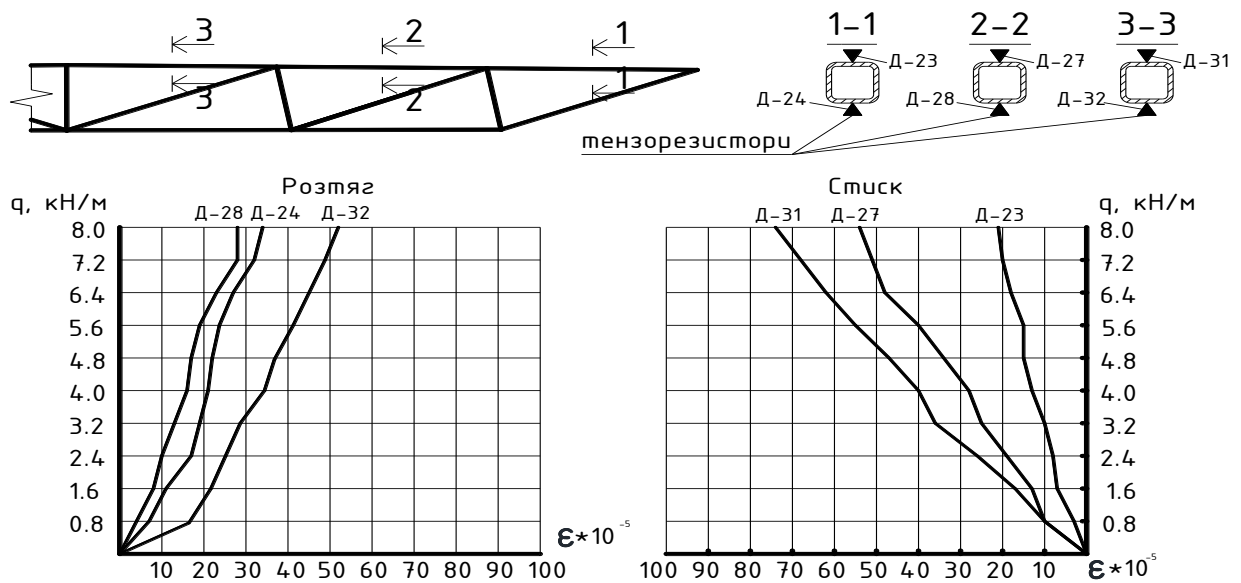


Рис. 4.44. Графіки зміни фібрових деформацій в прольотних зонах балки жорсткості комбінованої ферми із раціональними параметрами та регулюванням НДС від несиметричного навантаження

4.6.3. Загальний аналіз роботи комбінованої сталеві ферми із раціональними параметрами та регулюванням НДС при несиметричному

навантаженні. Як видно з результатів досліджень (табл. 4.7, рис. 4.45), результати реальних прогинів виявились меншими за теоретичні: 0,842см реального прогину порівняно із теоретичною величиною у 0,888 см. Експериментальний прогин конструкції становить $f=l/350$, що є менше нормативного значення $f=l/200$.

Таблиця 4.7

Значення прогинів у вузлах конструкції

Етап	Завантаження, %	N, kg	Прогин, мм				
			IV	V	VI	VII	VIII
1	10	40	0,56	0,870	1,225	1,11	0,72
2	20	80	0,95	1,56	1,86	1,94	1 23
3	30	120	1,29	2,08	2,625	2,55	1,58
4	40	160	1,6	2,77	3,395	3,31	2,0
5	50	200	1,88	3,26	4,241	3,83	2,28
6	60	240	2,17	3,8	5,01	4,42	2,62
7	70	280	2,56	4,44	5,96	5,19	3,04
8	80	320	3,0	5,05	6,849	5,86	3,42
9	90	360	3,51	5,64	7,676	6,57	3,83
10	100	400	3,83	6,24	8,436	7,19	4,23

Проаналізувавши ці дані, можна зробити висновок, що конструкція має певний запас надійності по деформаціям.

Також, аналізуючи величини прогинів симетричних вузлів, які перебувають під навантаженням та без навантаження, різниця між прогинами становить 10-15%. Таким чином можна вважати, що при дії несиметричного навантаження конструкція працює рівномірно, без значних скачків деформацій по довжині. Результати доводять ефективність роботи таких конструкцій та конструктивних рішень загалом при використанні комбінованих сталевих ферм у випадках несиметричного навантаження.

Дані, отримані за результатами електротензометрії показано на рис. 4.45. Наведено розподіл напружень у балці жорсткості, як основного елементу, у якому сконцентровано основна частина (50%) маси усієї ферми (рис. 4.46, 4.47).

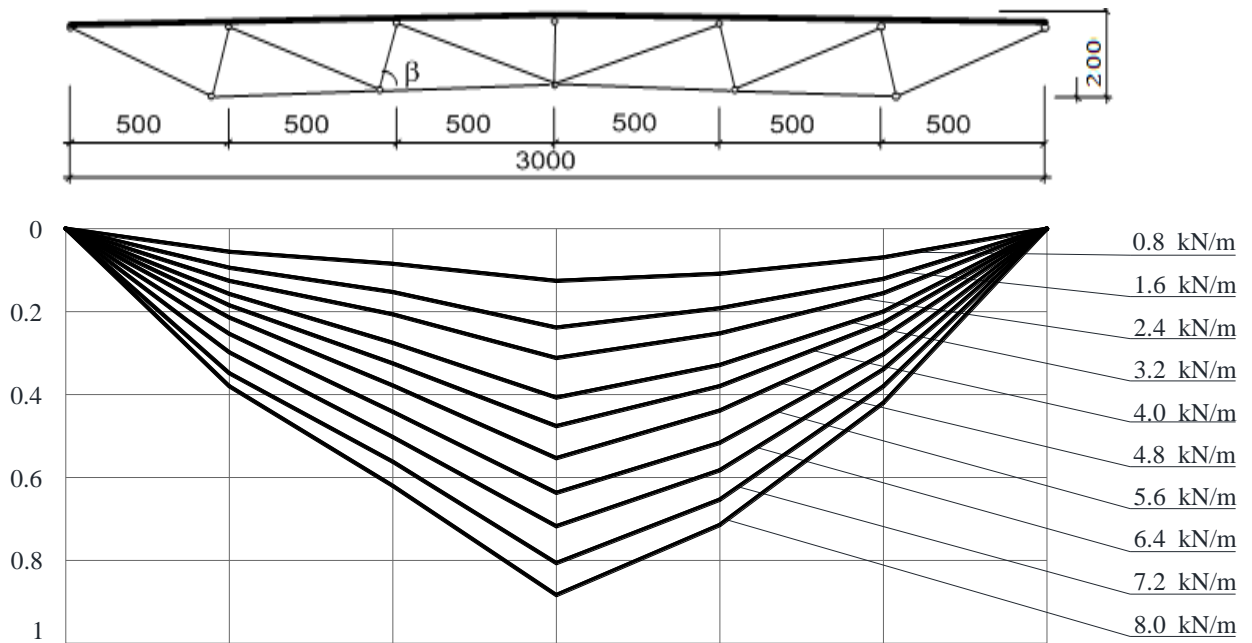


Рис. 4.45. Епюра прогинів комбінованої ферми із раціональними параметрами та розрахунковим регулюванням НДС (несиметричне навантаження)

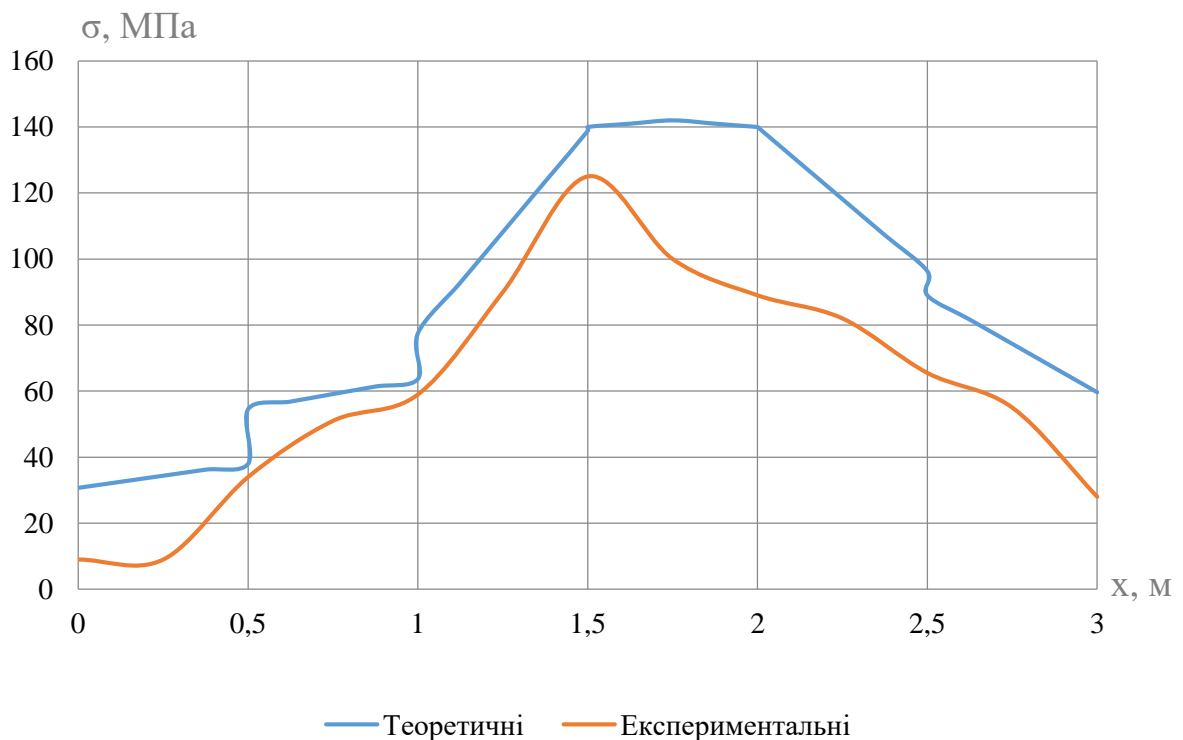


Рис. 4.46. Епюра нормальних напружень в середній лінії балки жорсткості

У порівнянні із розрахунковими (теоретичними) значеннями напружень реальні дані експерименту виявились меншими. Максимальне теоретичне

значення склало 142 МПа у середній секції під навантаженням, порівняно із реальним значенням у 125 МПа у тій самій секції. Аналогічно до значень прогинів, величини напружень показують наявність певного запасу надійності. Також слід зазначити, що значення напружень у будь-якій точці не перевищують значення у 230 МПа. Відповідно конструкція працює у пружній стадії, не перетинаючи межу текучості. Ознак знакозмінності, порівняно із значеннями напружень та деформацій при симетричному навантаженні, не виявлено.

На рис. 4.48 надано результати прогинів при несиметричному навантаженні комбінованої ферми із раціональними параметрами та регулюванням НДС. Вони показують задовільне співпадання теоретичних і експериментальних прогинів.

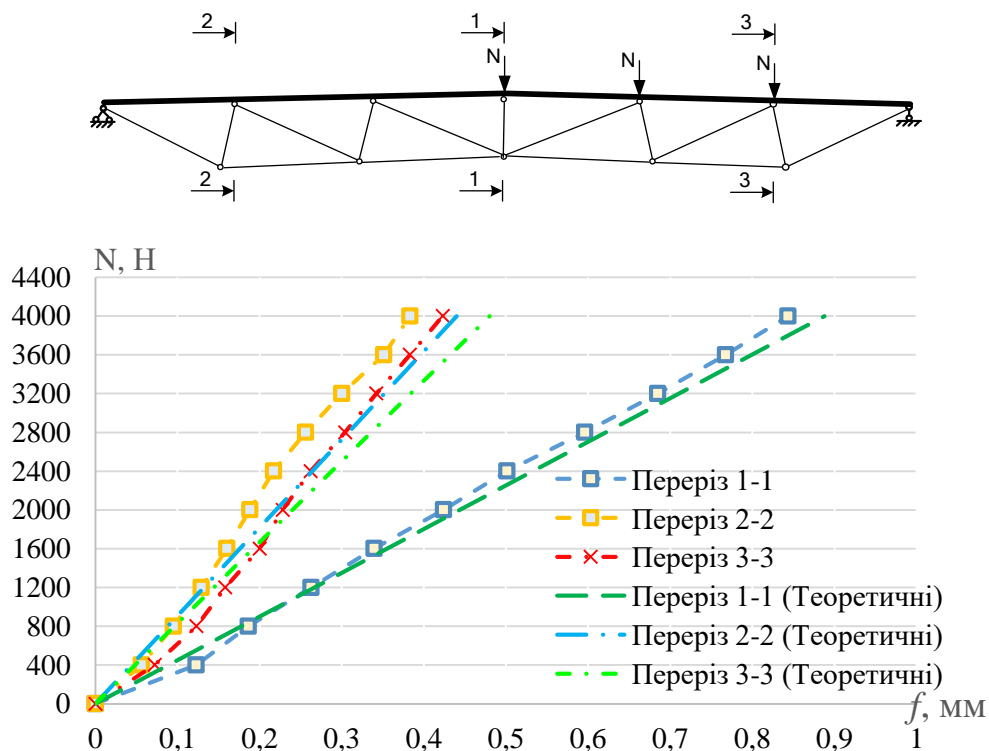


Рис. 4.47. Графіки прогинів комбінованої ферми із раціональними параметрами та регулюванням НДС (несиметричне навантаження)

4.7. Порівняння результатів проведених теоретичних розрахунків з експериментальними дослідженнями комбінованих сталевих ферм

Однаково ефективною виявилась робота як зразків із раціональними параметрами, так і зразків із раціональними параметрами та регулюванням НДС. Отримані дані в ході експериментальних досліджень виявились близькими до теоретичних розрахунків, що наочно підтверджують їх достовірність (рис. 4.49). Зокрема, це підтверджує правильність рішень, прийнятих при проектуванні дослідних зразків комбінованих ферм.

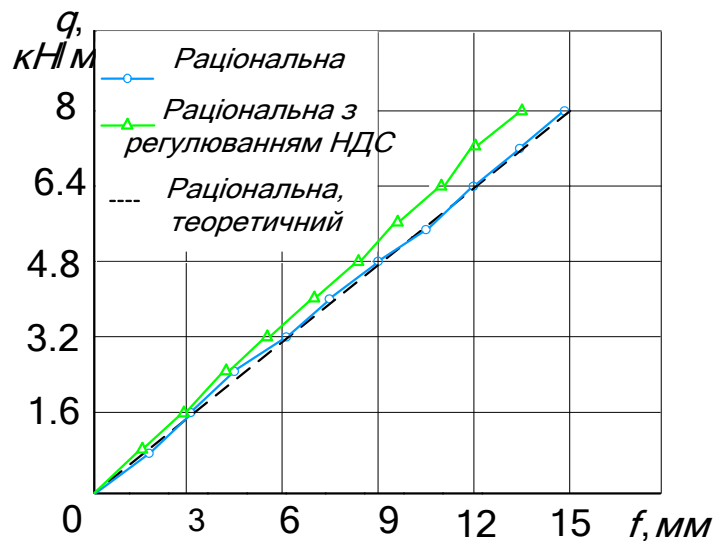


Рис. 4.48. Порівняння експериментальних та теоретичних величин прогинів ферм по середині прольоту (симетричне навантаження)

Макимальна розбіжність теоретичних і експериментальних результатів знаходиться в межах 4-8 %, що узгоджується з точністю експериментів.

Дані результатів експериментальних випробувань зразків моделей комбінованих кроквяних, що відображали роботу таких ферм під експлуатаційним навантаженням добре узгоджуються з теоретичними розрахунками.

Проведені експериментальні дослідження на модельних зразках комбінованих кроквяних ферм підтверджують висунуту наукову гіпотезу, що раціональне проектування комбінованих ферм доцільне шляхом використання нових раціональних конструктивних форм і топології з розрахунковим регулюванням НДС.

Напружено-деформований стан зразків моделей комбінованих кроквяних ферм із регулюванням НДС характеризується рівномірністю розподілу напружень у перерізах по довжині верхнього поясу та достатніми показниками жорсткості. Прогини зразків моделей наведено у табл. 4.8.

Таблиця 4.8

Прогини раціональної ферми і раціональної з регулюванням НДС при симетричному навантаженні

Навантаження в кН/м	Прогини в мм						
	Експериментальні				$\frac{f_{ет} - f_{бе}}{f_{бе}} \cdot 100\%$	Теоретичні	
	Раціональна		Раціональна з регулюванням НДС			Раціональна	
	Абсолютні $f_{ет}, \text{мм}$	Відносні $f_{ет}/l$	Абсолютні $f_{бе}, \text{мм}$	Відносні $f_{бе}/l$		Абсолютні $f_{ет}, \text{мм}$	Відносні $f_{ет}/l$
1	2	3	4	5	6	7	8
1.6	3,22	$\frac{1}{931}$	3,03	$\frac{1}{990}$	6,27	3	$\frac{1}{1000}$
3.2	6,15	$\frac{1}{487}$	5,57	$\frac{1}{538}$	10,4	6	$\frac{1}{500}$
4.8	9,04	$\frac{1}{331}$	8,21	$\frac{1}{365}$	10,1	9	$\frac{1}{333}$
6.4	11,94	$\frac{1}{251}$	10,94	$\frac{1}{888}$	9,1	12	$\frac{1}{250}$
8	14,88	$\frac{1}{201}$	13,52	$\frac{1}{221}$	10,0	15	$\frac{1}{200}$

Підтверджено теоретично розраховану зміну зусиль та напружень у верхньому поясі балки жорсткості за рахунок розрахункового регулювання НДС, тобто одержана раціональна конструкція і встановлено, що напружено-деформований стан комбінованих кроквяних ферм на всіх етапах завантаження відповідає розрахунковим значенням.

Таким чином, отримані результати експериментальних випробувань підтверджують висунуту гіпотезу щодо доцільності раціонального проектування та прийнятність запропонованої узагальненої розрахункової схеми комбінованих конструкцій із раціональною топологією, доцільність та можливість регулювання НДС розрахунковим методом і досягнення рівнонапруженого стану в балці жорсткості.

Висновки до розділу

1. Проведено дослідження роботи зразків комбінованих сталевих ферм, аналіз НДС балки жорсткості, як основного елемента конструкції.
2. Виконано перевірку несучої здатності за I та II групою граничних станів в пружній стадії. Встановлено, що значення напружень у перерізах та прогинів у вузлах не виходять за межі встановлених обмежень.
3. Проведено дослідження роботи зразків при несиметричному навантаженні. Встановлено відсутність знакозмінних зусиль.
4. Проведено перевірку запропонованого методу регулювання НДС у балці жорсткості, порівняння із НДС еталонного зразку. Встановлено, що різниця між крайніми значеннями фібрових деформацій у розтягнутій зоні приопорних ділянок зменшилась у 6.6 разів, а у прольотній зоні – у 2 рази.
5. Експериментальним випробуванням визначено величини руйнуючого навантаження, коефіцієнту запасу. Встановлено, що руйнуюче навантаження $q_p=1160$ кг/м, а коефіцієнт запасу $k_3=1.45$. Проведено аналіз та встановлено характеристику видимих руйнувань при виході конструкції з експлуатації. Встановлено, що основним видимим руйнуванням був вихід конструкції з площини, що при руйнуючому навантаженні унеможливило будь-яку її подальшу експлуатацію. При огляді контрукцій після повного зняття навантаження та завершення експерименту встановлено, що руйнування зварних швів, втрата місцевої стійкості елементів, змінання стінок відсутні.

6. Встановлено, що після зняття навантаження в обох зразках залишкові напруження та деформації відсутні.

7. Встановлено, що при симетричному навантаженні максимальне напруження у зразку комбінованої ферми із раціональними параметрами $\sigma_{\max}=192$ МПа, прогин $f=1.488$ см, а для комбінованої ферми із раціональними параметрами та регулюванням НДС – $\sigma_{\max}=187$ МПа, прогин $f=1.352$ см.

8. Визначено, що Збіжність екпериментальних результатів несучої здатності і деформативності моделей комбінованих ферм з теоретичними складає 89-95 %.

РОЗДІЛ 5

**ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ТА ЕКОЛОГІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ І
РЕКОМЕНДАЦІЇ З РОЗРАХУНКУ, РАЦІОНАЛЬНОГО
ПРОЕКТУВАННЯ ТА ВИКОРИСТАННЯ КОМБІНОВАНИХ
СТАЛЕВИХ ФЕРМ**

**5.1. Екстраполювання результатів дослідження 30 м комбінованої
сталеві ферми на прольоти 12 м, 15 м, 18 м, 24 м**

Провівши практичну частину досліджень у вигляді силових випробувань зразків моделей комбінованих сталевих ферм, було опрацьовано та проаналізовано їх результати. Відповідність теоретичним розрахункам підтвердила достовірність отриманих результатів, ефективність запроєктованих конструкцій. Таким чином було отримано нову ефективну конструктивну форму ферм покриття.

З урахуванням того, що для порівняння приймалися конструкції ферм покриття відповідно до ДСТУ Б В.2.6-74:2008, доцільно взяти до уваги весь каталог ферм, представлених у стандарті. Окрім досліджуваних у попередніх розділах ферм прольотом 30 м, ДСТУ поширюється також на ферми прольотом 18 та 24 метри.

Аналогічно було запроєктовано раціональні комбіновані сталеві ферми прольотами 18 та 24 метри за принципами та підходами, наведеними у попередніх розділах. Верхній пояс запроєктований у вигляді нерозрізої балки жорсткості із гнутих профілів прямокутного (або за доцільності квадратного) перерізу. Нижній пояс проектувався також нерозрізним, квадратного перерізу. Закріплення решітки до поясів виконано шарнірно. Стійки підібрані різних перерізів задля економії матеріалу з урахуванням стійкості кожної з них. Розтягнуті елементи решітки у виді розкосів запроєктовані із високоміцної арматури класу А400С.

Ферми прольотами 30 та 24 метри містять шість панелей, в той час як ферма прольотом 18 метрів містить 4 панелі. Таким зберігається довжина панелі у межах 4-5 м.

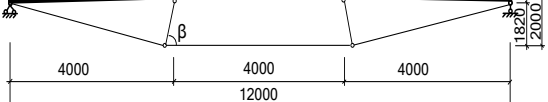
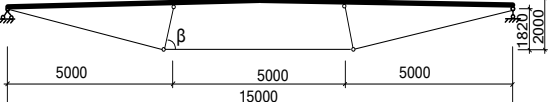
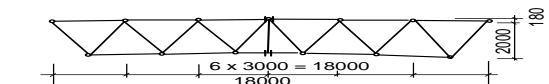
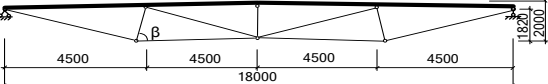
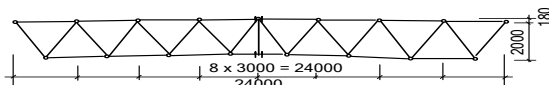
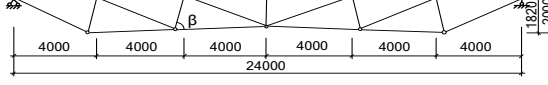
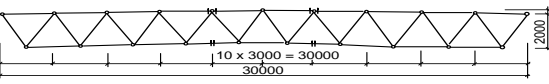
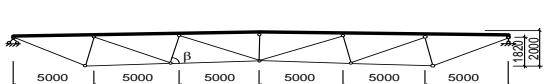
Схеми існуючих ферм, відповідно до ДСТУ, а також запропонованих нових ферм наведені у таблиці 1. Зведені результати порівняння маси ферм за ДСТУ та раціональних комбінованих ферм наведено у таблиці 2.

На даний час розроблені нами нові раціональні конструктивні комбіновані форми систем покриттів, з меншими габаритами і матеріаломісткістю в порівнянні з існуючими аналогами (табл. 5.1, б).

Такі раціональні конструктивні форми комбінованої сталеві ферми (мінімальної маси) за геометричними параметрами (обрис ферми) і фізичними (розподіл матеріалу між елементами ферми). Вони дозволяють знизити металомісткість та трудомісткість виготовлення за рахунок спрощення конструктивної схеми, більш раціональної роботи, зменшення кількості елементів та вузлів, що в загальному підвищує надійність роботи таких конструкцій.

Таблиця 5.1

Схеми раціональних комбінованих ферм для прольотів 12-30 м

а) відповідно до ДСТУ	б) запропоновані та розроблені
Не застосовується	
Не застосовується	
	
	
	

Справедливості зарди, слід зазначити, що рішення, запропоновані для ферм довжиною 15 м та 12 м не є власною розробкою і не були розроблені у ході даних дисертаційних досліджень. Такі конструкції належать до розробки д.т.н., проф. Гоголя М.В. та були представлені у його монографії [19]. Проте, у розділі техніко-економічного порівняння подаються комплексно із іншими раціональними конструкціями. Таким чином, показаний повний перелік раціональних конструкцій, запропонованих для застосування.

У конструкціях ферм довжиною 12 та 15 метрів застосовано метод декомпозиції конструкції. Верхній пояс також представлений у вигляді балки жорсткості на пружних опорах. Рівність напружень у перерізах досягається регулюванням зусиль за рахунок зміни жорсткості опори.

Як видно з таблиць 5.2 конструкції комбінованих раціональних ферм із розрахунквим регулюванням напружено деформованого стану є меншими за масою, порівняно із фермами покриття, наведеними у ДСТУ Б.В.2.6-74:2008.

Таблиця 5.2

Порівняння маси ферм за ДСТУ із запропонованими

ДСТУ				Раціональні			
q, kN/m	Проліт, м			q, kN/m	Проліт, м		
	30	24	18		30	24	18
1,3	1801	-	-	1,3	1601	-	-
1,5	2142	1237	-	1,5	1870	1025	-
1,8	2391	1438	-	1,8	2065	1194	-
2	2751	-	-	2	2353	-	-
2,2	-	1762	-	2,2	-	1438	-
2,4	-	-	929	2,4	-	-	822
2,6	-	1959	-	2,6	-	1587	-
2,9	-	2274	-	2,9	-	1820	-
3,2	-	-	1112	3,2	-	-	982
3,9	-	-	1352	3,9	-	-	1187
4,3	-	-	1497	4,3	-	-	1285

Прим.: у таблиці наведені значення маси ферми при певному прольоті та навантаженні, на яке розрахована конструкція. У клітинках зі знаком «-» навантаження для даного прольоту не застосовується.

Наприклад, ефективність розглянутих у попередніх розділах раціональних комбінованих кроквяних ферм прольотом 30 м складає від 12.5 до 17%, порівняно із типовими фермами.

У таблиці 5.3 наведено відсоток ефективності раціональних комбінованих ферм порівняно із типовими фермами, наведеними у ДСТУ Б.В.2.6-74:2008. Також у таблиці зазначено абсолютну різницю у масі в кілограмах для кожного з варіантів при різних прольотах та величинах навантаження.

Аналізуючи дані з табл.5.3 для прольоту ферм у 30 м., в абсолютних величинах різниця у масі складає від 200 кг до 398 кг. Раціональні комбіновані ферми прольотом 30 м мають меншу масу, ніж для аналогічного навантаження у ферм, що наведені у ДСТУ.

Таблиця 5.3

Відсоток ефективності комбінованих ферм порівняно з фермами за ДСТУ

Навантаження	30 м	24 м	18 м
1,3 кН/м	12,49 (200)	-	-
1,5 кН/м	14,55 (272)	20,68 (212)	-
1,8 кН/м	15,79 (326)	20,44 (244)	-
2.0 кН/м	16,91 (398)	-	-
2,2 кН/м	-	22,53 (324)	-
2,4 кН/м	-	-	13,02 (107)
2,6 кН/м	-	23,44 (372)	-
2,9 кН/м	-	24,95 (454)	-
3,2 кН/м	-	-	13,24 (130)
3,9 кН/м	-	-	13,90 (165)
4,3 кН/м	-	-	16,50 (212)

Прим.: у таблиці наведено % ефективності за масою, в дужках наведено різницю в масі У клітинках зі знаком «-» навантаження для даного прольоту не застосовується.

Аналогічною є ситуація для ферм прольотами 18 та 24 м. Запропоновані варіанти раціональних констрцій є меншими за масою, порівняно із аналогічними конструкціями за ДСТУ.

Тим більша різниця у масі між раціональною фермою та фермою за ДСТУ, чим більше значення навантаження на погонний метр ферми. До прикладу, різниця у масі при навантаженні $q=1.3$ т/м складає 200 кг, для навантаження $q=1.5$ т/м складає 272 кг, $q=1.8$ т/м – 326 кг, а для ферм, що розраховані на навантаження $q=2.0$ т/м різниця складає 398 кг. Окрім збільшення самої різниці мас, зростає також і різниця у відсотках між значеннями мас ферм.

5.2. РЕКОМЕНДАЦІЇ З РАЦІОНАЛЬНОГО ПРОЕКТУВАННЯ КОМБІНОВАНИХ СТАЛЕВИХ ФЕРМ З РЕГУЛЮВАННЯМ НДС

5.2.1. Загальні відомості

1.1. Дані рекомендації розроблено при проектуванні комбінованих сталевих ферм покриття прольотом 18-30 м.

1.2. Ферми рекомендовано застосовувати у спорудах громадського, адміністративного, промислового та спортивного призначення.

1.3. За основу рекомендацій прийняті вимоги, наведені у ДСТУ Б В.2.6-74:2008 «Ферми сталеві кроквяні з гнutoзварних профілів прямокутного перерізу»

1.4. Дані ферми призначені для улаштування покриттів у опалюваних приміщеннях, приміщеннях із неагресивним або слабоагресивним середовищем, для будь-яких температурних зон.

1.5. Комбіновані ферми покриття можуть бути влаштовані по сталевих та залізобетонних колонах.

5.2.2. Формоутворення комбінованих ферм

- 2.1. При виборі раціональної топології ферми рекомендовано обирати шпренгельний тип ферми;
- 2.2. Найбільш раціональними з точки зору мінімізації витрат сталі, а також витрат на виготовлення та монтаж, є наступна конструктивна форма ферм: Пратта (N – ферма).
- 2.3. Раціональне співвідношення маси верхнього поясу ферми до маси всієї ферми – рівне 50 %.
- 2.4. Раціональний кут нахилу стиснутих стержнів решітки сталевій комбінованій ферми - приблизно 80°.
- 2.5. Для ферм прольотом 30 та 24 м кількість панелей верхнього поясу – шість.
- 2.6. У балці жорсткості комбінованих ферм прольотом 30 та 24 м раціональна кількість проміжних пружних опор – п'ять.
- 2.7. Раціональна розрахункова схеми комбінованих ферм, незалежно від прольоту: верхній і нижній пояси – нерозрізні, а приєднання елементів решітки – шарнірне.
- 2.8. У розтягнутих елементах решітки комбінованих ферм (розкосах) ефективно використовувати високоміцну сталь.
- 2.9. Для розкосів рекомендовано використовувати круглі стрижні, замість прямокутних або квадратних труб.

5.2.3. Проектування

- 3.1. Основний несучий елемент комбінованій ферми – балка жорсткості, представлена у вигляді верхнього поясу ферми.
- 3.2. Для балки жорсткості рекомендовано використовувати труби прямокутного перерізу (у випадку, коли це обумовлено розрахунком, з точки зору зменшення ваги елемента та більшого відсотку використання несучої здатності можливе використання труб квадратного перерізу).
- 3.3. Для нижнього поясу використовуються труби квадратного перерізу.

3.4. Похилі стояки проектують із труб квадратного перерізу під кутом 80° до поясів.

3.5. Для розтягнутих розкосів використовуються високоміцні стрижні круглого перерізу.

3.6. Критерієм оцінки ефективності обраного перерізу для певного елемента комбінованої ферми є відсоток використання несучої здатності елемента. Відсоток використання повинен наближатись до 100%.

3.7. Марки сталей для відповідних елементів наведено у таблиці 1

Таблиця 5.3

Класи сталі для певних типів елементів

Найменування елемента	Марка сталі
Верхній пояс	S345
Нижній пояс	S345
Стояки	S255
Розкоси	A400C

3.8. Пояси ферми проектують із підйомом 1.5%, але не більше 180 мм.

3.9. Висота ферм по усій довжині становить 2000 мм.

3.10. Допускається збільшення висоти ферми, якщо це обумовлено розрахунком або коли для забезпечення технологічних потреб виробництва необхідна більша висота міжферменного простору.

3.11. Проліт ферм становить 18, 24 та 30 м.

3.12. Залежно від прольоту ферми рекомендовано обирати таку кількість проміжних опор, аби довжина панелі верхнього поясу знаходилась в межах 4-5 м.

3.13. Кількість панелей слід обирати виходячи з критерію зменшення кількості елементів решітки (більша кількість панелей створює додаткові проміжні опори балки жорсткості, однак збільшує кількість елементів ферми).

3.14. Розтягнуті розкоси виконуються з двох стрижнів високоміцної арматури та кріпляться до стінок балки жорсткості та до стінок нижнього поясу з обох боків по зовнішній грані за допомогою зварювання.

5.2.4. Розрахунок комбінованих ферм

4.1. Для розрахунку комбінованих сталевих ферм покриття використовуються автоматизовані програмні комплекси, наприклад, «Ліра-САПР 2016 R5» або аналогічні, призначені для розрахунку сталевих конструкцій.

4.2. Розрахункові схеми для ферм прольотом 18, 24, 30 м наведено на рис.5.1 – 5.3 відповідно.

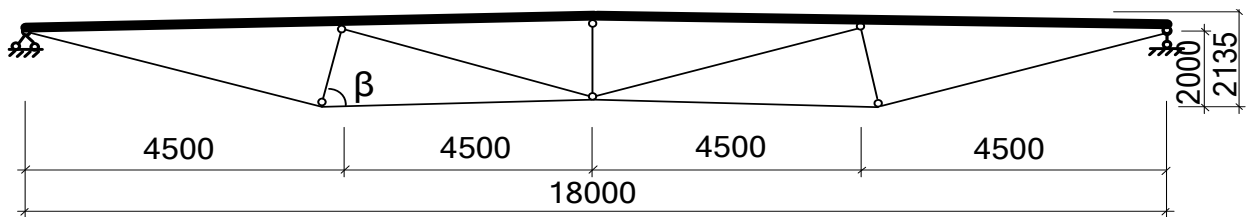


Рис. 5.1. Розрахункова схема комбінованої ферми прольотом 18 м

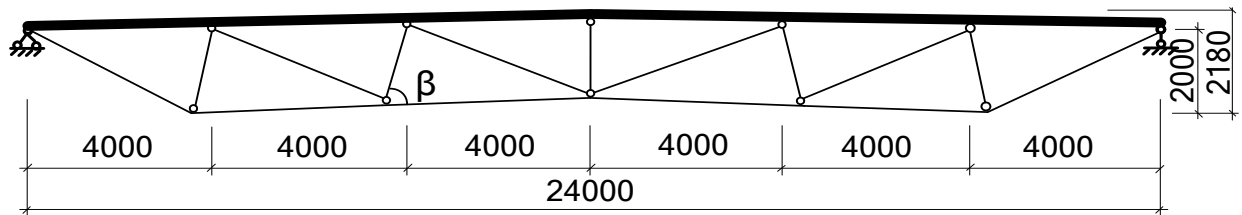


Рис. 5.2. Розрахункова схема комбінованої ферми прольотом 24 м

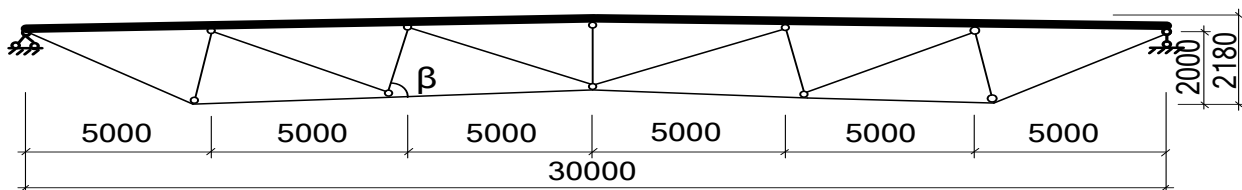


Рис. 5.3. Розрахункова схема комбінованої ферми прольотом 30 м

4.3. Для розрахунку створюється нова задача у ПК-«Ліра» за другою ознакою схеми (три степені вільності у вузлі: переміщення X, переміщення Z, поворот U_y у площині XOZ)

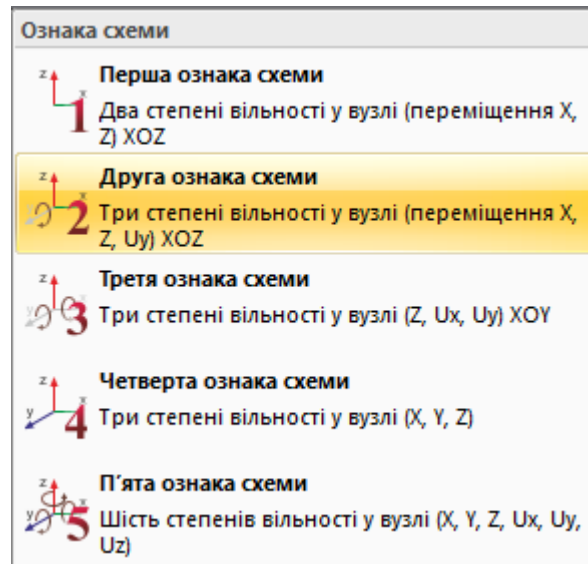


Рис. 5.4. Ознака схеми за ступенями вільності у вузлі

4.4. За допомогою команди «створення плоских ферм» викликається вікно, де задаються обриси поясів, обриси решітки та геометричні параметри ферми.

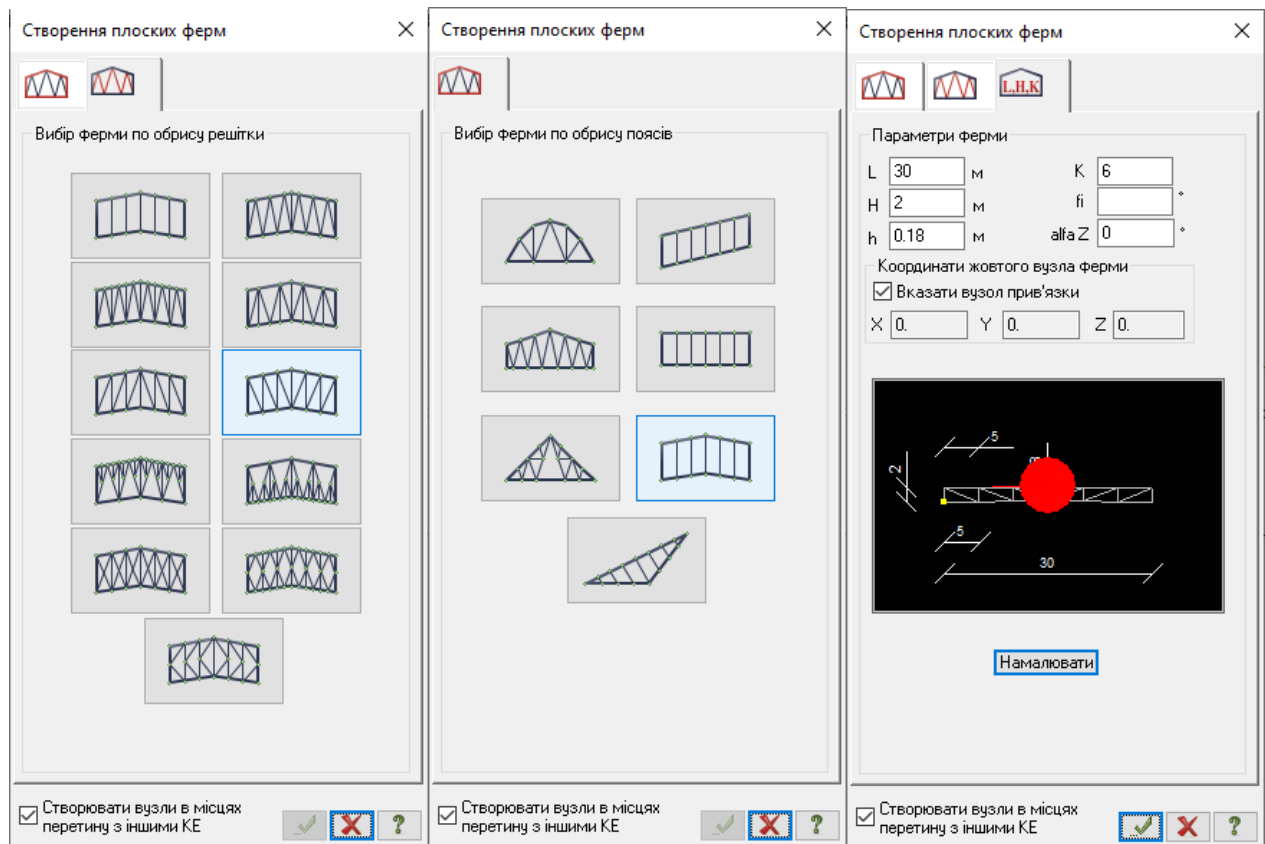


Рис. 5.5. Етапи створення та задавання параметрів плоских ферм

4.5. У створеній фермі видаляються крайні нижні вузли.

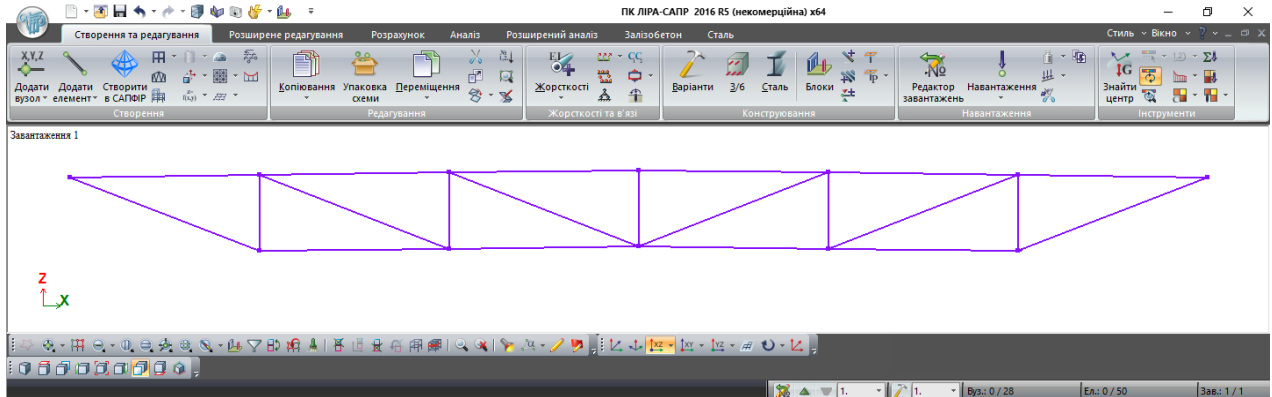


Рис. 5.6. Загальний вид створеної розрахункової схеми ферми

4.6. За допомогою команди «В'язі у вузлах» викликається вікно, де задаються зазначені види в'язей у обраних вузлах. Для одного крайнього вузла задається нерухомий шарнір (параметр в'язей X,Z), а для другого – рухомий (параметр в'язей Z).

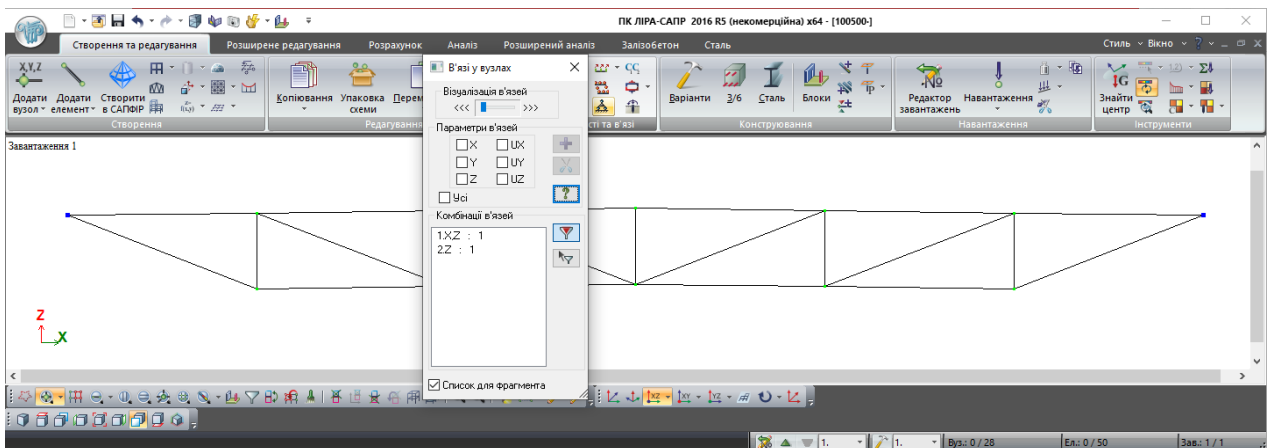


Рис. 5.7. Задавання в'язей у вузлах

4.7. У вкладці «Переміщення об'єктів» обирається команда «Переміщення поворотом». За допомогою даної команди повертаються стійки на 10° відносно верхнього поясу. Таким чином кут примикання стійки до нижнього поясу β становитиме 80° .

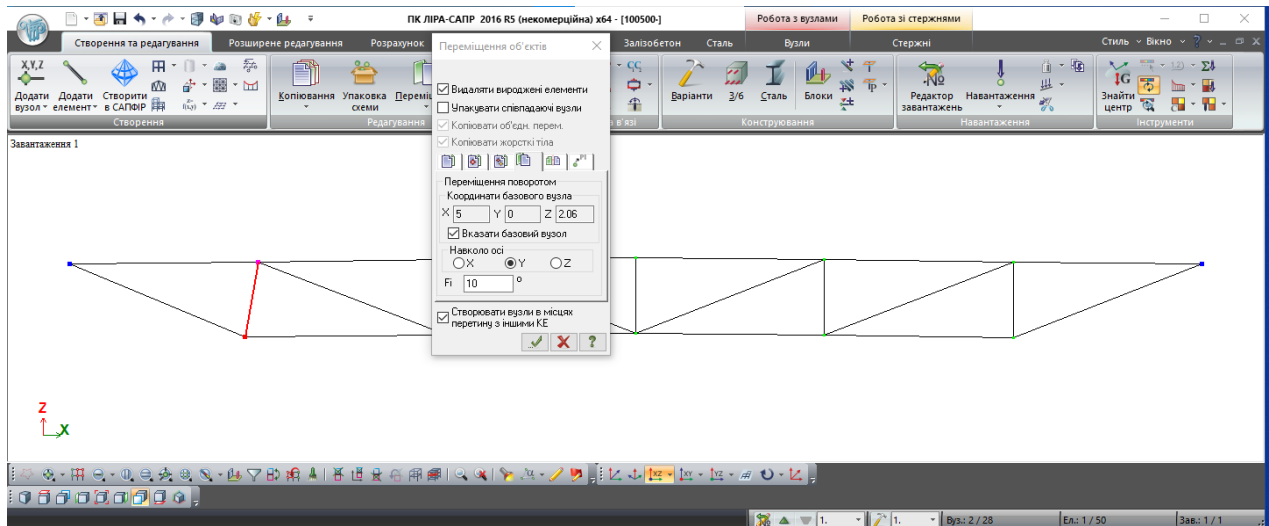


Рис. 5.8. Задавання кута нахилу стійок

4.8. Необхідно виділити елементи решітки на схемі. Оскільки приєднання решітки до поясів шарнірне, необхідно задати шарніри у стрижнях решітки. При виділених стрижнях на вкладці «Стержні» за допомогою команди «Шарніри» викликається вікно, де задаються параметри шарніру. Необхідно задати шарнір в обох вузлах по зв'язку UY (0 кг*м).

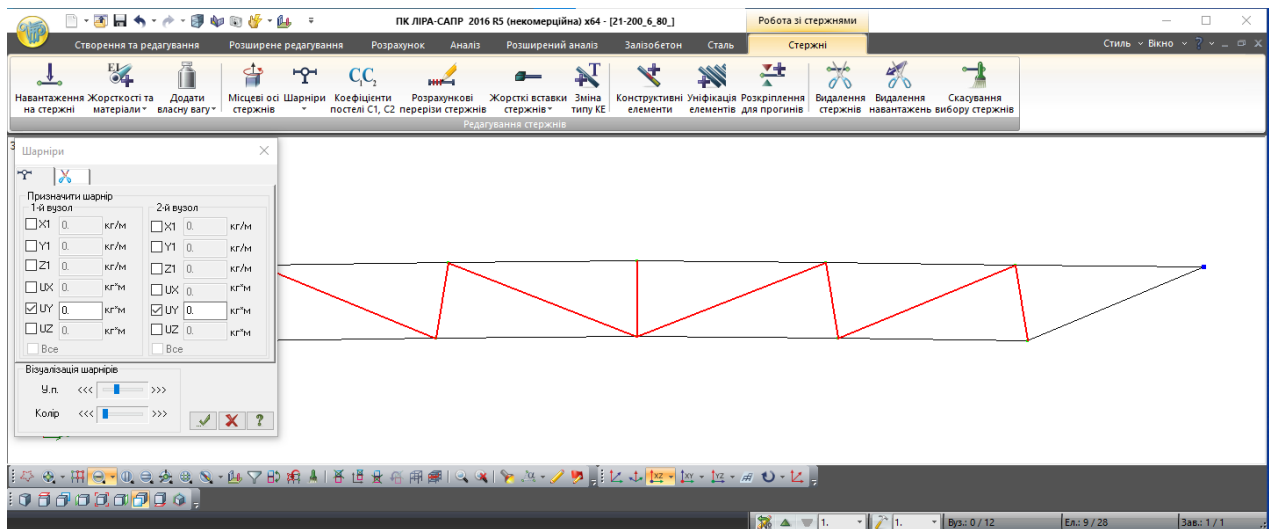


Рис. 5.9. Задавання шарнірів у стрижнях



Рис. 5.10. Секція решітки із заданими шарнірами

4.9. Далі необхідно задати перерізи та матеріали для стрижнів. Для цього на схемі обираються необхідні елементи ферми, наприклад верхній пояс та задаються його параметри: тип перерізу, матеріал, умови роботи стрижня, обмеження щодо підбору січень. Для цього необхідно обрати команду «Жорсткості» на вкладці «Створення та редагування». У вікні, що з'явилося, задаються параметри стрижня.

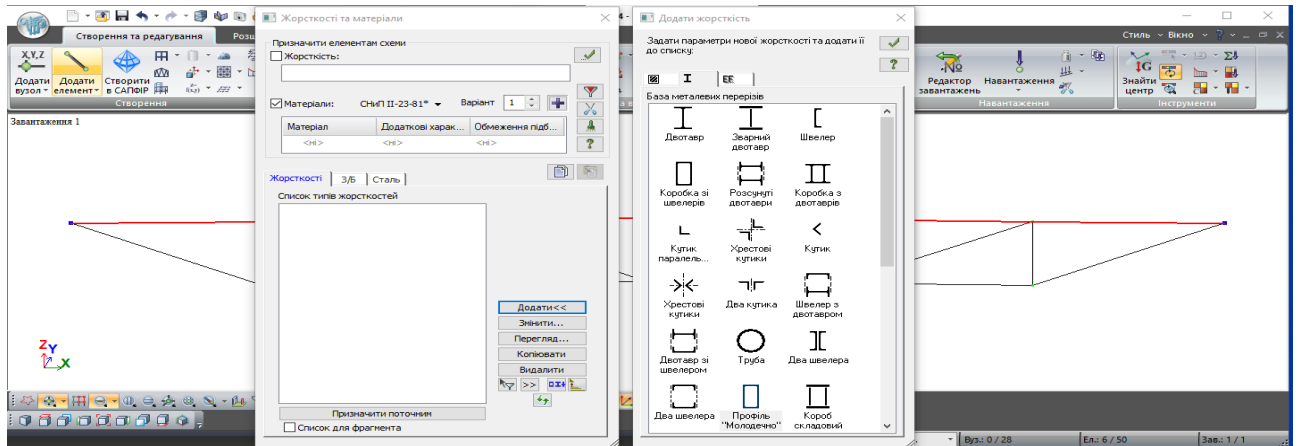


Рис. 5.11. Задавання поперечного перерізу стрижня

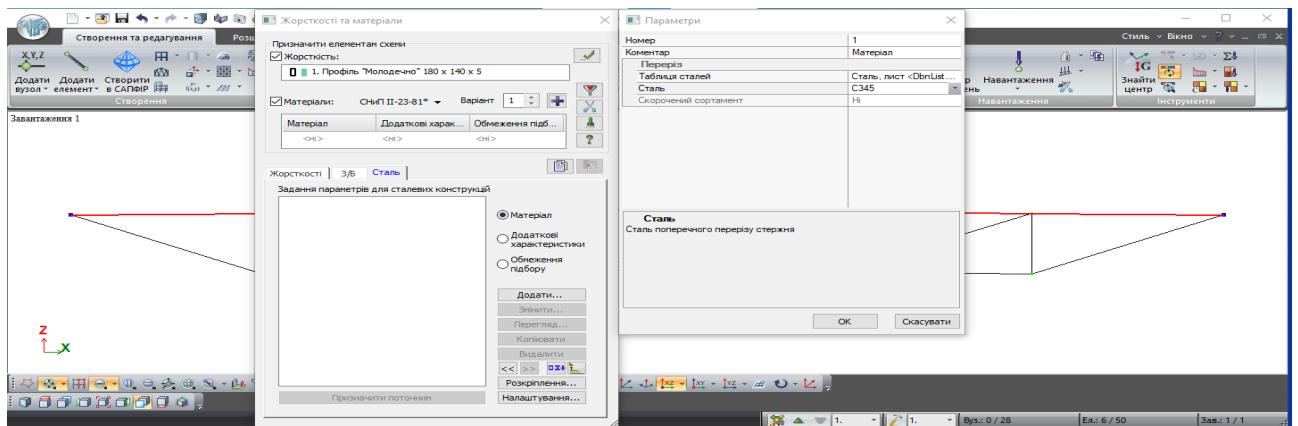


Рис. 5.12. Задавання характеристик матеріалу

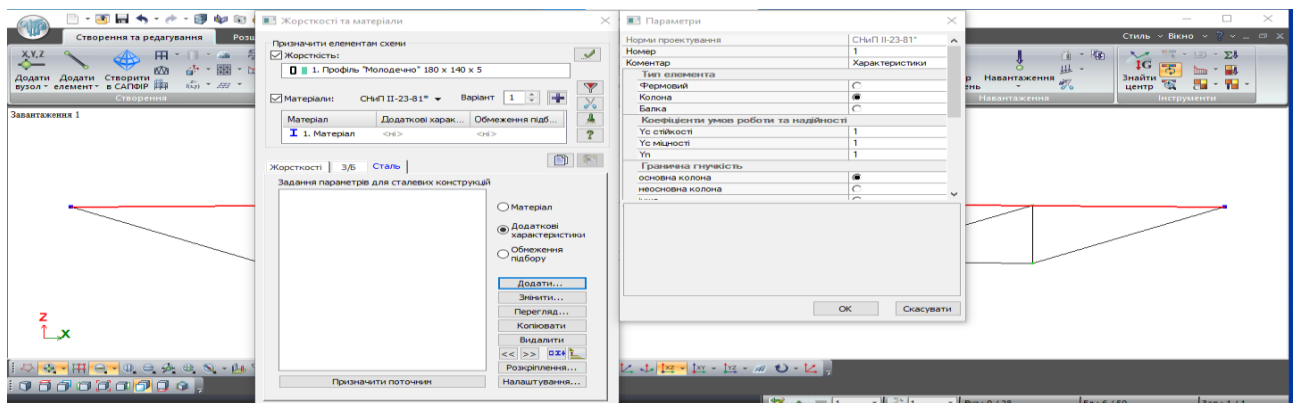


Рис. 5.13. Задавання умов роботи стрижня

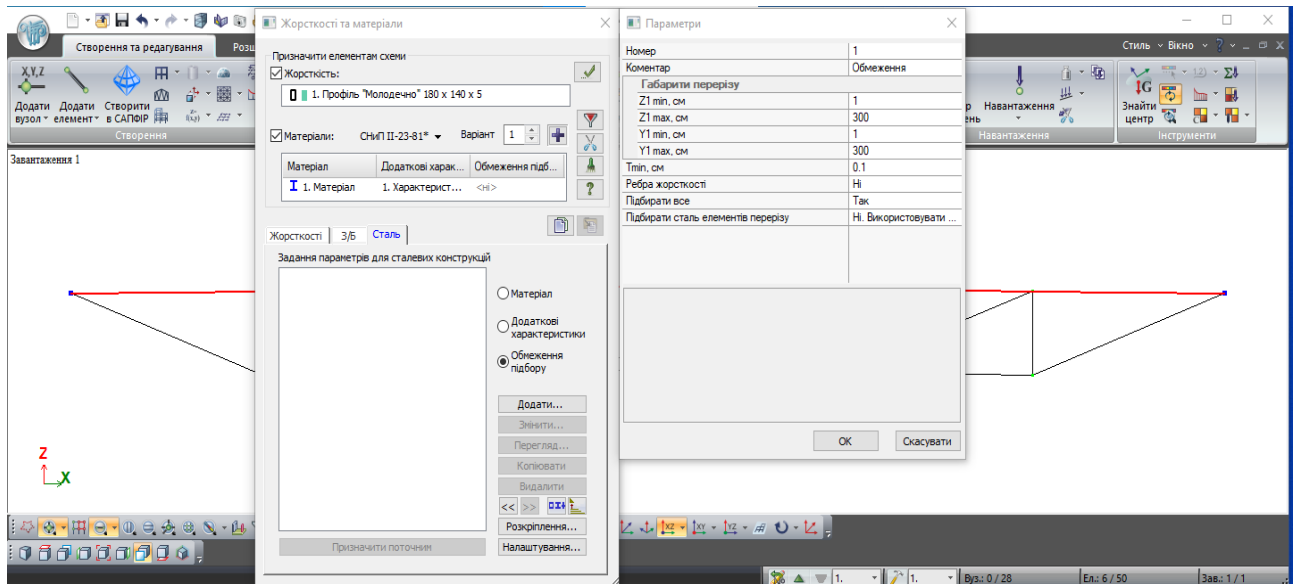


Рис. 5.14. Задавання обмежень підбору сечення

4.10. Після задавання перерізів та характеристик задається навантаження на стрижні. Навантаження слід прикладати рівномірно розподіленим до верхнього поясу. За допомогою команди «Навантаження» викликається вікно задавання навантажень. У ньому обирається вкладка «Навантаження на стрижні» та обирається рівномірно розподілене навантаження. Далі задається значення прикладеного навантаження.

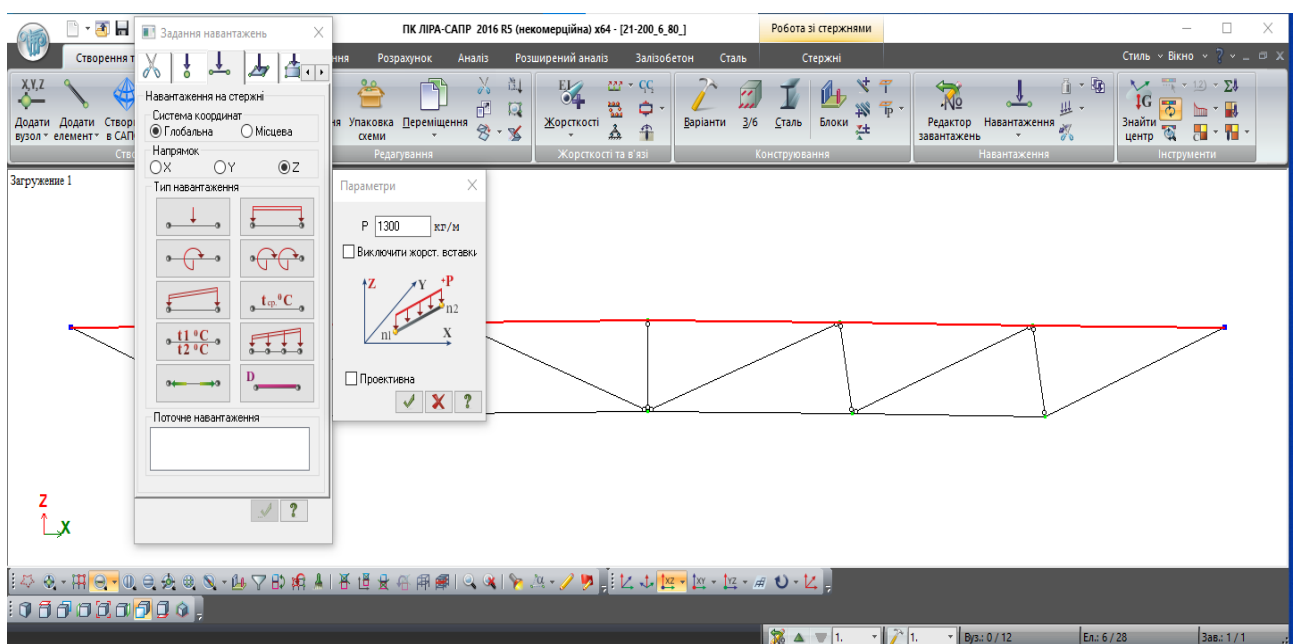


Рис. 5.15. Прикладання навантаження на стрижні

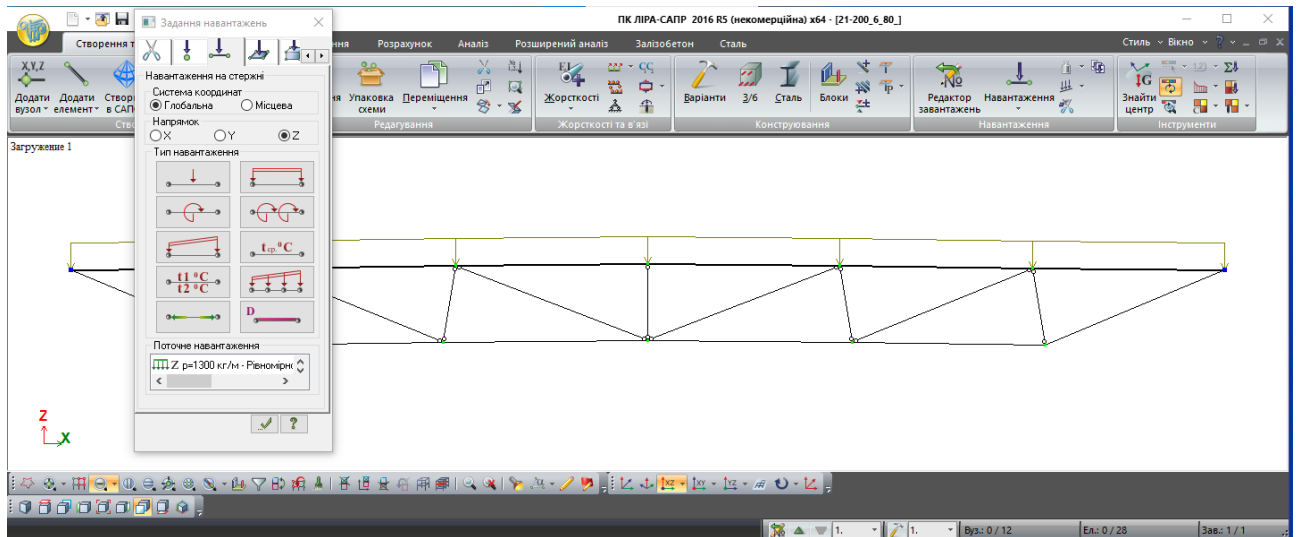


Рис. 5.16. Розрахункова схема із прикладеним навантаженням

4.11. Після створення розрахункової схеми та задавання усіх параметрів виконують розрахунок моделі. Для цього на вкладці «Розрахунок» виконують команду «Виконати розрахунок».

4.12. Після проведеного розрахунку переходять до аналізу результатів. Для перегляду результатів розрахунку для сталевих перерізів необхідно відкрити вкладку «Сталь». Результати перевірки несучої здатності за 1 групою граничних станів можна переглянути натиснувши кнопку «1ГС». Таким чином, на екрані відобразиться мозаїка напружень по елементах ферми.

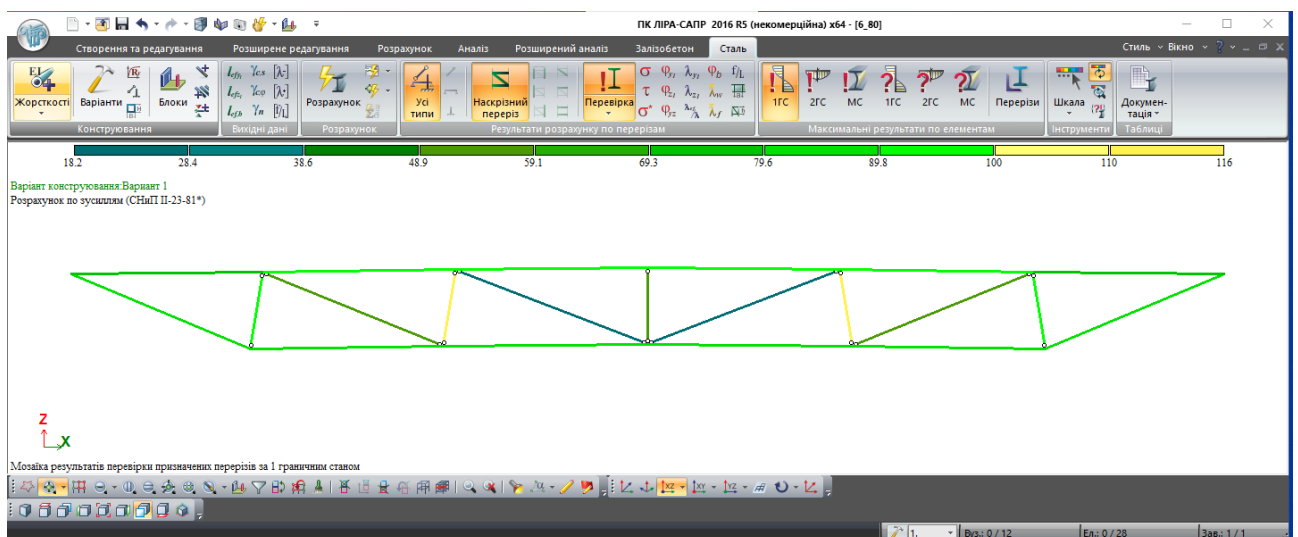


Рис. 5.17. Мозаїка напружень у елементах ферми

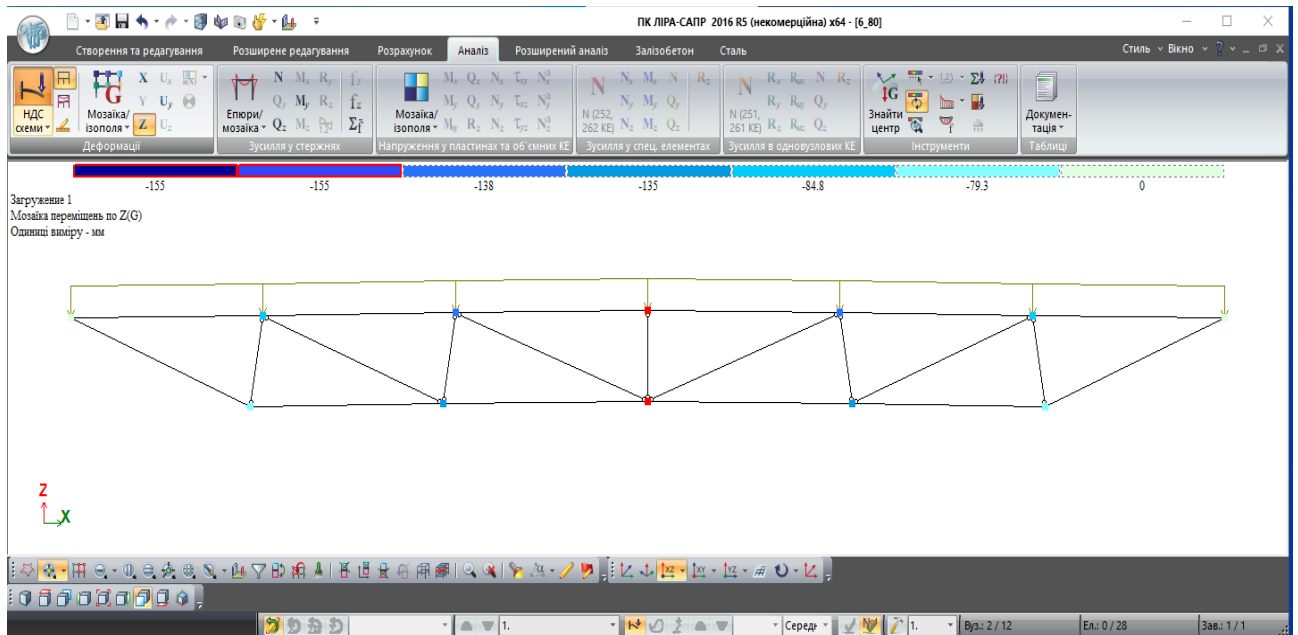


Рис. 5.18. Мозаїка переміщень у вузлах ферми

4.13. Як видно з розрахунку, середні стійки перевантажені, тобто їх несуча здатність не забезпечена, а загальний прогин перевищує значення $f = 1/200$ і становить 155 мм, замість допустимих 150 мм. Для цього необхідно змінити перерізи відповідних елементів, повторивши дії, описані у пункті 4.9

4.14. Після перепризначення жорсткостей стрижнів, повторно виконуємо розрахунок моделі.

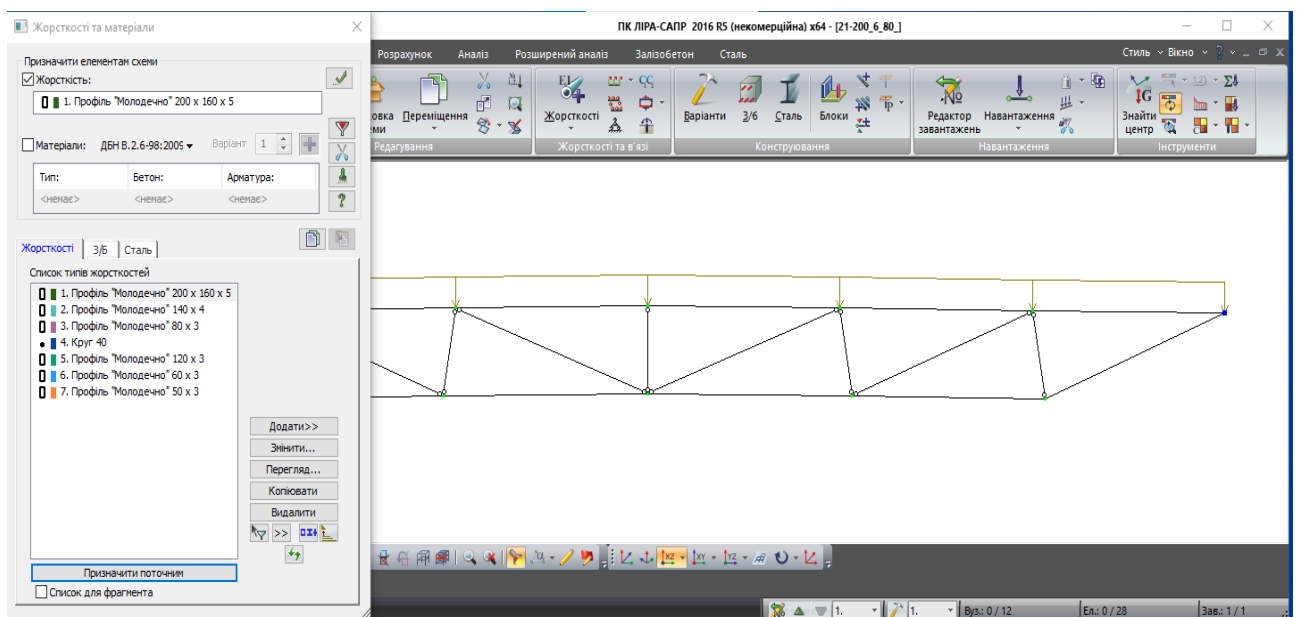


Рис. 5.19. Змінені перерізи елементів

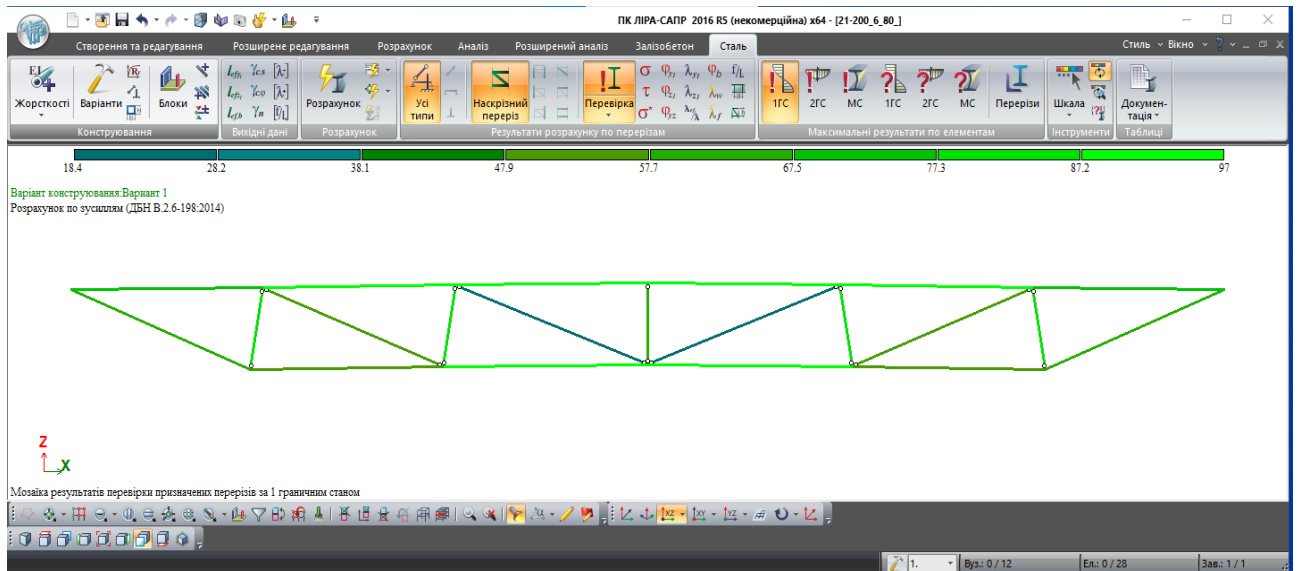


Рис. 5.20. Мозаїка напружень після повторного розрахунку

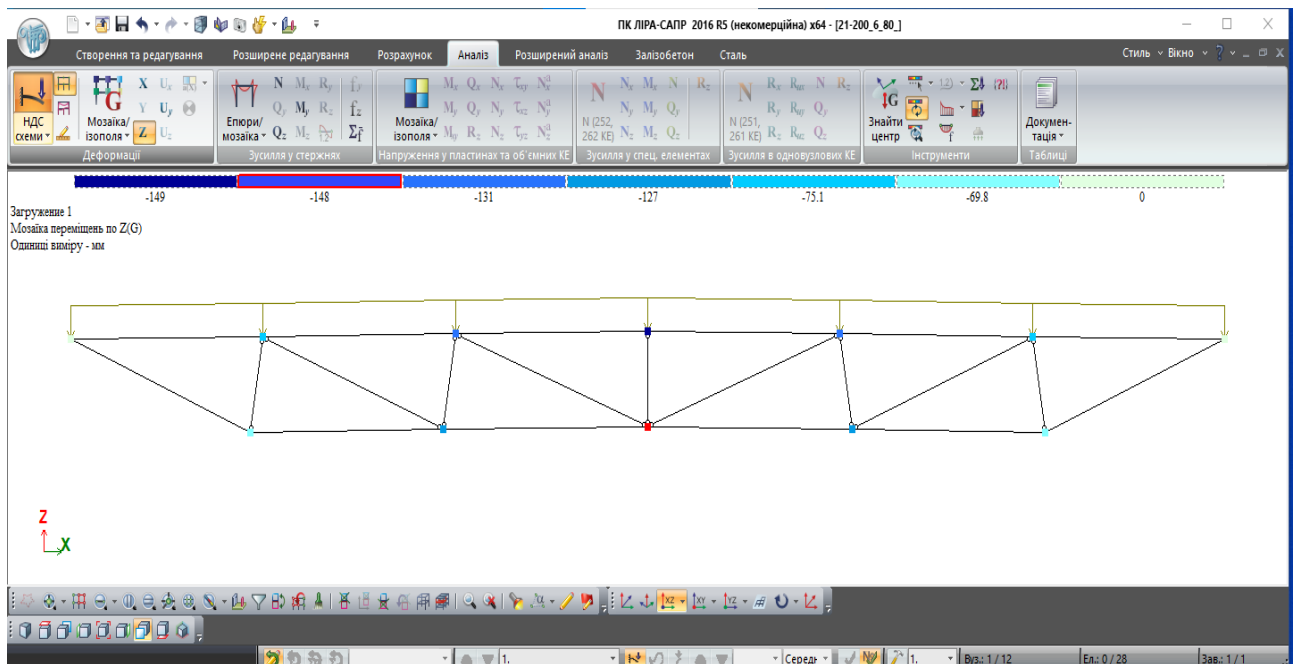


Рис. 5.21. Мозаїка переміщень після повторного розрахунку

4.15. Після отримання раціональної конструкції за геометричними та конструктивними параметрами приступають до регулювання зусиль для досягнення раціональних параметрів за рівністю напружень.

Основним методом розрахункового регулювання НДС в балці жорсткості раціональної комбінованої ферми є створення опорних моментів на крайніх

опорах, які протилежні дії від зовнішнього навантаження. Змінний параметр – величина розрахункового ексцентриситету для створення опорного моменту.

У другому методі змінний параметр – зміна поперечних перерізів розкосів, стійок і нижнього поясу (раціональне співвідношення маси балки жорсткості до всієї маси ферми, як зазначалось у дисертації раніше – 50%).

Раціональний підбір поперечних перерізів середніх розкосів, дозволяє практично зрівноважувати моменти на другій проміжній опорі та у центральних прольотах.

Третій метод схожий до першого, однак, ексцентриситети створюються у вузлах примикання системи підвіски до балки жорсткості. Змінний параметр – величини ексцентриситету.

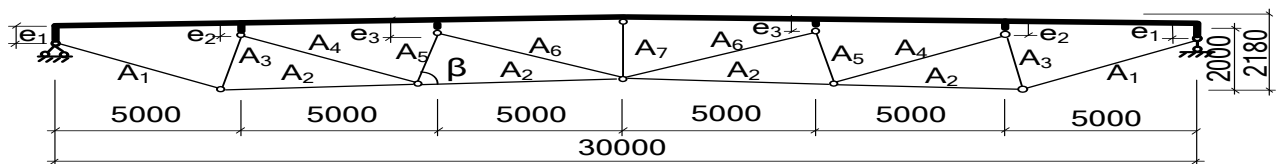


Рис. 5.22. Регулювання НДС в балці жорсткості 30 м комбінованої ферми опорними ексцентриситетами (e_1) та вузловими (e_2, e_3)

Четвертий метод полягає у зміні довжин панелей верхнього поясу (наприклад, 5200 мм, 5000 мм і 4800 мм, рис. 5.23). Зміна довжин панелей проводиться з метою зменшення згинальних моментів в середніх панелях цього поясу (балки жорсткості) ферми.

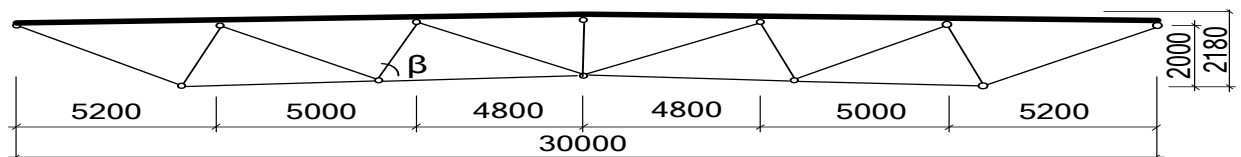


Рис. 5.23. Схема ферми з регулюванням НДС зміною довжини панелей верхнього поясу

Розрахунок конструкцій із регулюванням зусиль відбувається аналогічно до кроків, наведених у рекомендаціях вище. Після вибору способу (або

способів) регулювання приступають до ітераційного процесу. Із кожним кроком ітерації отримують нову розрахункову схему, оскільки коригування значень змінних параметрів впливатиме на вид самої розрахункової схеми і, як наслідок, значень зусиль та напружень у ній. Необхідно виконати розрахунок кожної нової розрахункової схеми, яку статично невизначеної системи (наприклад, у ПК «Ліра», як наведено у рекомендаціях). Для нової розрахункової схеми отримують значення напружень у перерізах. Процес ітерації повторюють до вирівнювання напружень, тобто, до моменту, коли різниця напружень у перерізах стане достатньо малою. Це означатиме, що геометрія конструкції разом із регулюванням є адаптованою до прикладеного навантаження. Регулювання доцільно завершувати, коли меншої різниці напружень в перерізах досягти не видається можливим.

5.3. Оцінка техніко-економічної та екологічної ефективності раціональних комбінованих сталевих ферм з регулюванням НДС

Удосконалення конструктивних форм та використання нових методів раціонального проектування дозволить замінити неефективні сталеві ферми на легкі раціональні комбіновані сталеві ферми, що забезпечить значну економію сталі, знизить працемісткість виготовлення, монтажу, зменшить кількість викидів CO₂.

Пошук полегшеної маси ферм, як основного елемента будівельних конструкцій, що задовольняє всі фізичні обмеження, є фундаментальною проблемою будівельної галузі. Ефективне проектування ферми може призвести до значної економії коштів, а також покращити фізичні показники і безпеку конструкції.

Комбіновані сталеві конструкції відносяться до прогресивних конструктивних форм, які динамічно розвиваються в останній час як в країнах ЄС, так і в Україні. Їх проектування і реалізація не вимагає ніяких додаткових матеріальних витрат, без необхідності їх контролю під час експлуатації. Під

цим розуміється вибір топології конструкцій, їх геометричних параметрів, характеру закріплень на опорах, жорсткісних характеристик стержневих елементів, тобто ці прийоми дозволять регулювати розподіл внутрішніх зусиль і деформацій без фізичного втручання, збільшення кількості елементів тощо.

Необхідність мінімізації маси та максимізації ефективності компонентів конструкції є важливою проблемою. Зменшення споживання енергії, економія матеріалів і витрат на виробництво - є рушійною силою розвитку. Спосіб вирішення початкової проблеми проектування, а саме пошуку форми, можна вирішити за допомогою так званої оптимізації топології. Частково для цього використовують структурну оптимізацію в області топології, оптимізації форми та параметрів. Її мета полягає в тому, щоб знайти таку геометрію конструкції, яка є оптимальною для певних навантажень.

Але стандартна оптимізація топології, яка знаходить теоретичний оптимум, створює структури із занадто великою кількістю вузлів і опор і занадто малими кутами між стійками. Таким чином, виробництво таких цих конструкцій є складним і дорогим і тому не має загальної переваги в порівнянні зі звичайними методами проектування, та не набуло широкого застосування в інженерній практиці, частково через те, що будівельні норми (Єврокоди) ускладнюють проблему оптимізації.

Прагматичною альтернативою є раціональне проектування. Раціональною вважається конструкція, яка має мінімальну масу, технологічність і мінімальну трудомісткість її виготовлення. Створення раціональної конструктивної форми комбінованої сталевий ферми є складною проблемою комбінаторної оптимізації і параметричного проектування. Параметричні методи проектування значно розширили і збільшили геометричну різноманітність і різновидності конструктивних форм у процесі раціонального проектування. Створення технологічної та ефективної топології є важливим кроком у проектуванні ферми. Кращим процесом проектування є одночасне виконання топології, форми та оптимізації розмірів, що може бути в майбутньому застосовано до великомасштабної проблеми проектування

ферм. Такий метод проектування є ефективним та результативним, так як дає кращі результати, ніж інтуїтивно зрозумілі остаточні макети. Якість проектування раціональної конструкції все ще сильно залежить від інженерної інтуїції. Отже, потенційна ефективність або неефективність конструкції визначається структурною геометрією. жодна оптимізація розміру окремих частин не компенсує погане структурне розташування.

Даний пункт розділу присвячений порівняльному аналізу техніко-економічної ефективності сталевих ферм, що працюють на однакові навантаження при однаковому прольоті рівному 17 м: комбінованої – раціональної малоелементної, виготовленої виключно із високоміцних сталей марки С420 (S420 N / NL) (рис. 1), запроєктованої по нормах України; комбінованої – аналогічної, але із шістьма панелями (рис.2); оптимізованої по Європейських нормах (рис. 3); запроєктованої як раціональної комбінованої сталеві ферми – запропоноване рішення із марками сталей, відповідно до ДСТУ Б В.2.6-74:2008 (С255 та С345) із розтягнутими розкосами, виконаними із високоміцної арматури (А400С) (рис. 5.24).

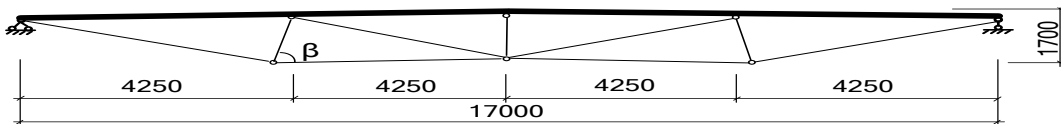


Рис. 5.24. Схема раціональної комбінованої малоелементної ферми

З енергетичного погляду, висота кроквяних ферм прийнята 1/10 прольоту ферми – 1,7 м, що викликає необхідність прийняття такої ж висоти для всіх ферм. Всі ферми було розраховано на ПК з програмою «LIRA-CAD 2016 R5» від рівномірно розподіленого навантаження $q = 41 \text{ kN/m} = 0.041 \text{ kN/mm}$ і запроєктовані із прямокутних гнуто-зварних порожнистих профілів, виготовлених із сталі з модулем Юнга $E = 210 \text{ ГПа}$, густина $\rho = 7850 \text{ кг/м}^3$, а межа текучості 420 МПа (окрім ферми №4 із сталями С255 та С345). Вузли ферм – безфасонкові, з'єднання стержнів грат з використанням зварювання.

Специфікація на еталонну ферму прольотом 17 м

№	Тип елементу	Сталь	Переріз	Довжина, мм	Маса, кг
1	Верхній пояс	C420	□260x130x6. 5	17000	634.31
2	Нижній пояс	C420	□100x5.5	17654	277.36
3	Стійки	C420	□100x3	3450	30.46
4	Стійки	C420	□60x3.5	1700	10.13
5	Розкоси	C420	□50x4	9154	49.90
Кількість елементів 13 шт, довжина зварних швів – 11,4 м					
Загальна маса:					1002.4 кг

Другою фермою для порівняння була, запропонована раціональна комбінована сталева ферма (рис. 5.25) і епюра згинальних моментів для неї від рівномірно розподіленого навантаження $q = 41 \text{ kN/m}$ з максимальним моментом в балці жорсткості рівним 29,4 кНм.

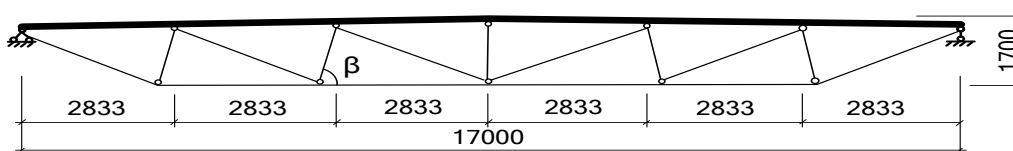


Рис. 5.25. раціональна комбінована сталева ферма із шістьма панелями

В табл. 5.5 наведена маса раціональної комбінованої сталеві ферми, яка рівна 855.9 кг і менша на 15 % порівняно з першим варіантом. Така ферма складається із 21 елемента і виготовлена при 19,8 м зварних швів.

На підставі прийнятого критерію ефективності проектного рішення – металомісткість, приймається найефективніше проектне рішення сталевих ферм покриття. Завжди, вибір ферми мінімальної маси відбувається на основі підбору раціональних геометричних параметрів, а також методу розрахункового регулювання напружено-деформованого стану (НДС). Як регулятори можуть використовуватись такі параметри: раціональний кут нахилу стиснутих елементів решітки ($\beta = 80^\circ$); кількість і розташування стиснутих елементів; опорний ексцентриситет по висоті ферми.

Специфікація на раціональну комбіновану сталеву ферму прольотом 17 м

№	Тип елементу	Сталь	Переріз	Довжина, мм	Маса, кг
1	Верхній пояс	C420	□180x140x5.5	17000	443.19
2	Нижній пояс	C420	□140x4	11934	202.1
3	Нижній пояс	C420	□100x4	6010	72.63
4	Стійки	C420	□100x3	3450	30.91
5	Стійки	C420	□60x5	3450	28.05
6	Стійки	C420	□60x3	1700	8.82
7	Розкоси	C420	□60x4.5	6100	45.4
8	Розкоси	C420	□40x3.5	6600	24.85
Кількість елементів 14 шт, довжина зварних швів – 19,8 м					
Загальна маса:					855.9 кг

Залежно від цих параметрів, змінюються зусилля в елементах ферми і відповідно змінюється площа поперечного перерізу та маса конструкції.

Третьою фермою для порівняння була оптимізована ферма мінімальної ваги, (рис. 5.26). Суть оптимізації полягала в переході від суцільної – монолітної балки до структурної конструкції мінімальної маси (рис. 5.26). Мінімізація маси проектованої конструкції є найпоширенішим критерієм проектування. В таблиці 3 наведена маса оптимізованої ферми, яка рівна 879.3 кг і менша на 13 % порівняно з першим варіантом. Цю конструктивну форму ферми було розраховано на ПК з програмою «LIRA-CAD 2016 R5» і одержали табл. 5.6. Така ферма складається із 23 елементів і виготовлена при 21,7 м зварних швів.

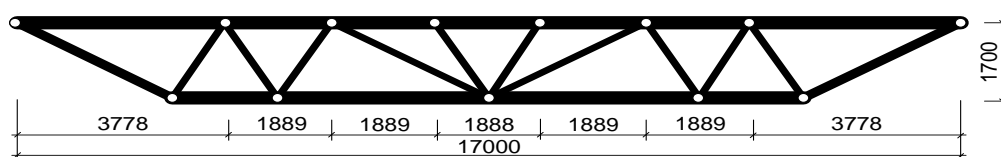


Рис. 5.26. Оптимальна топологія ферми

Таблиця 5.6

Специфікація на оптимальну ферму прольотом 17 м

№	Тип елемента	Сталь	Переріз	Довжина, мм	Маса, кг
1	Верхній пояс	C420	□160x6.5	17000	513.23
2	Нижній пояс	C420	□90x6	11332	171.04
3	Нижній пояс	C420	□90x4	6600	69.22
4	Стійки	C420	□100x3	3890	34.85
5	Стійки	C420	□70x3	3890	23.83
6	Стійки	C420	□50x3.5	3890	18.9
7	Розкоси	C420	□60x3	3890	20.18
8	Розкоси	C420	□50x3	6600	28.1
Кількість елементів 23 шт, довжина зварних швів – 21,7 м					
Загальна маса:					879.3 кг

Четвертою фермою для порівняння було обрано запропоновано малоелементну комбіновану сталеву ферму із марками сталі, рекомендованими ДСТУ Б В.2.6-74:2008, С255 та С345, відповідно (рис. 5.27). Розтягнуті розкоси було зароектовано із високоміцних арматурних стрижнів класу А400С. Специфікація елементів наведено у табл. 5.7. Маса ферми склала 1142.4 кг, що на 14% більше за перший варіант, на 33 та 30% більше за другий та третій варіант, відповідно.

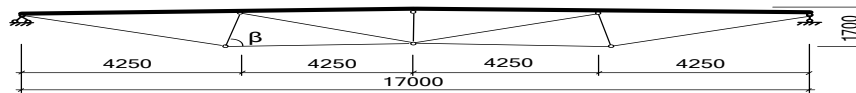


Рис. 5.27. Схема раціональної комбінованої малоелементної ферми

Таблиця 5.7

Специфікація на раціональну ферму із марками сталі С255 та С345

№	Тип елемента	Сталь	Переріз	Довжина, мм	Маса, кг
1	Верхній пояс	C345	□260x130x7.5	17000	724.88
2	Нижній пояс	C345	□140x4	17700	296.65
3	Стійки	C255	□100x3.5	3450	35.75
4	Стійки	C255	□80x4	1700	12.0
5	Розкоси	A400C	□2□26	9154	73.12
Кількість елементів 10 шт, довжина зварних швів – 11,4 м					
Загальна маса:					1142.4 кг

Раціональне проектування ферми, без використання складних аналітичних чи чисельних процесів оптимізації, дозволяє досягти таких же параметрів. Спрямоване формування напруженого стану забезпечує досягнення раціональної конструкції, яка по техніко-економічним показникам аналогічна оптимізованим.

При проектуванні металевих конструкцій необхідно керуватись двома основними принципами, висунутими проф. Стрілецьким Н.С.: принципом концентрації матеріалу та принципом спрощення конструктивної форми. Перший дозволяє зосередити матеріал у меншій кількості елементів, другий – зменшити трудомісткість виготовлення та монтажу при меншій, чи допустимій масі конструкцій.

Визначення економічної ефективності запропонованих варіантів виготовлення ферм полягало в порівнянні вартості матеріалів, необхідних для виготовлення ферм (металевий профіль та фасонні деталі, матеріали для зварювання, ґрунтовки та фарби для антикорозійного покриття) а також трудомісткості та вартості виготовлення і монтажу даних конструкцій. Для розрахунку приймались характеристики запроектованих конструкцій ферм наведених на рис. 5.24-5.27 та табл. 5.4 – 5.7.

Трудомісткість виготовлення ферм визначалась за такими основними групами операцій: збирання конструкцій на стенді, зварювальні роботи, нанесення захисних шарів.

Перехід від трудомісткості до вартості виконання робіт для будь-якої операції чи сукупності операцій здійснювався за формулою:

$$C_i = T_i * C_i * (1+H),$$

де C_i – вартість операції чи сукупності операцій, T_i трудомісткість операцій визначена за відповідними нормативними документами, C_{gi} годинна тарифна ставка робітника відповідного розряду та кваліфікації, визначена по тарифній сітці для будівельних робіт при встановленому розмірі середньомісячної заробітної плати 14800,00 грн., що відповідає середньому

розряду складності робіт у будівництві 3,8 при виконанні робіт у звичайних умовах. (прийнятий для більшості районів Львівської області на 1.10.2021 року відповідно до наказу Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України від 27.07.2018 № 196 “Про внесення змін до Порядку розрахунку розміру кошторисної заробітної плати, який враховується при визначенні вартості будівництва об’єктів“, та беручи до уваги рішення Львівської обласної ради від 30.01.2018 № 589), Н – величина нарахувань на заробітну плату (єдиний соціальний внесок у розмірі 22%).

Норми трудомісткості складання ферм покриттів, визначені за Е40-2-12 (табл.5) в залежності від маси конструкцій та кількості елементів ферми, складають 5,8 год для ферм №1 та №4 (кількість елементів до 60 вага до 1,5 т) і 4,6 год для ферм №2 і 3 (кількість елементів до 60 вага до 1,0 т) при складі ланки: Робітник бр. – 1; робітник 4р. – 1; робітник 3р. – 2.

Таблиця 5.8

Норма часу на збирання кроквяних і підкроквяних ферм (1 конструкцію)

Кількість деталей в конструкції, шт, до	Маса конструкції, т., до				
	1	1,5	2	2,5	3
60	4,6	5,8	7,1	8,4	9,7

Тоді вартість збирання ферм за розміром фонду заробітної плати складає:

$$C_{1,4(\text{скл})} = (81,04 * 2 + 91,49 + 122,79) * 5,8 * 1,22 = 2663 \text{ грн. (ферми 1 і 4)}$$

$$C_{2,3(\text{скл})} = (81,04 * 2 + 91,49 + 122,79) * 4,6 * 1,22 = 2112 \text{ грн. (ферми 2 і 3)}$$

Оскільки при виготовленні ферм всі шви виконуються у нижньому положенні та приведені до таврових з’єднань, можливо застосувати єдину норму для визначення витрат пов’язаних з накладенням зварних швів трудомісткість зварювальних робіт визначалась за нормою Е22-1-6– «Односторонне

зварювання таврових, кутових з'єднань та з'єднань внапуск без зрізу кромки», що визначає витрати в год. на 10 м. зварного шва в залежності від катету шва. При виконанні робіт практично застосовується один тип шва з катетом відповідно до товщини стінок елементів ферми (табл.5.9).

Таблиця 5.9

Норми часу та витрати наплавленого металу для ручного одностороннього зварювання таврових, кутових та з'єднань внапуск без зрізу кромки

Показники	Катет шва, мм. до											
	3	4	5	6	8	10	12	14	16	18	20	22
Норма часу, л.год	0,6 1	1,1	1,7	2,5	2,7	3,5	4,5	5,6	7	8,5	10	12
Нормативні витрати наплавленого металу, кг/м	0,0 6	0,0 8	0,1 4	0,1 9	0,3 7	0,47 5	0,66 5	0,88 5	1,1 6	1,4 2	1,7 4	2,0 9

Тоді вартість зварювальних робіт за фондом заробітної плати для різних типів ферм при прийнятій годинній тарифній ставці для ланки в розмірі 97,25грн складає:

$$C_{1(зв)}=11,4*0,1*2,5*97,25*1,22=338,14\text{грн}$$

$$C_{2(зв)}=13,8*0,1*2,5*97,25*1,22=586,83\text{грн}$$

$$C_{3(зв)}=21,7*0,1*2,5*97,25*1,22=643,33\text{грн}$$

$$C_{4(зв)}=11,4*0,1*2,7*97,25*1,22=365,04\text{грн.}$$

З врахуванням табл. 5.9 витрати наплавленого металу становитимуть

$$G= \Sigma L*e,$$

де L – довжина швів відповідного розміру, e – нормативні витрати наплавленого металу

$$G_1 = 11,4 * 0,19 = 2,17 \text{ кг}; G_2 = 19,8 * 0,19 = 3,76 \text{ кг}; G_3 = 21,7 * 0,19 = 4,12 \text{ кг}.$$

$$G_4 = 11,4 * 0,37 = 4,22 \text{ кг}.$$

Питомі витрати електродів на 1 кг наплавленого металу визначались з їх технічних даних (табл 5.10)

Таблиця 5.10

Питомі витрати електродів на 1 кг наплавленого металу

Марка (тип) електроду	Коефіцієнт витрат на 1 кг наплавленого металу
АНО21(4), АНО -ТМ	1,7
УОНИ 13/45	1,6
УОНИ 13/55	1,4

З врахуванням витрат матеріалів та середніх цін на електроди для західного регіону станом на квітень 2024 року 122 грн/кг, вартість електродів складатиме;

$$C_{1 \text{ ел}} = 2,17 * 1,7 * 122,0 = 450,1 \text{ грн.}$$

$$C_{2 \text{ ел}} = 3,76 * 1,7 * 122,0 = 780,2 \text{ грн.}$$

$$C_{3 \text{ ел}} = 4,12 * 1,7 * 122,0 = 854,5 \text{ грн.}$$

$$C_{4 \text{ ел}} = 4,22 * 1,7 * 122,0 = 875,2 \text{ грн.}$$

Для розрахунку вартості робіт з антикорозійного захисту металевих конструкцій та вартості лакофарбових матеріалів визначено площу поверхні елементів ферм відповідно до п. 1.2.3 збірника 13 РЕКН «Захист будівельних конструкцій від корозії» ДСТУ Б.Д.2.2-13. Площа поверхні конструкцій визначалась за показниками поверхні в м² для одної тони відповідного профілю.

$$S_1 = (13,26 + 9,88 + 1,38 + 0,4 + 1,83) = 26,75 \text{ м}^2$$

$$S_2 = (10,88 + 6,66 + 3,78 + 2,7 + 1,06) = 25,08 \text{ м}^2$$

$$S_3 = (10,88 + 6,45 + 1,56 + 1,1 + 0,93 + 2,1) = 23,02 \text{ м}^2$$

$$S_4 = (13,26 + 9,91 + 1,38 + 0,54 + 1,49) = 26,58 \text{ м}^2.$$

Розрахунок вартості робіт з ґрунтування та фарбування конструкцій з врахуванням вартості матеріалів здійснено відповідно до діючих нормативів за допомогою програмного комплексу АВК (див додаток Д). Вартість антикорозійного захисту конструкцій складає:

$$C_{1\text{анткор}} = 1034 \text{ грн}$$

$$C_{2\text{анткор}} = 971 \text{ грн}$$

$$C_{3\text{анткор}} = 891 \text{ грн}$$

$$C_{4\text{анткор}} = 1028 \text{ грн.}$$

Вартість металевих елементів ферм визначалась за середніми цінами замкнутих гнutoзварних профілів станом на квітень 2024 року:

- сталь С255 – 36350 грн/т; сталь С345 – 55690 грн/т; сталь С420 – 80780 грн/т; арматура А400С – 30690 грн/т

$$C_{1\text{мет}} = 1,0024 * 80780 = 80973 \text{ грн.}$$

$$C_{2\text{мет}} = 0,8559 * 80780 = 69139 \text{ грн}$$

$$C_{3\text{мет}} = 0,8793 * 80870 = 71109 \text{ грн.}$$

$$C_{4\text{мет}} = 1,02153 * 55690 + 0,073 * 30690 + 0,04775 * 36350 = 60865 \text{ грн.}$$

Повна вартість виготовлення ферми включає:

$$C_{\text{повн}} = C_{\text{скл}} + C_{\text{зв}} + C_{\text{ел}} + C_{\text{анткор}} + C_{\text{мет}}$$

$$C_{1\text{повн}} = 2663 + 338 + 450 + 1034 + 80973 = 85458 \text{ грн}$$

$$C_{2\text{повн}} = 2112 + 586 + 780 + 971 + 69139 = 73588 \text{ грн}$$

$$C_{3\text{повн}} = 2112 + 643 + 854 + 891 + 71109 = 75609 \text{ грн}$$

$$C_{4\text{повн}} = 2663 + 365 + 875 + 1028 + 60685 = 65616 \text{ грн.}$$

Використання високоміцних сталей (С420) дозволяє зменшити вагу ферм до 30% порівняно із аналогічними конструкціями зі сталей підвищеної міцності (С345). При використанні однакових сталей раціональна топологія дає незначну перевагу у масі порівняно із оптимальною топологією, проте раціональні конструкції мають меншу кількість елементів та меншу працемісткість виготовлення одиниці. З огляду на вартість матеріалу, раціональні ферми із сталями класу С255 та С345 є найбільш економічно вигідними з точки зору повної вартості конструкції.

Висновки до розділу

1. Проведено екстраполювання результатів дослідження комбінованої сталевих ферми прольотом 30м на прольоти 12 м, 15 м, 18 м, 24 м.
2. Наведено схеми раціональних комбінованих кроквяних ферм прольотом 12-30 м.
3. Проведено порівняльний аналіз маси ферм за ДСТУ та запропонованих варіантів ферм. Аналіз показав, що маса таких ферм менше на 15-25%, порівняно із типовими. Встановлено, що із збільшенням значення навантаження на ферму збільшується різниця у масі між запропонованими рішеннями та конструкціями за ДСТУ.
4. Наведено рекомендації із розрахунку та проектування раціональних комбінованих кроквяних ферм.
5. Проведено оцінку техніко-економічної та екологічної ефективності раціональних комбінованих сталевих ферм з регулюванням НДС. Наведено чотири варіанти ферм із різними розрахунковими схемами та міцнісними характеристиками. Показано, що з точки зору маси конструкції найбільш доцільно використовувати сталі класу S420 для забезпечення найменшого її значення, а з точки зору повної вартості виготовлення доцільно використовувати сталі підвищеної міцності класу С345 та С255 для деяких елементів решітки. Встановлено, що найменша маса зразків становить 855.9 кг,

а найбільша – 1142 кг. При цьому вартість конструкції становить 85458 грн та 65616 грн у цінах 2021 року.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Основні результати, отримані в дисертаційній роботі:

1. Аналіз сучасних типів сталевих кроквяних ферм показав, що основними напрямками розвитку, вдосконалення та підвищення їх ефективності і конкурентоспроможності можливе за рахунок зміни на комбінований вид, в якому необхідно визначити раціональну топологію; використання методів розрахункового регулювання напружено-деформованого стану. Автором запропонована і розроблена раціональна геометрична схема малоелементної сталеві комбінованої ферми.

2. На базі структурно-параметричного синтезу по критерію мінімуму маси визначено раціональну топологію комбінованої сталеві ферми при прольоті 30 м: найбільш ефективною є конструктивна форма типу «Pratt truss» з видом решітки типу - N; раціональне співвідношення маси балки жорсткості до маси всієї ферми приблизно 50%; раціональний кут нахилу стиснутих стержнів решітки в межах 78-82°; раціональна кількість панелей верхнього поясу – 6; кількість проміжних опор балки жорсткості – 5; раціональна розрахункова схема – нерозрізні верхній і нижній пояси та шарнірне приєднання решітки.

3. Розроблений новий тип раціональної конструктивної форми кроквяної сталеві шпренгельної комбінованої ферми прольотом 30 м, яка забезпечує зниження маси порівняно з типовою на 12-17%, працездатності на її виготовлення на 45% при кількості елементів 16 і вузлів 12 порівняно з типовою - 39 елементів та 21 вузол – патент України № 156643 .

4. Розроблено новий підхід до найбільш повної реалізації потенційних можливостей комбінованих сталевих ферм – визначенням раціональної топології та розрахунковим регулюванням НДС за допомогою цілеспрямованого створення в фермі опорних і вузлових ексцентриситетів. Це надає можливість досягати рівнонапруженого стану в розрахункових перерізах балки жорсткості. Результати числових досліджень раціональних комбінованих

сталевих ферм з розрахунковим регулюванням НДС підтверджують загальну ефективність запропонованих і розроблених конструкцій (наприклад: при прольоті 30 м, погонному навантаженні 12.75 кН/м маса такої ферми становить 1601 кг, типової 1801 кг, що менше на 12.5%, а приведені затрати якої менше на 18%. Ефективним є використання замкнених гнутозварних профілів.

5. Експериментальними дослідженнями підтверджено достовірність теоретичних результатів та можливість підвищення ефективності комбінованих сталевих ферм з досягненням рівнонапруженого стану балці жорсткості. Підтверджена надійність роботи розробленої сталевої комбінованої ферми, руйнуюче навантаження більше від нормативного в 1.4 рази. Збіжність експериментальних результатів несучої здатності і деформативності моделей комбінованих ферм з теоретичними 92-96 %.

6. Результати теоретичних і експериментальних досліджень роботи сталевих комбінованих ферм прольотом 30 м екстрапольовано на прольоти 12 м, 15 м, 18 м, 24 м під різні величини погонного навантаження, на основі чого розроблено новий підклас таких ферм з раціональними конструктивними формами даних прольотів та постійною висотою. Виконане чисельне дослідження сталевих комбінованих ферм при даних прольотах показало, що таке конструктивне рішення дозволяє зменшити затрати сталі на 15 - 26 %. Це досягнуто за рахунок нової раціональної конструктивної форми, розрахункового регулювання НДС з раціональним розподілом внутрішніх зусиль.

7. Визначена техніко-економічна та екологічна ефективність порівняно з традиційними кроквяними фермами. Техніко - економічна ефективність отриманих результатів від використання однієї раціональної сталевої комбінованої ферми з розрахунковим регулюванням НДС прольотом 30 м при погонному навантаженні 18 кН/м становить 62601 грн. в цінах 2022 року порівняно з 74838 грн для типової. Витрати енергії на виготовлення такої конструкції становить 862 кВт·год, а для типової – 1102 кВт·год. Викиди CO₂ при цьому становитимуть 3.54 тони для комбінованої та 4.31 для типової.

8. Розроблено практичні рекомендації для розрахунку, регулювання НДС та проектування раціональних комбінованих сталевих ферм для прольотів 12 м, 15 м, 18 м, 24 м і 30 м однієї мінімальної (постійної) висоти. Результати роботи використані Українським інститутом сталевих конструкцій імені В.М. Шимановського, приватним підприємством “Будкомплект-плюс“, ТзОВ “ПЕЛЕ-ІНЖИНІРИНГ“ під час проектування об’єктів з використанням сталевих конструкцій, а також в навчальному процесі Національного університету «Львівська політехніка».

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Алявдін П. В. Самоупрочняющиеся конструктивные системы. Соппротивление материалов и теория сооружений. 2015. № 94. С. 186–201.
2. Баженов В. А., Гранат С. Я., Шишов О. В. Будівельна механіка. Київ, 1999. 584 с.
3. Балук І. М. Оптимальне проектування реконструкції та підсилення стрижневих металевих конструкцій : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01. Львів, 2016. 22 с.
4. Бамбура А. М., Гічко В. В. До оцінки точності визначення несучої здатності гнучких позацентрово стиснених стійок за деформаційним методом. *Будівельні конструкції: міжвідомчий науково-технічний збірник наукових праць*. 2012. № 76. С. 512–517.
5. Бараненко В. О. Раціональний обрис несучої стержневої конструкції мінімального об'єму та обмеженої деформативності. *Theoretical foundations of civil engineering* / ed. by W. Szcześniak. Warsaw, 2014. Vol. 12. P. 565–570.
6. Беленя Е. И. Предварительно напряженные несущие металлические конструкции. Москва : Стройиздат, 1975. 416 с.
7. Білик С. І. Раціональні сталеві каркаси малоенергоємких будівель із двотаврів змінного перерізу : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.23.01. Київ, 2008. 33 с.
8. Бирюлёв В. В. Металлические неразрезные конструкции с регулированием уровня опор. Москва : Стройиздат, 1984. 86 с.
9. Бліхарський З. Я. Реконструкція та підсилення будівель і споруд : навч. посіб. Львів : Вид-во Нац. ун-ту «Львівівська політехніка», 2008. 108 с.
10. Задача оптимального проектирования шпренгельной балки при действии постоянной нагрузки / Г. Л. Ватуля та ін. *Collection of scientific works of the Ukrainian State University of Railway Transport*. 2014. № 147.

11. Ватуля Г. Л. Несуча здатність сталобетонних балок прямокутного перерізу зміцнених сталевим шпренгелем : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01. Харків, 1999. 15 с.
12. Некоторые особенности задачи оптимизации шпренгельных балок / Г. Л. Ватуля та ін. Collection of scientific works of the Ukrainian State University of Railway Transport. 2016. № 161.
13. Ватуля Г. Л. Розрахунок і проектування комбінованих та сталобетонних конструкцій : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.23.01. Харків, 2015. 44 с.
14. Вибранець Ю. Ю. Міцність і деформативність комбінованих металевих систем, об'єднаних у сумісну роботу зі залізобетонною плитою : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01. Львів, 2016. 20 с.
15. Віхоть С.І. Міцність і деформативність комбінованих металевих конструкцій з урахуванням раціонального проектування : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01. Львів, 2015. 20 с.
16. Воеводин А. А. Предварительно напряженные системы элементов конструкций Москва : Стройиздат, 1989. 304 с.
17. Гайдаров Ю.В. Предварительно напряженные металлические конструкции Москва : Стройиздат, 1971. 145 с.
18. Гоголь М. В. Вплив деформованого стану балки жорсткості на розподіл зусиль в системі. International scientific journal "Internauka". 2017. Т. 1, № 11.
19. Гоголь М. Регулювання напружень у сталевих комбінованих конструкціях : монографія. Київ : Сталь, 2018. 222 с.
20. Гоголь М. В. Методика і алгоритм раціонального проектування комбінованих металевих конструкцій. Металеві конструкції. 2014. Т. 20, № 1. С. 29–43.
21. Гоголь М. В. Проектування і розрахунок раціональних комбінованих металевих конструкцій. Металеві конструкції. 2008. Т. 14, № 4. С. 253–262.

22. Гоголь М. В. Регулювання напружено-деформованого стану комбінованих сталевих конструкцій : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.23.01. Полтава, 2019. 40 с.

23. Гоголь М. В. Регулювання напружено-деформованого стану комбінованих сталевих конструкцій : дис. ... д-ра техн. наук : 05.23.01. Полтава, 2019. 524 с.

24. Гоголь М. В. Розрахунок і проектування раціональних комбінованих металевих конструкцій. *Сучасне промислове та цивільне будівництво*. 2014. Т. 10, № 1. С. 79–90.

25. Гоголь М. В. Розрахунковий метод регулювання зусиль в металевих конструкціях. *Баштові споруди: матеріали, конструкції, технології*. 2009. Т. 78, № 4. С. 149–154.

26. Гоголь М., Ордон-Беска Б. Снижение материалоемкости комбинированных металлических конструкций. *Budownictwo o zoptymalizowanym potencjale energetycznym*. 2015. Vol. 15, no. 1. P. 61–69.

27. Голоднов А. И. Регулирование остаточных напряжений в сварных двутавровых колоннах и балках. Київ : Сталь, 2008. 150 с.

28. Гордеев В. Н., Перельмутер А. В. Оптимизация проектных решений при реконструкции зданий и сооружений. *Строительство и архитектура*. 1987. № 4. С. 6–8.

29. Городецкий А.С., Евзеров И.Д. Компьютерные модели конструкций. Київ : Факт, 2005. 344 с.

30. Данильченко О. Ф. Бесфасоночные стальные стропильные фермы минимальной трудоемкости : автореф. дис. на соискание научн. степени канд. техн. наук : спец. 05.23.01. Вильнюс, 1988. 18 с.

31. ДБН В.2.6-198:2014. Сталеві конструкції. Норми проектування. Київ: Мінрегіон України, 2014. 199 с.

32. ДБН В.1.2.-2:2006. Навантаження і впливи. Норми проектування. Київ: Мінрегіон України, 2006. 60 с.

33. Демчина Б. Г., Іваник І. Г., Іваник Ю. І. Регулювання рівнонапруженого стану в комбінованій конструкції. Збірник наукових праць. Галузеве машинобудування, будівництво. 2014. Т. 42, № 3. С. 72–77.
34. Дробязко Л. Е. Легкие конструкции сельскохозяйственных зданий. Київ : Будівельник, 1985. 136 с.
35. ДСТУ Б В.1.2.-3:2006. Прогини і переміщення. Вимоги проектування. Київ: Мінбуд України, 2006. 10 с.
36. ДСТУ Б В.2.6-74:2008. Конструкції будинків і споруд. Ферми сталеві кроквяні з гнutoзварних профілів прямокутного перерізу. Київ: Мінрегіонбуд України, 2009. 33 с.
37. Зінкевич О. Г. Раціональне проектування каркасів малоповерхових будівель та надбудов з легких сталевих тонкостінних конструкцій : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01. Дніпро, 2013. 20 с.
38. Іваник Ю. І. Міцність та деформативність комбінованих сталезалізобетонних попередньо напружених конструкцій : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Львів, 2017. 20 с.
39. Ізбаш М.Ю. Локально попередньо напружені сталезалізобетонні конструкції для нового будівництва та реконструкції : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Харків, 2008. 42 с.
40. Кітов Ю. П., Ватуля Г. Л., Кирієнко С. М. Автоматизация проектирования в строительстве и гидротехнике. Вісник Одеського національного морського університету. 2003. № 10. С. 160–165.
41. Клименко Є. В. Методологія оцінювання, прогнозування та регулювання технічного стану будівель і споруд із залізобетону : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.23.01. Львів, 2008.
42. ДСТУ Б В.2.6-75:2008. Конструкції будинків і споруд. Конструкції металеві будівельні. Загальні технічні умови Київ: Мінрегіонбуд України, 2009. 15 с.

43. Лавриненко Л.И. Стальные малоэлементные стропильные фермы для покрытий производственных зданий : автореф. дис. на соискание научн. степени канд. техн. наук : спец. 05.23.01. Киев, 1989. 22 с.
44. Лавриненко Л., Зотіна А. Ефективні параметри малоелементних шпренгельних ферм із застосуванням двотаврових елементів з гофрованими стінками. *Building constructions. Theory and practice*. 2019. Т. 1, № 4. С. 56–69.
45. Лащенко М. Н. Регулирование напряжений в металлических конструкциях. Москва : Госстройиздат, 1966. 191 с.
46. Мельников Н. П. Основные критерии выбора конструктивной формы. *Строительство и архитектура*. № 9. С. 3–11.
47. Мельников Н. П. Металлические конструкции: современное состояние и перспективы развития. Москва : Стройиздат, 1983. 543 с.
48. Місюнайте Є., Юозапайтіс А., Меркевічюс Т. Удосконалення регулювання зусиль у зворотному вантовому мосту при нелінійному моделюванні. *Металеві конструкції*. 2013. Т. 19, № 1. С. 59–66.
49. Налєпа А.И. Стальная стропильная ферма с перфорированным верхним поясом переменной жесткости: дис. на соискание научн. степени канд. техн. наук : спец. 05.23.01. Киев, 1989. 193 с.
50. Немчинов Ю. І. Метод просторових скінчених елементів (з застосуванням до розрахунку будівель та споруд): монографія. Київ: НДІБК, 1995. 386 с.
51. Ольков Я. И. Оптимизация и выбор рациональных конструктивных форм металлических конструкций. *Металеві конструкції: праці VII Української наук.-техн. конф. Дніпропетровськ, 2000*. С. 105–108.
52. Патент на корисну модель 144193 U Україна UA, МПК E04C 3/02 (2006.01) E04C 3/10 (2006.01).) Малоелементна шпренгельна ферма підвищеної жорсткості / [Гоголь М.В., Котів М. В., Коцій Я. Й., Пелешко І. Д., Сидорак Д. П., Гоголь М. М. (Україна)]; заявник і власник патенту Національний університет «Львівська політехніка». Винахідники: Гоголь Мирон Васильович (UA), Котів Михайло Васильович (UA), Коцій Ярослав Йосипович (UA),

Пелешко Іван Дмитрович (UA), Сидорак Дмитро Павлович (UA), Гоголь Марко Миронович (UA)– № u 2020 02365; заявл. 13.04.2020; опубл. 10.09.2020, Бюл. № 17. – 5 с.

53. Патент на корисну модель № 156643 Україна UA, МПК E04C E04C 3/02 (2006.01), E04C 3/11 (2006.01). Раціональна кроквяна сталева ферма / [Шимановський О. В., Гоголь М. В., Сидорак Д. П., Гоголь М. М. (Україна)]; заявник і власник патенту Національний університет «Львівська політехніка». Тов «Український інститут сталевих конструкцій імені В. М. Шимановського». Винахідники: Шимановський Олександр Віталійович, Гоголь Миرون Васильович, Сидорак Дмитро Павлович, Гоголь Марко Миронович - № u 2020 02365; заявл. 13.04.2020; опубл. 24.07.2024, Бюл. № 30.

54. Перельмутер А. В. Управление поведением несущих конструкций. Київ: УФІМБ, 1998. 148 с.

55. Пермяков В. О., Гоголь М. В. Проблема регулювання напружено-деформованого стану плоских стержневих металевих конструкцій. Теорія і практика будівництва: вісник нац. ун-ту «Львівська політехніка». Львів, 2004. № 495. С. 154–157.

56. Пермяков В. А., Защипась С. П. Поиск оптимальной топологии стержневых систем. Металлические конструкции: тезисы докл. VI-ой Украинской науч.-техн. конф. Київ; Миколаїв, 1996. С. 16–17.

57. Пічугін С. Ф., Чичулін В. П. Нові конструктивні системи легких комбінованих ферм. Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. Вип. 31. Рівне, 2015. С. 486–491.

58. Пічугін С. Ф., Чичулін В. П., Чичуліна К. В. Нові ресурсоекономні конструкції з профільних труб. Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. Вип. 32. Рівне, 2016. С. 243–248.

59. Пичугин С. Ф., Семко О. В., Труссов Г. М. Современные проблемы проектирования стальных несущих конструкций в промышленном и гражданском строительстве. Современное промышленное и гражданское строительство. 2005. Т. 1, № 1. С. 53–66.

60. Подільський міст над Дніпром. URL: <https://www.ukrinform.ua/rubric-kyiv/2281693-podilskij-mist-nad-dniprom-se-3-roki-i-mozna-ihati.html>

61. Проектування раціональних комбінованих металевих конструкцій : навч. посіб. / В. О. Пермяков та ін. ; ред. В. О. Пермяков. Львів : Вид-во Нац. ун-ту «Львів. політехніка», 2005. 180 с.

62. Рабинович И. М. Основы строительной механики стержневых систем. Москва: Госстройиздат, 1956. 454 с.

63. Развитие металлических конструкций: Работы школы Н. С. Стрелецкого / Кузнецов В. В и др.; под ред. В. В. Кузнецова. Москва: Стройиздат, 1987. 576 с.

64. Пермяков В. О., Гоголь М. В. Рекомендації з проектування раціональних металевих несучих конструкцій перекрить та покрить. Львів: Видавництво Національного університету „Львівська політехніка”, 2006. 24 с.

65. Романюк В. В. Регулирование напряжений в легких стальных рамах. Совершенствование строительных материалов, технологий и методов расчета конструкций в новых экономических условиях. Сумы: “Мрія”, 1994. С. 213.

66. Савицький М. В., Гросман С. О., Титюк А. О. Розробка нового алгоритму обробки даних для топологічної раціоналізації. Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Инновационные технологии жизненного цикла объектов жилищно-гражданского, промышленного и транспортного назначения. Вип. 82. 2015. С. 170–178.

67. Сахновский М. М. Легкие конструкции стальных каркасов зданий и сооружений. – Киев: Будівельник, 1984. 160 с.

68. Семірненко Ю. І. Регулювання напружено-деформованого стану залізобетонних балок: автореф. дис. ... канд. техн. наук 05.23.01. Харків, 1998. 16 с.

69. Семко О. В., Воскобійник О. П. Керування ризиками при проектуванні та експлуатації сталезалізобетонних конструкцій: монографія. Полтава: ПолтНТУ, 2012. 514 с.

70. Стороженко Л. І., Гасій Г. М., Гапченко С. А. Просторові сталезалізобетонні структурно-вантові покриття: монографія. Полтава: ТОВ «АСМІ», 2015. 218 с.

71. Стоянов В. В. Новые подходы в управлении несущей способностью конструкций. Современные строительные конструкции из металла и древесины. Одесса, 2001. С. 164–168.

72. Трофимович В. В., Пермяков В. А. Оптимальное проектирование металлических конструкций. Киев: Будівельник, 1981. 136 с.

73. Ференчик П., Тохачек М. Предварительно напряженные стальные конструкции: пер. с нем. – Москва: Стройиздат, 1979. 423 с.

74. Чисельні та експериментальні методи раціонального проектування та зведення конструктивних систем / В. Бабаєв та ін. Київ : Сталь, 2017. 404 с.

75. Чихладзе Е. Д. Удосконалення методів розрахунку і проектування сталобетонних і сталевих конструкцій промислових будівель і споруд. Харків, 2002. 126 с.

76. Шимановский В. Н. О путях снижения металлоемкости и перспективах совершенствования легких металлических конструкций. Известия вузов. Строительство и архитектура. 1985. № 10. С. 4–11.

77. Шимановський О. В., Гоголь М. В. Комбіновані сталеві конструкції нової генерації. Міжнародна конференція «BUILDING INNOVATIONS – 2018». Баку, 2018. С. 219–221.

78. Шимановський О. В., Гоголь М. В. Новий підхід до проектування ефективних комбінованих сталевих ферм. I International Scientific and Practical Conference «TECHNOLOGY, ENGINEERING AND SCIENCE – 2018», London. 2018. С. 16–18.

79. Шимановський О. В., Цихановський В. К., Талах С. М. Оптимізація просторових комбінованих систем. За редакцією О. В. Шимановського. Київ: Сталь, 2012. 462 с.

80. Шмуклер В. С., Городецкий А. С. Формирование расчетных моделей в условиях регулирования напряженно-деформированным состоянием конструкции. Коммунальное хозяйство городов. 2002. № 39. С. 36–42.

81. Шмуклер В. С. Оптимизация параметров строительных конструкций в условиях регулирования их напряженно-деформированного состояния. Коммунальное хозяйство городов. Київ: Техніка, 1997. С. 3–14.

82. Шмуклер В. С., Краснова К. С. Регулювання напружено-деформованого стану прогонової будови мосту спеціального виду. Вісник національного університету «Львівська політехніка». Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2012. № 742. С. 238–244.

83. Юрченко В. В. Оптимізація конструктивної форми перехресних металевих систем: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01. Київ, 2003. 19 с.

84. Achtziger W. On simultaneous optimization of truss geometry and topology. Structural and Multidisciplinary Optimization. 2007. Vol. 33, no. 4-5. P. 285–304. URL: <https://doi.org/10.1007/s00158-006-0092-0> (date of access: 06.09.2024).

85. Assimi H., Jamali A., Nariman-zadeh N. Sizing and topology optimization of truss structures using genetic programming. Swarm and Evolutionary Computation. 2017. Vol. 37. P. 90–103. URL: <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2017.05.009> (date of access: 06.09.2024).

86. Bendsøe M. P., Sigmund O. Topology Optimization. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2004. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-05086-6> (date of access: 06.09.2024).

87. Bilyk S., Tonkacheiev V. Determining sloped-load limits inside von Mises truss with elastic support. Materiali in tehnologije. 2018. Vol. 52, no. 2. P. 105–109. URL: <https://doi.org/10.17222/mit.2016.083> (date of access: 06.09.2024).

88. Tall von-Mises trusses' skew-symmetric deformation / S. Bilyk et al. *Strength of materials and theory of structures*. 2020. No. 105. P. 114–126. URL: <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2020.105.114-126> (date of access: 06.09.2024).
89. Design of truss structures through reuse / J. Brütting et al. *Structures*. 2019. Vol. 18. P. 128–137. URL: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2018.11.006> (date of access: 06.09.2024).
90. CEN – European Committee for Standardisation. EN 1993 Eurocode 3: Design of steel structures, Part 1-3: General rules – supplementary rules for cold-formed members and sheeting (incorporating CEN corrigendum Nov. 2009). Brussels, Belgium, 2005.
91. Clune R. P. Explorative structural design : M.Sc. thesis. 83 p. URL: <http://hdl.handle.net/1721.1/60798>.
92. B.Braun | MP Ingénieurs Conseils SA - Crisser. *Accueil | MP Ingénieurs Conseils SA - Crisser*. URL: <https://mp-ingenieurs.ch/references/constructions-industrielles/91/bbraun-crissier> (date of access: 06.09.2024).
93. Sydorak D., Hohol M. Improving the constructive efficiency of steel combined trusses. *Theory and Building Practice*. 2022. Vol. 2022, no. 1. P. 18–26. URL: <https://doi.org/10.23939/jtbp2022.01.018> (date of access: 06.09.2024).
94. Gaganelis G., Mark P. Downsizing weight while upsizing efficiency: An experimental approach to develop optimized ultra-light UHPC hybrid beams. *Structural concrete*. 2019. Vol. 20, no. 6. P. 1883–1895. URL: <https://doi.org/10.1002/suco.201900215> (date of access: 06.09.2024).
95. Ways to improve the combined steel structures of coatings / M. Gogol et al. *Lecture notes in civil engineering*. Cham, 2020. P. 53–58. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-42939-3_6 (date of access: 06.09.2024).
96. Gogol M. The combined metal structures with the calculating regulation efforts. *Journal of civil engineering, environment and architecture*. 2015. Vol. XXXII, no. 4/2015. P. 107–118. URL: <https://doi.org/10.7862/rb.2015.181> (date of access: 06.09.2024).

97. Gogol M. Shaping of effective steel structures. *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej. Budownictwo i Inżynieria Środowiska*. 2009. Vol. 52, no. 264. P. 43–56.

98. Goremikins, V., Rocēns, K., Serdjuks, D. Evaluation of Rational Parameters of Trussed Beam. *Construction Science*. 2010, Vol.11,P.21-25.

99. Hadžović R., Horozović M. Comparison of the steel N and V lattice structure of the hall by structural analysis. *New technologies, development and application IV*. Cham, 2021. P. 1069–1076. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-75275-0_118 (date of access: 06.09.2024).

100. Hasançebi O., Dogan E. Evaluation of topological forms for weight-effective optimum design of single-span steel truss bridges. *Asian journal of civil engineering*. 2011. Vol. 12, no. 4. P. 431–448.

101. He L., Gilbert M. Rationalization of trusses generated via layout optimization. *Structural and multidisciplinary optimization*. 2015. Vol. 52, no. 4. P. 677–694. URL: <https://doi.org/10.1007/s00158-015-1260-x>

102. High strength steel intubular trusses / T. Tiainen et al. *Proceedings of the METNET Seminar 2013 in Lulea*. 2013. URL: <https://ssabwebsitecdn.azureedge.net/-/media/files/en/hollow-sections/technical-articles/technical-article-high-strength-steel-in-tubular-trusses.pdf?m=20151110094829>.

103. Ahmadvand H., Habibi A. Optimum design of shape and size of truss structures via a new approximation method. *Structural engineering and mechanics*. 2020. Vol. 76, no. 6. P. 799–821.

104. Structural–Parametric synthesis of steel combined trusses / M. Hohol et al. *Lecture notes in civil engineering*. Cham, 2021. P. 163–171. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-85043-2_16 (date of access: 07.09.2024).

105. Rationalization of the topology of steel combined truss / M. Hohol et al. *Lecture notes in mechanical engineering*. Cham, 2021. P. 97–106. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-85057-9_9 (date of access: 07.09.2024).

106. Structural synthesis of rational constructive forms of combined steel trusses / M. Hohol et al. Lecture notes in civil engineering. Cham, 2023. P. 187–197. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-031-17385-1_16 (date of access: 07.09.2024).

107. Inšpirácia získaná v prírode | ASB.sk. ASB.sk. URL: <https://www.asb.sk/stavebnictvo/konstrukcie-a-prvky/ocelove-konstrukcie/inspiracia-ziskana-v-prirode>. (date of access: 06.09.2024).

108. PKW Ausstellungshalle. BRUNO BRÜNEN. URL: <https://bruenen-stahlbau.de/industrie-gewerbehallen/pkw-ausstellungshalle/> (date of access: 06.09.2024).

109. Stahlbau Roth. URL: <https://stahlbau-roth.de/> (date of access: 06.09.2024).

110. Steel frame structures - WOLF System. URL: <https://www.wolfsystem.at/en-at/product-lines/industrial-and-commercial-construction/industrial-construction/steel-frame-structures> (date of access: 06.09.2024).

111. Hollow sections – build a stronger future with less steel. URL: <https://www.ssab.com/en-gb/brands-and-products/steel-categories/hollow-sections>.

112. Janušaitis R., Keras V., Mockienė J. Development of methods for designing rational trusses. Journal of civil engineering and management. 2003. Vol. 9, no. 3. P. 192–197. URL: <https://doi.org/10.3846/13923730.2003.10531325>.

113. Martini K. Rational and irregular: questioning traditional concepts of efficiency and esthetics in structural design. Journal of structural engineering. 2017. Vol. 143, no. 6. P. 02517001. URL: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)st.1943-541x.0001748](https://doi.org/10.1061/(asce)st.1943-541x.0001748) (date of access: 07.09.2024).

114. Arch under-tension footbridges / J. Lim et al. URL: http://www.cospi.co.kr/upload/board/2015051884822_pap88lim.pdf.

115. Martínez P., Martí P., Querin O. M. Growth method for size, topology, and geometry optimization of truss structures. Structural and multidisciplinary optimization. 2006. Vol. 33, no. 1. P. 13–26. URL: <https://doi.org/10.1007/s00158-006-0043-9> (date of access: 07.09.2024).

116. Mela K., Koski J. Distributed loads in truss topology optimization. 10th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization. 2013, P. 1-10,
117. Gogol M., Zygun A., Maksjuta N. New effective combined steel structures. International journal of engineering & technology. 2018. Vol. 7, no. 3.2. P. 343. URL: <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i3.2.14432> (date of access: 07.09.2024).
118. Hohol M., Sydorak D. Structural efficiency of steel combined trusses. Theory and building practice. 2022. Vol. 2022, no. 2. P. 58–67. URL: <https://doi.org/10.23939/jtbp2022.02.058> (date of access: 07.09.2024).
119. Analysis of calculation regulation methods in steel combined trusses / M. Hohol et al. Theory and building practice. 2021. Vol. 2021, no. 1. P. 64–71. URL: <https://doi.org/10.23939/jtbp2021.01.064> (date of access: 07.09.2024).
120. Regulation of stress-deformed state in compressed elements of steel frames / M. Hohol et al. Theory and building practice. 2021. Vol. 2021, no. 2. P. 24–31. URL: <https://doi.org/10.23939/jtbp2021.02.024> (date of access: 07.09.2024).
121. Hohol M., Sydorak D., Hohol M. New design form of steel combined roof trusses. Theory and building practice. 2023. Vol. 2023, no. 1. P. 21–27. URL: <https://doi.org/10.23939/jtbp2023.01.021> (date of access: 07.09.2024).
122. Hohol M., Sydorak D., Hohol M. Synthesis of rational constructive solution of steel roof trusses. Theory and building practice. 2024. Vol. 2024, no. 1. P. 7–16. URL: <https://doi.org/10.23939/jtbp2024.01.007> (date of access: 07.09.2024).
123. Synthesis of rational topology of combined steel trusses / M. Hohol et al. Reliability and durability of railway transport engineering structure and buildings, Kharkiv, Ukraine. 2023. URL: <https://doi.org/10.1063/5.0121427>.
124. Zinkevych O., Savytskyi M., Zinkevych A. Constructional features of the stiffness of shearwalls in lightweight steel framed buildings. Slovak journal of civil engineering. 2019. Vol. 27, no. 4. P. 40–44. URL: <https://doi.org/10.2478/sjce-2019-0030> (date of access: 07.09.2024).
125. [Pichugin S.](#) Reliability estimation of industrial building structures / S. [Pichugin](#) // Magazine of Civil Engineering, Volume 83 (7), pp. 24–37 (2018).

126. Pichugin S. F., Chichulin V. P., Chichulina K. V. Spatial structures of closed profiles. *ACADEMIC JOURNAL series: industrial machine building, civil engineering*. 2017. Vol. 1, no. 48. P. 138–143. URL: <https://doi.org/10.26906/znp.2017.48.787> (date of access: 07.09.2024).

127. Optimization of a truss structure used to design of the manipulator arm from a set of components / J. Rojíček et al. *Applied sciences*. 2021. Vol. 11, no. 21. P. 10193. URL: <https://doi.org/10.3390/app112110193> (date of access: 07.09.2024).

128. Ruiz-Teran A. M., Aparicio A. C. Structural behaviour and design criteria of under-deck cable-stayed bridges and combined cable-stayed bridges. Part 1: single-span bridges. *Canadian journal of civil engineering*. 2008. Vol. 35, no. 9. P. 938–950. URL: <https://doi.org/10.1139/108-033> (date of access: 07.09.2024).

129. Ruiz-Teran A. M., Aparicio A. C. Two new types of bridges: under-deck cable-stayed bridges and combined cable-stayed bridges – the state of the art. *Canadian journal of civil engineering*. 2007. Vol. 34, no. 8. P. 1003–1015. URL: <https://doi.org/10.1139/107-017> (date of access: 07.09.2024).

130. Senatore G., Duffour P., Winslow P. Synthesis of minimum energy adaptive structures. *Structural and multidisciplinary optimization*. 2019. Vol. 60, no. 3. P. 849–877. URL: <https://doi.org/10.1007/s00158-019-02224-8>.

131. Senatore G., Wang Y. Topology optimization of adaptive structures: new limits of material economy. *Computer methods in applied mechanics and engineering*. 2024. Vol. 422. P. 116710. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cma.2023.116710> (date of access: 07.09.2024).

132. Stolpe M. Truss optimization with discrete design variables: a critical review. *Structural and multidisciplinary optimization*. 2015. Vol. 53, no. 2. P. 349–374. URL: <https://doi.org/10.1007/s00158-015-1333-x> (date of access: 07.09.2024).

133. Image processing–based real-time displacement monitoring methods using smart devices / A. Shrestha et al. *Structural control and health monitoring*. 2019. Vol. 27, no. 2. URL: <https://doi.org/10.1002/stc.2473> (date of access: 07.09.2024).

134. Efficient size and shape optimization of truss structures subject to stress and local buckling constraints using sequential linear programming / J. Schwarz et al.

Structural and multidisciplinary optimization. 2018. Vol. 58, no. 1. P. 171–184. URL: <https://doi.org/10.1007/s00158-017-1885-z> (date of access: 07.09.2024).

135. Trends of development of combined steel trusses of the new generation / O. Shimanovsky et al. Lecture notes in civil engineering. Cham, 2024. P. 107–114. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-031-55068-3_11 (date of access: 07.09.2024).

136. Sobek W. Ultra-lightweight construction. International journal of space structures. 2016. Vol. 31, no. 1. P. 74–80. URL: <https://doi.org/10.1177/0266351116643246> (date of access: 07.09.2024).

137. Toklu Y. C. Nonlinear analysis of trusses through energy minimization. Computers & structures. 2004. Vol. 82, no. 20-21. P. 1581–1589. URL: <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2004.05.008> (date of access: 07.09.2024).

138. Vatulia G., Komagorova S., Pavliuchenkov M. Optimization of the truss beam. Verification of the calculation results. MATEC web of conferences. 2018. Vol. 230. P. 02037. URL: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201823002037> (date of access: 07.09.2024).

139. Truss geometry and topology optimization with global stability constraints / A. G. Weldeyesus et al. Structural and multidisciplinary optimization. 2020. Vol. 62, no. 4. P. 1721–1737. URL: <https://doi.org/10.1007/s00158-020-02634-z> .

140. M. Yashwanth, M. Divya Shree, K. Shreyas Comparative study of different configuration of roof truss for an industrial shed. International journal of emerging trends in engineering and development. 2018. Vol. 2, no. 8. URL: <https://doi.org/10.26808/rs.ed.i8v2.03> .

141. Peleshko I. D., Yurchenko V. V. Parametric optimization of metal rod structures using the modified gradient projection method. International applied mechanics. 2021. Vol. 57, no. 4. P. 440–454. URL: <https://doi.org/10.1007/s10778-021-01096-0> (date of access: 07.09.2024).

ДОДАТКИ

Додаток А

ПЕРЕЛІК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях України:

1. Myron Hohol, Ivan Peleshko, Alexey Petrenko, Dmytro Sydorak (2021) Analysis of calculation regulation methods in steel combined trusses. Scientific Journal "Theory and Building Practice", вісник нац. ун-ту «Львівська політехніка»
2. Hohol M., Kotiv M., Peleshko I., Sydorak D. (2021) Regulation of stress-deformed state in compressed elements of steel frames. Scientific Journal "Theory and Building Practice", вісник нац. ун-ту «Львівська політехніка» *ТБПР*. 2021; Volume 3, Number 2: 24-31 <https://doi.org/10.23939/jtbp2021.02.024>
3. Dmytro Sydorak and Myron Hohol (2022) Improving the constructive efficiency of steel combined trusses. Scientific Journal "Theory and Building Practice", вісник нац. ун-ту «Львівська політехніка» *ТБПР*. 2022; Volume 4, Number 1: 18-26
4. Myron Hohol and Dmytro Sydorak (2022) Structural efficiency of steel combined trusses. Scientific Journal "Theory and Building Practice", вісник нац. ун-ту «Львівська політехніка» *ТБПР*. 2022; Volume 4, Number 2: 58-67
5. Myron Hohol, Dmytro Sydorak, M. Hohol (2023) New design form of steel combined roof trusses. Scientific Journal "Theory and Building Practice", вісник нац. ун-ту «Львівська політехніка» *ТБПР*. 2023; Volume 5, Number 1: 21-27
6. Myron Hohol, Pavlo Dynka, Dmytro Sydorak, Marko Hohol (2023) Efficiency of rational combined steel trusses. Scientific Journal "Theory and Building Practice", вісник нац. ун-ту «Львівська політехніка» *ТБПР*. 2023; Volume 5, Number 2: 35-41
7. Myron Hohol, Dmytro Sydorak, Marko Hohol (2024) Synthesis of rational constructive solution of steel roof trusses. Scientific Journal "Theory and Building

Practice", вісник нац. ун-ту «Львівська політехніка» ЖТБР. 2024; Volume 6, Number 1: 7-16

Публікації у наукових періодичних виданнях інших держав та виданнях України, які включено до міжнародних наукометричних баз:

8. Hohol M., Gasii G., Pents V., Sydorak D. (2022) Structural—Parametric Synthesis of Steel Combined Trusses. In: Onyshchenko V., Mammadova G., Sivitska S., Gasimov A. (eds) Proceedings of the 3rd International Conference on Building Innovations. ICBI 2020. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 181. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85043-2_16

9. Hohol M., Marushchak U., Peleshko I., Sydorak D. (2022) Rationalization of the Topology of Steel Combined Truss. In: Bieliatynskyi A., Breskich V. (eds) Safety in Aviation and Space Technologies. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85057-9_9

10. Hohol, M., Sydorak, D., Sivitska, S., Cherednyk, L. (2023). Structural Synthesis of Rational Constructive Forms of Combined Steel Trusses. In: Onyshchenko, V., Mammadova, G., Sivitska, S., Gasimov, A. (eds) Proceedings of the 4th International Conference on Building Innovations. ICBI 2022. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 299. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-17385-1_16

11. Myron Hohol, Uliana Marushchak, Tatyana Galinska, Dmytro Sydorak; Synthesis of rational topology of combined steel trusses. AIP Conf. Proc. Reliability And Durability Of Railway Transport Engineering Structure And Buildings 31 May 2023; 2684 (1): 030015.

12. Shimanovsky, O., Hohol, M., Melnyk, I., Sydorak, D. (2024). Trends of Development of Combined Steel Trusses of the New Generation. In: Zabulonov, Y., Peer, I., Zheleznyak, M. (eds) Liquid Radioactive Waste Treatment: Ukrainian Context. LWRT 2022. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 469. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-55068-3_11

Патент:

13. Патент на корисну модель № 144193. МПК E04C 3/02 (2006.01) Малоелементна шпренгельна ферма підвищеної жорсткості / М.В. Гоголь, М.В. Котів, Я.Й. Коцій, І.Д. Пелешко, Д.П. Сидорак, М.М. Гоголь; власник НУ «Львівська політехніка». - №2020 02365; заявл. 10.04.2020; опубл. 16.09.2020. Бюл. № 17. – 4 с.

14. Патент України № 156643 МПК) МПК E04C 3/02 (2006.01) E04C 3/11 (2006.01) Раціональна кроквяна сталева ферма / Шимановський О.В., Гоголь М.В., Сидорак Д.П., Гоголь М.М.; власник НУ «Львівська політехніка». - № 2023 03101; заявл. 20.06.2023; опубл. 24.07.2024. Бюл. № 30. – 4 с.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

15. Д.Сидорак. «Підвищення ефективності роботи комбінованих сталевих ферм при несиметричному навантаженні». Фізичні процеси в енергетиці, екології та будівництві : тези доп. III Всеукр. наук.-практ. конф. здобув. вищ. осв. та молод. вч. — Одеса: ОДАБА, 2020.

16. Сидорак Д. П. Зниження емісії діоксиду вуглецю при виготовленні сталевих конструкцій // Сталій розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування : 6-й Міжнародний молодіжний конгрес, Львів, 09–10 лютого 2021 р. : збірник матеріалів. – 2021

17. Д.Сидорак. «Оптимізація параметрів комбінованих сталевих ферм». Фізичні процеси в енергетиці, екології та будівництві : тези доп. IV Всеукр. наук.-практ. конф. здобув. вищ. осв. та молод. вч. — Одеса: ОДАБА, 2021.

18. М.В. Гоголь, У.Д. Марущак, Т.А. Галінська, Д.П. Сидорак (2021) «Синтез раціональної топології комбінованих сталевих ферм» // 9-а Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті», Харків, 17-19 листопада 2021 р.: Тези доповідей. - Харків: УкрДУЗТ, 2021. - с. 105-106

19. Шимановський Олександр, Гоголь Мирон, Сидорак Дмитро (2022) Тенденції розвитку комбінованих сталевих ферм нової генерації. Комплексні

композитні конструкції будівель та споруд в умовах воєнного стану (CSCS-2022) // Зб. наук. пр. за матеріалами XIV Міжнародної науково-технічної конференції – Полтава: НУПП імені Юрія Кондратюка, 2022, 129-131.

20. Гоголь М., Мельник І., Галінська Т., Сидорак Д. (2022) Параметрична оптимізація комбінованих сталевих ферм. «ENVIRONMENT RECOVERY AND RECONSTRUCTION: WAR CONTEXT 2022»: Збірник матеріалів Міжнародної науково-практичної конференції «ENVIRONMENT RECOVERY AND RECONSTRUCTION: WAR CONTEXT 2022», (17–18 листопада 2022 року, Полтава). Полтава : НУПП, 2022, 36-37

Додаток Б.

АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ У ВИРОБНИЦТВО

Додаток Б.1

«PELE-ENGINEERING»
Limited Liability Company
EDRPOU: 43273856
Ukraine, 79034
Lviv, 2 Buika str.
Email: inbox@pelex.com.ua



Товариство з обмеженою
відповідальністю
«ПЕЛЕ-ІНЖИНІРИНГ»
ЄДРПОУ: 43273856
Україна, 79034
м. Львів, вул. Буйка 2
Email: inbox@pelex.com.ua

№_04/11/21 від 4 листопада 2021 р.

Довідка впровадження результатів науково-дослідної роботи

Результати дисертаційних досліджень Сидорака Дмитра Павловича за темою «Рациональні сталеві комбіновані кроквяні ферми» були застосовані у наступних проектах:

- Реконструкція житлового будинку за адресою: вул. Пироговського Олександра, буд. 16а у Солом'янському районі м. Кисва. Договір № 1050/01/19.11.2020 від 19.11.2020р
- Будівництво бази по накопиченню сільгоспродукції та відвантаження на морські судна через причал №4, розташованої за адресою: м. Миколаїв, вул. Айвазовського 14. Договір №15/07/21 від 15.07.2021

Дані наукові дослідження по розробці раціональних комбінованих сталевих кроквяних ферм, є актуальними та мають значне практичне застосування, оскільки розробка сталевих конструкцій покрить із зменшеною металомісткістю с актуальною інженерною задачею.

Директор
ТОВ «Пеле-Інжиніринг»



Мудрий І.Б.

Private enterprise "Budkomplekt plus"
Registered address: Lviv, street
Kulparkivska, 95. Postal address:
Lviv, street Kulparkivska, 95
USREOU code 30822604

Приватне підприємство
"Будкомплект-Плюс"
Код ЄДРПОУ 30822604
м. Львів, вул. Кульпарківська, 95
bk-plus@i.ua

Вих №18/05 від 18 травня 2022 р.

Довідка
про впровадження результатів науково-дослідної роботи

Приватне підприємство "Будкомплект-Плюс" в своїй практичній діяльності (Нове будівництво гараж-боксу на вул. Генерала Юнаківа, 10 в м. Львові) використовує результати дисертаційної роботи Сидорака Д.П. на тему «Рациональні сталеві комбіновані крокв'яні ферми», при проектуванні елементів несучих конструкцій покриття споруд промислового комплексу західного регіону України.

Зокрема, при розробці проєкту (проєктів): *Нове будівництво гараж-боксу на вул. Генерала Юнаківа, 10 в м. Львові*

Використання цих результатів дозволяє скоротити терміни проектування та зменшити витрату матеріалів порівняно з типовими конструктивними рішеннями.

Директор
ТОВ ІП «Будкомплект Плюс»



Шумило Р.О.



Товариство з обмеженою відповідальністю
Український інститут сталевих конструкцій
імені В.М.Шимановського

Поштова адреса: Україна, 02125, м. Київ, вул. В.Шимановського, 2/1
Тел.: (044) 543-93-87; факс: (044) 543-97-69; ел. пошта: uisc@urdisc.com.ua
Веб-сайт: <http://urdisc.com.ua>

Вих. № _____ від 30.05.2024 р. На № _____ від _____

ДОВІДКА

впровадження результатів науково-дослідної роботи

Питання, що розглядаються у дисертаційному дослідженні аспіранта Сидорака Дмитра Павловича за темою «Раціональні сталеві комбіновані кроквяні ферми» відповідають напрямкам діяльності Інституту, а результати досліджень були використані при проектуванні:

- основних несних просторових великопрогонових металоконструкцій каркасу найбільшої торговельної зали (блоку № 6) ТРЦ «River Mall» в м. Києві;

- реконструкції висувного підйимального пристрою для обслуговування монумента «Батьківщина-Мати» Меморіального комплексу «Національний музей історії України у Другій світовій війні»,

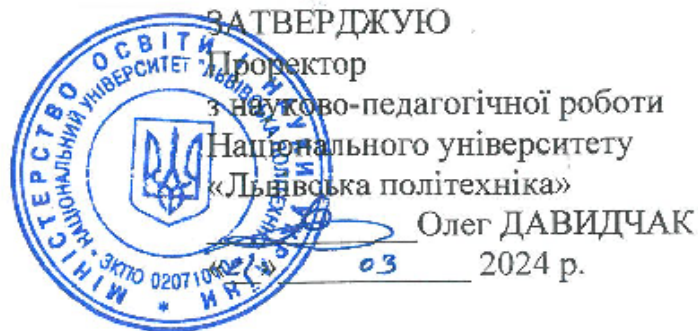
а також при розробленні проектних пропозицій щодо відновлення окремих металевих конструкцій телевізійної вежі Київської філії Концерну РРТ.

Вважаємо даний науковий напрям та тему досліджень актуальними та такими, що мають широке практичне застосування, як при зведенні нових об'єктів, так і при реконструкції існуючих споруд. Отримані результати дисертаційних досліджень дозволяють значно знизити витрати сталі на конструкції покриття, зменшити трудомісткість їх виготовлення з одночасним підвищенням їх надійності та ефективності.

Генеральний директор,
член-кореспондент НАН України,
Лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки,
заслужений діяч науки і техніки України,
доктор технічних наук, професор

Олександр ШИМАНОВСЬКИЙ





АКТ

про використання результатів дисертаційної роботи на тему: **«Рациональні сталеві комбіновані кроквяні ферми»**, аспіранта кафедри будівельне виробництво Сидорака Дмитра Павловича

Нами, головою науково-методичної ради Інституту будівництва та інженерних систем, к.т.н., доцентом Позняк О.Р., завідувачем кафедри будівельного виробництва, д.т.н., професором Саницьким М.А. складено даний акт про те, що результати дисертаційної роботи Сидорака Д.П. впроваджені в навчальний процес на кафедрі будівельного виробництва, зокрема:

- в дисципліні «Новітні технології в будівництві», що викладається для студентів першого рівня вищої освіти спеціальності 192 Будівництво та цивільна інженерія, вибіркового блоку «Міське будівництво та господарство» (розділ «Новітні технології у влаштуванні конструкцій даху»);
- в дисципліні «Інноваційні і BIM технології в будівництві», що викладається для студентів другого рівня вищої освіти спеціальності 192 Будівництво та цивільна інженерія освітньо-професійної програми «Міське будівництво та господарство» (розділи «Технологія влаштування дахового покриття з метою використання мансардних приміщень» і «Інформаційне моделювання будинків»);
- в дипломному проектуванні студентів кафедри «Будівельне виробництво» першого та другого рівнів вищої освіти.

Голова НМР ІБІС
к.т.н., доцент

Оксана ПОЗНЯК

Завідувач кафедри будівельне
виробництво, д.т.н., професор

Мирослав САНИЦЬКИЙ

Додаток В

ПРИКЛАД РОЗРАХУНКУ РАЦІОНАЛЬНОЇ КОМБІНОВАНОЇ ФЕРМИ З РЕГУЛЮВАННЯМ НДС

Виконаємо розрахунок раціональної комбінованої ферми з регулюванням НДС у програмному комплексі «Ліра-САПР 2016 R5» методом скінчених елементів (рис. В.1). Вихідні дані для розрахунку: проліт конструкції $l = 30$ м, нормативне рівномірно розподілене навантаження $q_n = 12.75$ кН/м, характеристики матеріалів елементів наведено у таблиці В.1

Таблиця В.1 Характеристики матеріалів елементів комбінованої ферми

Найменування елемента	Марка сталі	Розрахунковий опір R_y , МПа
Верхній пояс	С345	335
Нижній пояс	С345	335
Стояки	С255	250
Розкоси	А400С	365

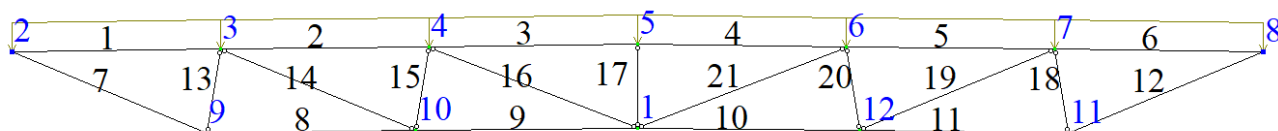


Рисунок В.1 – Розрахункова схема раціональної комбінованої ферми

Попередньо створюємо розрахункову схему за допомогою команди «Генерація ферм». Обираємо потрібну топологію (обрис поясів, обрис решітки), задаємо геометричні параметри конструкції (проліт, висота, будівельний підйом, кількість панелей).

Далі задаються характеристики стрижнів, типи перерізів, поперечні перерізи, умови роботи, матеріали та їх характеристики. На стрижні верхнього поясу прикладається рівномірно розподілене навантаження.

Виконуємо попередній розрахунок розрахункової схеми із заданими січеннями стрижнів.

Розглянемо результат сталевого розрахунку, відкривши вкладку «Сталь» тиа обравши перевірку за I групою граничних станів (Рис. В.2).

Результати попереднього розрахунку наведені на рис. В.3-5 та табл. В.2.

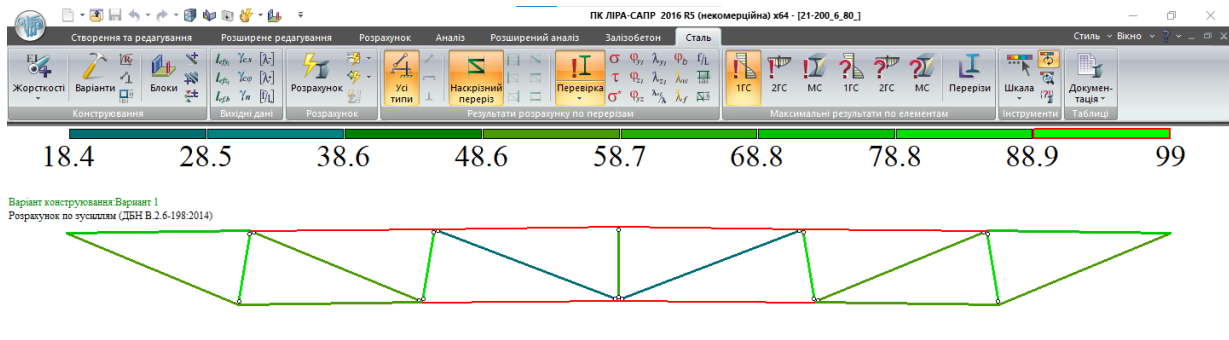


Рисунок В.2 – Перевірка сталевих січень за I групою граничних станів

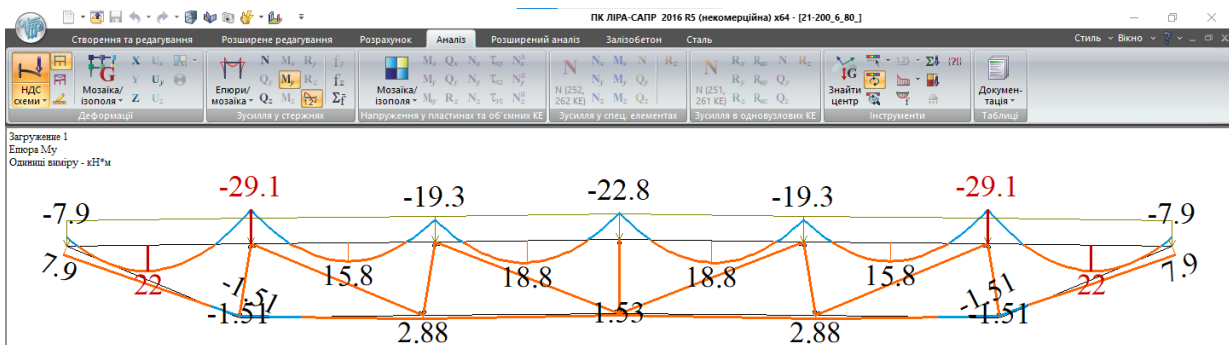


Рисунок В.3 – Епюра згинальних моментів при попередньому розрахунку

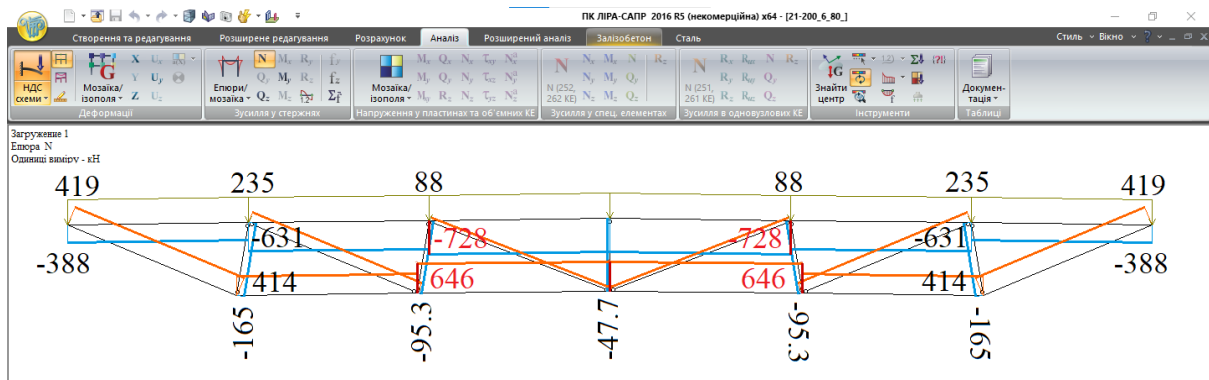


Рисунок В.4 – Епюра поздовжніх сил при попередньому розрахунку

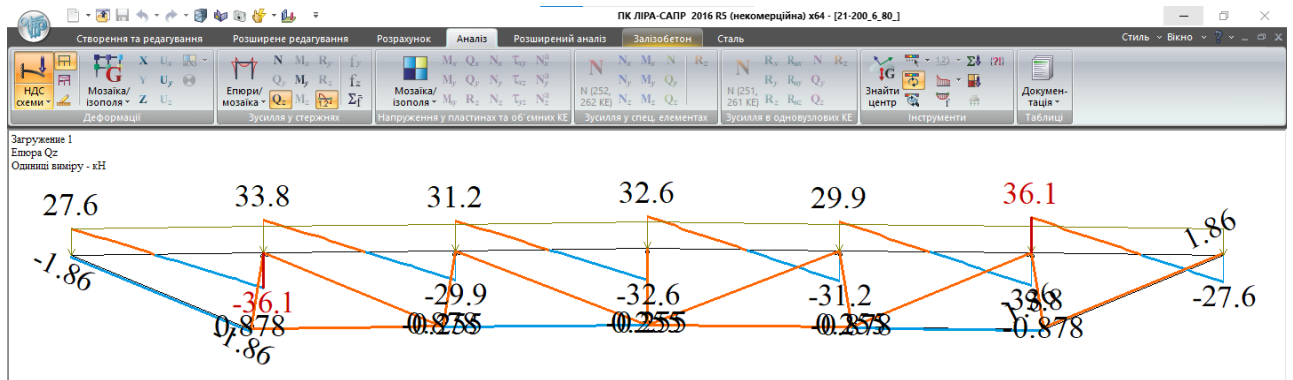


Рисунок В.5 – Епюра поперечних сил при попередньому розрахунку

Таблиця В.2

Результати попереднього розрахунку раціональної комбінованої ферми

Г	Н	П	нор %	СУ1 %	СЗ1 %	СС %	СП %	1ГС %	2ГС %	М.С %	Довжина
1 - Переріз: 1.1.5.1 Профіль "Молодечно" 200 x 160 x 5 Профіль: 200 x 160 x 5/ ГОСТ 30245-2003 Сталь: С345/ Сортамент: Профіль прямокульний гнугтий замкнутий сварной											
1	1	1	44	39	34	91	89	44	0	91	5
1	1	2	66	54	34	96	92	66	0	96	5
1	1	3	76	61	34	95	94	76	0	95	5
1	2	1	99	81	55	97	91	99	0	97	5
1	2	2	79	69	55	90	89	79	0	90	5
1	2	3	81	70	55	90	90	81	0	90	5
1	3	1	90	79	63	90	89	90	0	90	5
1	3	2	93	81	63	90	90	93	0	90	5
1	3	3	95	82	63	90	90	95	0	90	5
1	4	1	95	82	63	90	90	95	0	90	5
1	4	2	93	81	63	90	90	93	0	90	5
1	4	3	90	79	63	90	89	90	0	90	5
1	5	1	81	70	55	90	90	81	0	90	5
1	5	2	79	69	55	90	89	79	0	90	5
1	5	3	99	81	55	97	91	99	0	97	5
1	6	1	76	61	34	95	94	76	0	95	5
1	6	2	66	54	34	96	92	66	0	96	5
1	6	3	44	39	34	91	89	44	0	91	5

Як видно з рисунку В.2, лише 4 з 6 панелей верхнього поясу є найбільш завантаженими, тобто повнота їх напружень є найбільшою. Разом із тим, на рисунку В.3 видна різниця між опорними та прольотними значеннями моментів. Найбільше значення згинального моменту у стиснутій зоні складає $-29.1 \text{ кН}\cdot\text{м}$, в той час як найменший згинальний момент у розтягнутій зоні складає 15.8

кН*м. Різниця між значеннями складає 45%, відповідно, необхідно провести регулювання зусиль для того, аби зрівняти прольотні та опорні значення.

Для цього оберемо один з методів регулювання, наведений у пункті 5.2 роботи. Виконаємо регулювання зусиль у балці жорсткості за допомогою прикладання опорних та вузлових ексцентриситетів.

Прикладемо опорний ексцентриситет $e_1 = \frac{1}{2} * h_b = 0.1$ м та вузловий ексцентриситет на першій проміжній опорі $e_2 = \frac{1}{6} * h_b = 0.033$ м.

Після зміни розрахункової схеми проведемо повторний розрахунок. Отримані результати наведено на рис. В.6-9.

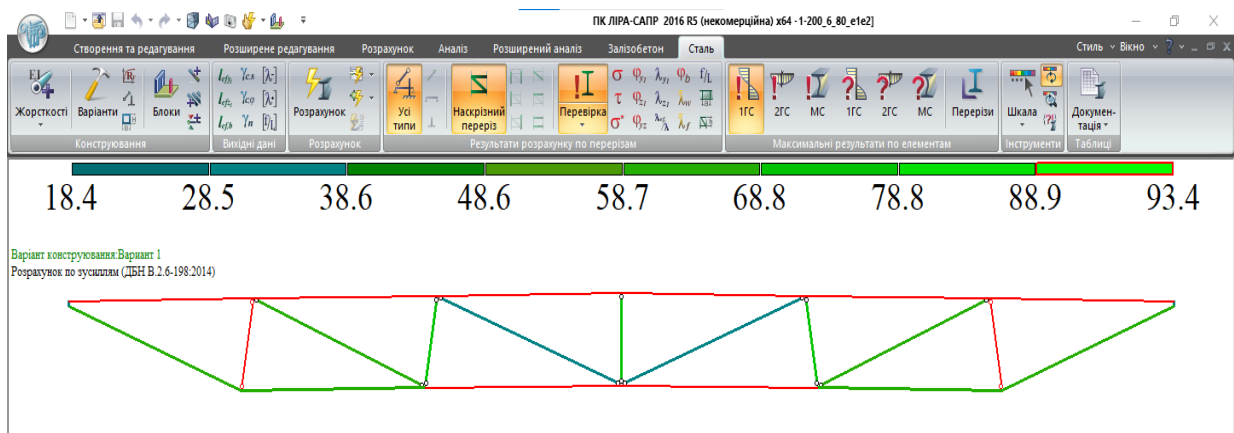


Рисунок В.6 – Перевірка сталевих січень за I групою граничних станів після регулювання НДС

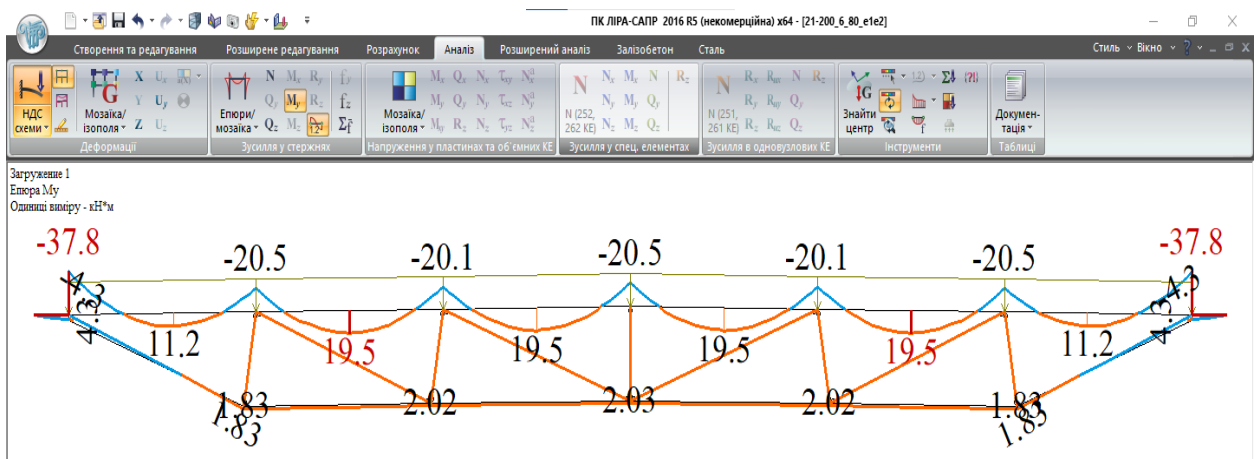


Рисунок В.7 – Епюра згинальних моментів після регулювання НДС

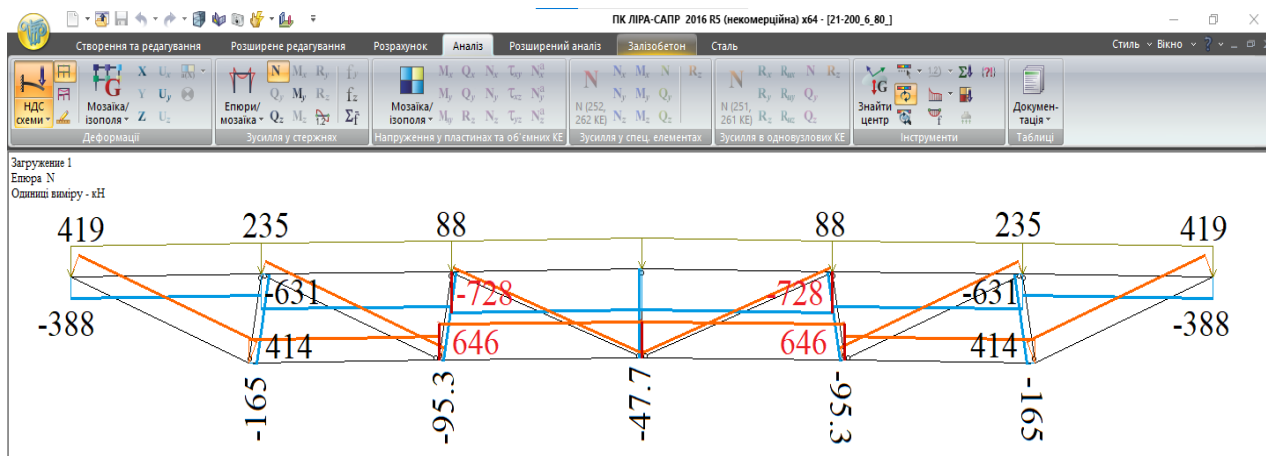


Рисунок В.8 – Епюра поздовжніх сил після регулювання НДС

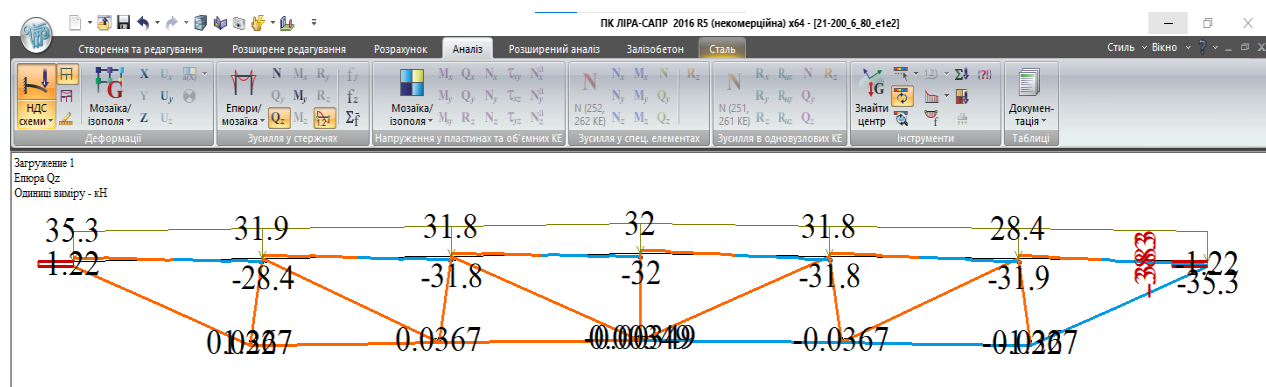


Рисунок В.9 – Епюра поперечних сил після регулювання НДС

Як видно з рис. В.6 та рис. В.7 значення відсотка використання несучої здатності по всій довжині балки жорсткості коливається в межах 88.9 - 93.4%, що відповідає значенням напружень 306.7 - 312.89 Мпа. Різниця напружень становить менше 5%. У свою чергу, значення моментів на проміжних опорах та прольотах складає -20.5 кН*м та 19.5 кН*м відповідно. Таким чином різниця значень згинальних моментів у балці жорсткості становить менше 5%.

Загальна маса раціональної комбінованої ферми із регулюванням НДС становить 1601 кг проти 1801 кг для кроквяної ферми за ДСТУ. У даному випадку економія сталі складає 12.5% за масою. Специфікація елементів наведена у таблиці В.3.

Таблиця В.3 – Специфікація елементів у раціональній комбінованій фермі із регулюванням зусиль

№	Тип елементу	Сталь	Переріз	Маса, кг
1	Верхній пояс	C345	□200x160x7	814.7
2	Нижній пояс	C345	□140x4	521.6
4	Стійки	C255	□80x3	29.3
5	Стійки	C255	□60x3	21.1
6	Стійки	C255	□50x3	8.6
7	Розкоси	A400C	2ø28	205.7
Кількість елементів 21 шт, довжина зварних швів – 19,8 м				
Загальна маса:				1601.0 кг

Додаток Г

БЛОК – СХЕМА РОЗРАХУНКУ РАЦІОНАЛЬНОЇ КОМБІНОВАНОЇ КРОКВЯНОЇ ФЕРМИ З РЕГУЛЮВАННЯМ НДС

Г.1. Блок-схема програми раціонального проектування комбінованої кроквяної ферми (з досягненням рівнонапруженого стану в балці жорсткості)

Блок-схема програми розрахункового регулювання НДС в балці жорсткості комбінованої конструкції з досягненням в розрахункових поперечних перерізах рівнонапруженого стану показана на рис. Г.1. Розрахунок починається з введення вхідних даних (геометричних розмірів конструкції, початкових поперечних перерізів елементів конструкції, фізико-механічних характеристик елементів, величини прикладання зовнішнього навантаження).

Після цього оператори блока 3 визначають геометричні характеристики перерізів (моментів інерції, початкових жорсткостей, умов роботи стрижнів. Блок 3 формує матрицю скінчених лінійних алгебраїчних рівнянь (СЛАР), яка формується залежно від заданих граничних умов.

Блок 4 створює образ матриці системи лінійних алгебраїчних рівнянь за допомогою символів. Блок 5 розв'язує систему СЛАР. Під час розв'язання системи СЛАР одержуємо вихідні дані – значення невідомих прогинів і згинальних моментів у розрахункових поперечних перерізах конструкції. Одержані напруження в опорних і в прольотних перерізах балки жорсткості прирівнюються в блоці 6 з заданою попередньо допустимою похибкою. У разі відхилень величин напружень приймають нові значення коефіцієнтів податливості, які вводяться в СЛАР, і повторюють розрахунок.

Розрахунок проводять доти, поки відхилення величин напружень у прольотній і надпорній частинах балки жорсткості комбінованої конструкції не перевищуватимуть допустимої похибки – блок 7. Одержуючи рівні значення напружень у розрахункових перерізах балки жорсткості, у блоці 8 розраховують напружено-деформований стан конструкції загалом і за

одержаними зусиллями підбирають необхідні поперечні перерізи елементів конструкції – блок 9.



Рисунок Г.1. - Блок-схема програми розрахункового регулювання НДС в балці жорсткості комбінованої кроквяної ферми з досягненням в розрахункових поперечних перерізах рівнонапруженого стану

Г.2. Узагальнений алгоритм розрахунку раціональних комбінованих роков'яних ферм з розрахунковим регулюванням НДС

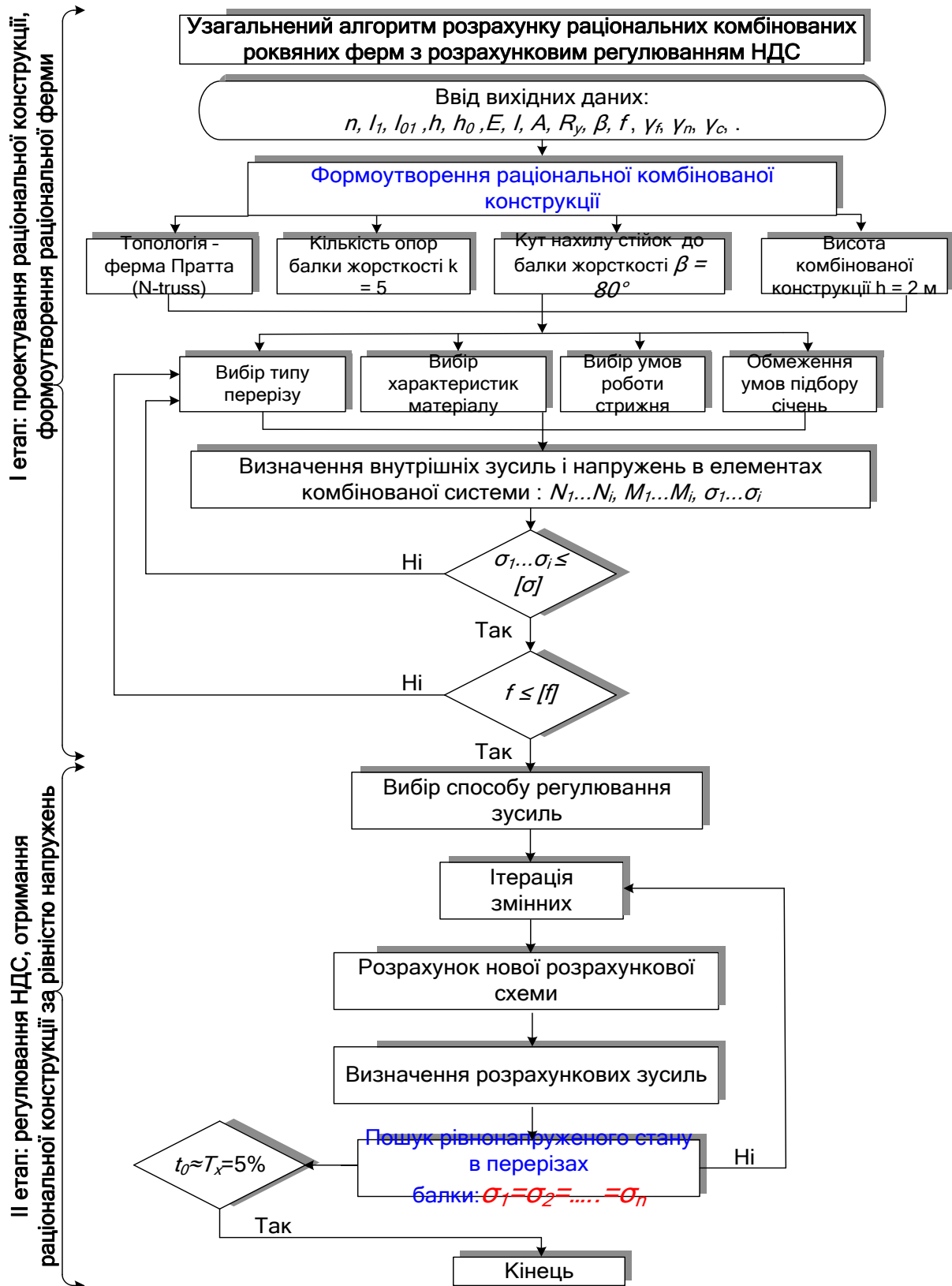


Рисунок Г.2. - Узагальнений алгоритм розрахунку раціональних комбінованих роков'яних ферм з розрахунковим регулюванням НДС

Додаток Д

4 Програмний комплекс АВК - 5 (3.7.3.1)

101_СД_ЛС1ВМ_02-03-02

- 1 -

**Локальний кошторис на на будівельні роботи №02-03-02 з виділенням матеріалів
на ферма дсту 30 м
порівняння ферм**

Основа:	Кошторисна вартість	211897,3 тис. грн.
креслення (специфікації) №	Кошторисна трудомісткість	0,54915 тис.люд.год.
	Кошторисна заробітна плата	46897 тис. грн.
	Середній розряд робіт	3,8 розряд

Складений за поточними цінами станом на "12 лютого" 2016 р.

№ Ч.ч.	Обґрунтування (шифр норми)	Найменування робіт і витрат	Одиниця виміру	Кількість	Вартість одиниці, грн.		Загальна вартість, грн.			Витрати труда робітників, люд.год.	
					Всього	експлуатації машин	Всього	заробітної плати	експлуатації машин	не зайнятих обслуговуванням машин	
										заробітної плати	в тому числі заробітної плати
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	E9-72-1	Виготовлення гратчастих конструкцій [стояки, опори, ферми та ін.] У тому числі матеріали:	m	2.751	60758,65 11702,28	5376,99 968,45	112950	21755	9996 1800	135,6000 10,4062	252,08 19,35
	C111-324	Кисень технічний газоподібний	m3	4,8334	12,25		59,21				
	C111-1129 варіант 2	Профілі сталеві гнуті замкнуті зварні квадратні і прямокутні для будівельних конструкцій, товщина до 10 мм, сталь марки С345	m	1,18976	56400,02		67102,49				
	C111-1139 варіант 3	Профілі сталеві гнуті замкнуті зварні квадратні і прямокутні для будівельних конструкцій, товщина до 10 мм, сталь марки С255	m	0,3435432	36914,97		12681,89				
	C111-1521 варіант 1	Електроди, діаметр 5 мм, марка Э42	m	0,0343915	34374,45		1182,19				

C111-1639	Круги армовані абразивні зачисні, діаметр 180х6 мм	шт	0,5577	247,92	138,26						
C1546-66	Пропан-бутан технічний	м3	0,4759	53,65	25,53						

4 Програмний комплекс АВК - 5 (3.7.3.1)

101_СД_ЛС1ВМ_02-03-02

- 1 -

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
		<i>Енергоносії машин, врахованих в складі загальнопромислових витрат</i>									
	C1999-9001	Електроенергія	кВт-год	2,221505	3,00	6,66					
	C1999-9005	Мастильні матеріали	кг	0,040898	91,20	3,73					
		Разом матеріалів				81199,96					
2	E13-16-6	Ґрунтування металевих поверхонь за один раз ґрунтовкою ГФ-021 <i>У тому числі матеріали:</i>	100м2	0,445	<u>913,49</u> 456,25	<u>52,48</u> 5,35	407	203	<u>23</u> 2	<u>4,7800</u> 0,0720	<u>2,13</u> 0,03
	C1113-21 варіант 2	Ґрунтовка ГФ-021 червоно-коричнева	т	0,004005	41373,43	165,70					
	C1113-77	Ксилол нафтовий, марка А	т	0,0006675	21544,27	14,38					
		<i>Енергоносії машин, врахованих в складі загальнопромислових витрат</i>									
	C1999-9001	Електроенергія	кВт-год	0,009968	671,59099	6,69					
	C1999-9005	Мастильні матеріали	кг	0,000089	42000,16	3,74					
		Разом матеріалів				190,51					
3	E13-26-6	Фарбування металевих поґрунтованих поверхонь емаллю ПФ-115 <i>У тому числі матеріали:</i>	100м2	0,445	<u>1199,77</u> 340,86	<u>43,79</u> 5,99	534	152	<u>19</u> 3	<u>3,6200</u> 0,0804	<u>1,61</u> 0,04
	C111-1292	Уайт-спірит	т	0,000623	3579,02	2,23					
	C1113-246 варіант 1	Емаль антикорозійна ПФ-115 сіра	т	0,008455	42632,84	360,46					
		<i>Енергоносії машин, врахованих в складі загальнопромислових витрат</i>									
	C1999-9001	Електроенергія	кВт-год	0,009968	674,59099	6,72					
	C1999-9005	Мастильні матеріали	кг	0,000089	42091,36	3,75					
		Разом матеріалів				373,16					
4	E9-22-1	Монтаж кроквяних і підкроквяних ферм на висоті до 25 м прогоном до 24 м, масою до 3 т <i>У тому числі матеріали:</i>	т	1,859	<u>8009,73</u> 2886,59	<u>4783,69</u> 1372,08	14890	5366	<u>8893</u> 2551	<u>36,8000</u> 15,4292	<u>68,41</u> 28,68

C111-98	Болти із шестигранною головкою оцинковані, діаметр різьби 12-[14] мм	m	0,000818	57054,72		46,67				
C111-179	Цвяхи будівельні з плоскою головкою 1, 6x50 мм	m	0, 0000186	31366,46		0,58				

4 Програмний комплекс АВК - 5 (3.7.3.1)

- 1 -

101_СД_ЛС1ВМ_02-03-02

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
C111-309	Канати прядив'яні просочені	m	0,	156383,17		29,07					
C111-324	Кисень технічний газоподібний	m3	3,62505	12,25		44,41					
C111-797	Катанка гарячекатана у мотках, діаметр 6,3-6,5 мм	m	0,	24047,50		1,34					
C111-1019	Швелери N 40 з гарячекатаного прокату із сталі вуглецевої звичайної якості, марка Ст0	m	0,	21184,31		76,40					
C111-1504	Електроди, діаметр 2 мм, марка Э42	m	0,	72089,45		53,61					
C112-23	Бруски обрізні з хвойних порід, довжина 4-6, 5 м, ширина 75-150 мм, товщина 40-75 мм, I сорт	m3	0,001915	9529,00		18,25					
C121-756	Окремі конструктивні елементи будівель та споруд [колони, балки, ферми, зв'язки, ригелі, стояки тощо] з перевагою гарячекатаних профілей, середня маса складальної одиниці понад 0,1 до 0,5 т	m	0,003718	63549,19		236,28					
C1113-21	Грунтовка ГФ-021 червоно- коричнева	m	0,	77727,45		44,79					
C1113-156	Розчинник, марка Р-4	m	0,	47525,22		5,30					
C1537-97	Канат подвійного звивання, тип ТК, оцинкований, з дроту марки В, маркірувальна група 1770 Н/ мм ² , діаметр 5,5 мм	10m	0,03476	440,97		15,33					
C1546-66	Пропан-бутан технічний	m3	1,09681	53,65		58,84					
C1999-9001	Енергоносії машин, врахованих в складі загальнопромислових витрат	кВт- год	0,05577	123,5724		6,89					
	Разом матеріалів					637,76					
	Разом прямі витрати по кошторису					190 331	27476	18931		324,23	
	Разом будівельні роботи, грн.					190 331		4356		48,1	
	в тому числі:										
	вартість матеріалів, виробів та комплектів, грн.					143 434					
	всього заробітна плата, грн.					46897					
	Загальнопромислові витрати, грн.					17556					
	трудомісткість в загальнопромислових витратах, люд.год.					44,55					
	заробітна плата в загальнопромислових витратах, грн.					5958					

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
		Всього будівельні роботи, грн.					146337				
		----- -----									
		Всього по кошторису					211897,3				
		Кошторисна трудомісткість, люд.год.					549.15				
		Кошторисна заробітна плата, грн.					46897				

Склав _____ Сидорак Д
[посада, підпис (ініціали, прізвище)]

Перевірив _____
[посада, підпис (ініціали, прізвище)]

**Локальний кошторис на на будівельні роботи №02-03-01 з виділенням матеріалів
на ферма комбінована з раціональними параметрами 30 м
порівняння ферм**

Основа: Кошторисна вартість 187694 тис. грн.
креслення (специфікації) № Кошторисна трудомісткість 0, 49430 тис.люд.год.
Кошторисна заробітна плата 42248 тис. грн.
Середній розряд робіт 3,8 розряд

Складений за поточними цінами станом на "12 лютого" 2024 р.

№ Ч.ч.	Обґрунтування (шифр норми)	Найменування робіт і витрат	Одиниця виміру	Кількість	Вартість одиниці, грн.		Загальна вартість, грн.			Витрати труда робітників, люд.год.	
					Всього	експлуатації машин	Всього	заробітної плати	експлуатації машин	не зайнятих обслуговуванням машин	
										заробітної плати	в тому числі заробітної плати
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	E9-72-1	Виготовлення гратчастих конструкцій [стояки, опори, ферми та ін.] У тому числі матеріали:	m	2.478	71979,74	5376,99	126396	20549	9442	135,6000	238,11
					11702,28	968,45			1701	10,4062	18,27
	C111-324	Кисень технічний газоподібний	m3	4,5656	12,25		55,93				
	C111-1129 варіант 3	Профілі сталеві гнуті замкнуті зварні квадратні і прямокутні для будівельних конструкцій, товщина до 10 мм, сталь марки С345	m	1,592692	56400,02		89827,86				
	C111-1139 варіант 4	Профілі сталеві гнуті замкнуті зварні квадратні і прямокутні для будівельних конструкцій, товщина до 10 мм, сталь марки С255	m	0,0059704	36914,97		220,40				
	C111-1521 варіант 1	Електроди, діаметр 5 мм, марка Э42	m	0,032486	34374,45		1116,69				

C111-1639	Круги армовані абразивні зачисні, діаметр 180х6 мм	шт	0,5268	247,92		130,60					
-----------	--	----	--------	--------	--	--------	--	--	--	--	--

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	C124-27	Гарячекатана арматурна сталь періодичного профілю, клас А-III, діаметр 32-40 мм	т	0,1833264	27381,86		5019,82				
	C1546-66	Пропан-бутан технічний	м3	0,44954	53,65		24,12				
	C1999-9001	Енергоносії машин, врахованих в складі загальнопромислових витрат	кВт-год	2,09842	3,00		6,30				
	C1999-9005	Мастильні матеріали	кг	0,038632	91,20		3,52				
		Разом матеріалів					96405,23				
2	E13-16-6	Ґрунтування металевих поверхонь за один раз Ґрунтовкою ГФ-021 У тому числі матеріали:	100м2	0,355	<u>913,49</u> 456,25	<u>52,48</u> 5,35	324	162	<u>19</u> 2	<u>4.7800</u> 0,0720	<u>1.7</u> 0,03
	C1113-21 варіант 2	Ґрунтовка ГФ-021 червоно-коричнева	т	0,003195	41373,43		132,19				
	C1113-77	Ксилол нафтовий, марка А	т	0,0005325	21544,27		11,47				
	C1999-9001	Енергоносії машин, врахованих в складі загальнопромислових витрат	кВт-год	0,007952	794,65744		6,32				
	C1999-9005	Мастильні матеріали	кг	0,000071	49714,28		3,53				
		Разом матеріалів					153,51				
3	E13-26-6	Фарбування металевих поґрунтованих поверхонь емаллю ПФ-115 У тому числі матеріали:	100м2	0,365	<u>1199,77</u> 340,86	<u>43,79</u> 5,99	438	124	<u>16</u> 2	<u>3.6200</u> 0,0804	<u>1.32</u> 0,03
	C111-1292	Уайт-спірит	т	0,00051	3579,02		1,83				
	C1113-246 варіант 1	Емаль антикорозійна ПФ-115 сіра	т	0,006935	42632,84		295,66				
	C1999-9001	Енергоносії машин, врахованих в складі загальнопромислових витрат	кВт-год	0,008176	775,88601		6,34				
	C1999-9005	Мастильні матеріали	кг	0,000073	48443,44		3,54				
		Разом матеріалів					307,36				
4	E9-22-1	Монтаж кроквяних і підкроквяних ферм на	т	1,756	<u>8009,73</u> 2886,59	<u>4783,69</u> 1372,08	14065	5069	<u>8400</u> 2409	<u>36.8000</u> 15,4292	<u>64.62</u> 27,09

висоті до 25 м прогоном
до 24 м, масою до
3 т

4 Програмний комплекс АВК - 5 (3.7.3.1)

101_СД_ЛС1ВМ_02-03-01

- 1 -

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
		<i>У тому числі матеріали:</i>									
	C111-98	Болти із шестигранною головкою оцинковані, діаметр різьби 12-[14] мм	m	0, 0007726	57054,72		44,08				
	C111- 179	Цвяхи будівельні з плоскою головкою 1, 6x50 мм	m	0, 0000176	31366,46		0,55				
	C111- 309	Канати прядив'яні просочені	m	0, 0001756	156383,17		27,46				
	C111- 324	Кисень технічний газоподібний	m3	3,4242	12,25		41,95				
	C111- 797	Катанка гарячекатана у мотках, діаметр 6,3-6,5 мм	m	0,000053	24047,50		1,27				
	C111- 1019	Швелери N 40 з гарячекатаного прокату із сталі вуглецевої звичайної якості, марка Ст0	m	0,003407	21184,31		72,17				
	C111- 1504	Електроди, діаметр 2 мм, марка Э42	m	0, 0007024	72089,45		50,64				
	C112-23	Бруски обрізні з хвойних порід, довжина 4-6, 5 м, ширина 75-150 мм, товщина 40-75 мм, I сорт	m3	0, 00180868	9529,00		17,23				
	C121- 756	Окремі конструктивні елементи будівель та споруд [колонни, балки, ферми, зв'язки, ригелі, стояки тощо] з перевагою гарячекатаних профілей, середня маса складальної одиниці понад 0,1 до 0,5 т	m	0,003512	63549,19		223,18				
	C1113- 21	Грунтовека ГФ-021 червоно- коричнева	m	0, 0005444	77727,45		42,31				
	C1113- 156	Розчинник, марка Р-4	m	0, 0001054	47525,22		5,01				
	C1537- 97	Канат подвійного звивання, тип ТК, оцинкований, з дроту марки В, маркірувальна група 1770 Н/ мм2, діаметр 5,5 мм	10m	0,03284	440,97		14,48				
	C1546- 66	Пропан-бутан технічний	m3	1,03604	53,65		55,58				
	C1999- 9001	Енергоносії машин, врахованих в складі загальнопромислових витрат	кВт- год	0,05268	123,41845		6,50				
		Разом матеріалів					602,44				
		Разом прями витрати по кошторису					168 299	25904	17877 4114		305,75 45,42
		Разом будівельні роботи, грн. в тому числі:					168 299				

4 Програмний комплекс АВК - 5 (3.7.3.1)

101_СД_ЛС1ВМ_02-03-01

- 1 -

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
		вартість матеріалів, виробів та комплектів, грн.					126 051				
		всього заробітна плата, грн.					42248				
		Загальновиробничі витрати, грн.					16559				
		трудомісткість в загальновиробничих витратах, люд.год.					42,05				
		заробітна плата в загальновиробничих витратах, грн.					5622				
		Всього будівельні роботи, грн.					187694				

		Всього по кошторису					187694				
		Кошторисна трудомісткість, люд.год.					494.30				
		Кошторисна заробітна плата, грн.					42248				

Склав _____ Сидорак Д
 [посада, підпис (ініціали, прізвище)]

Перевірив _____
 [посада, підпис (ініціали, прізвище)]

4 Програмний комплекс АВК - 5 (3.7.3.1)

**Локальний кошторис на на будівельні роботи №02-03-01 з виділенням матеріалів
на ферма комбінована з раціональними параметрами та регулюванням НДС 30 м
порівняння ферм**

Основа:	Кошторисна вартість	177.582 тис. грн.
креслення (специфікації) №	Кошторисна трудомісткість	0,46929 тис.люд.год.
	Кошторисна заробітна плата	40.095 тис. грн.
	Середній розряд робіт	3,8 розряд

Складений за поточними цінами станом на "12 лютого" 2024 р.

№ Ч.ч.	Обґрунтування (шифр норми)	Найменування робіт і витрат	Одиниця виміру	Кількість	Вартість одиниці, грн.		Загальна вартість, грн.			Витрати труда робітників, люд.год.	
					Всього	експлуатації машин	Всього	заробітної плати	експлуатації машин	не зайнятих обслуговуванням машин	
										тих, що обслуговують машини	
										на одиницю	всього
заробітної плати	в тому числі заробітної плати	Всього	заробітної плати	в тому числі заробітної плати	на одиницю	всього					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	E9-72-1	Виготовлення єратчастих конструкцій [стояки, опори, ферми та ін.] У тому числі матеріали:	m	1,756	71979,74	5376,99	126396	20549	9442	135,6000	238,11
					11702,28	968,45			1701	10,4062	18,27
	C111-324	Кисень технічний газоподібний	m3	4,5656	12,25		55,93				
	C111-1129 варіант 3	Профілі сталеві гнуті замкнуті зварні квадратні і прямокутні для будівельних конструкцій, товщина до 10 мм, сталь марки С345	m	1,592692	56400,02		89827,86				
	C111-1139 варіант 4	Профілі сталеві гнуті замкнуті зварні квадратні і прямокутні для будівельних конструкцій, товщина до 10 мм, сталь марки С255	m	0,0059704	36914,97		220,40				
	C111-1521 варіант 1	Електроди, діаметр 5 мм, марка Э42	m	0,032486	34374,45		1116,69				

C111-1639	Круги армовані абразивні зачисні, діаметр 180х6 мм	шт	0,5268	247,92		130,60						
-----------	--	----	--------	--------	--	--------	--	--	--	--	--	--

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	C124-27	Гарячекатана арматурна сталь періодичного профілю, клас А-III, діаметр 32-40 мм	m	0,1833264	27381,86		5019,82				
	C1546-66	Пропан-бутан технічний	m3	0,44954	53,65		24,12				
	C1999-9001	Енергоносії машин, врахованих в складі загальнопромислових витрат	кВт-год	2,09842	3,00		6,30				
	C1999-9005	Мастильні матеріали	ка	0,038632	91,20		3,52				
		Разом матеріалів					96405,23				
2	E13-16-6	Ґрунтування металевих поверхонь за один раз Ґрунтовкою ГФ-021 У тому числі матеріали:	100m2	0,355	913,49 456,25	52,48 5,35	324	162	19 2	4.7800 0,0720	1,7 0,03
	C1113-21 варіант 2	Ґрунтовка ГФ-021 червоно-коричнева	m	0,003195	41373,43		132,19				
	C1113-77	Ксилол нафтовий, марка А	m	0,0005325	21544,27		11,47				
	C1999-9001	Енергоносії машин, врахованих в складі загальнопромислових витрат	кВт-год	0,007952	794,65744		6,32				
	C1999-9005	Мастильні матеріали	ка	0,000071	49714,28		3,53				
		Разом матеріалів					153,51				
3	E13-26-6	Фарбування металевих поґрунтованих поверхонь емаллю ПФ-115 У тому числі матеріали:	100m2	0,365	1199,77 340,86	43,79 5,99	438	124	16 2	3.6200 0,0804	1,32 0,03
	C111-1292	Уайт-спірит	m	0,00051	3579,02		1,83				
	C1113-246 варіант 1	Емаль антикорозійна ПФ-115 сіра	m	0,006935	42632,84		295,66				
	C1999-9001	Енергоносії машин, врахованих в складі загальнопромислових витрат	кВт-год	0,008176	775,88601		6,34				
	C1999-9005	Мастильні матеріали	ка	0,000073	48443,44		3,54				
		Разом матеріалів					307,36				
4	E9-22-1	Монтаж кроквяних і підкроквяних ферм на	т	1,756	8009,73 2886,59	4783,69 1372,08	14065	5069	8400 2409	36.8000 15,4292	64.62 27,09

висоті до 25 м прогоном
до 24 м, масою до
3 т

4 Програмний комплекс АВК - 5 (3.7.3.1)

101_СД_ЛС1ВМ_02-03-01

- 1 -

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
		<i>У тому числі матеріали:</i>									
	C111-98	Болти із шестигранною головкою оцинковані, діаметр різьби 12-[14] мм	m	0, 0007726	57054,72		44,08				
	C111-179	Цвяхи будівельні з плоскою головкою 1, 6x50 мм	m	0, 0000176	31366,46		0,55				
	C111-309	Канати прядив'яні просочені	m	0, 0001756	156383,17		27,46				
	C111-324	Кисень технічний газоподібний	м3	3,4242	12,25		41,95				
	C111-797	Катанка гарячекатана у мотках, діаметр 6,3-6,5 мм	m	0,000053	24047,50		1,27				
	C111-1019	Швелери N 40 з гарячекатаного прокату із сталі вуглецевої звичайної якості, марка Ст0	m	0,003407	21184,31		72,17				
	C111-1504	Електроди, діаметр 2 мм, марка Э42	m	0, 0007024	72089,45		50,64				
	C112-23	Бруски обрізні з хвойних порід, довжина 4-6, 5 м, ширина 75-150 мм, товщина 40-75 мм, I сорт	м3	0, 00180868	9529,00		17,23				
	C121-756	Окремі конструктивні елементи будівель та споруд [колонни, балки, ферми, зв'язки, ригелі, стояки тощо] з перевагою гарячекатаних профілей, середня маса складальної одиниці понад 0,1 до 0,5 т	m	0,003512	63549,19		223,18				
	C1113-21	Грунтовка ГФ-021 червоно- коричнева	m	0, 0005444	77727,45		42,31				
	C1113-156	Розчинник, марка Р-4	m	0, 0001054	47525,22		5,01				
	C1537-97	Канат подвійного звивання, тип ТК, оцинкований, з дроту марки В, маркірувальна група 1770 Н/ мм2, діаметр 5,5 мм	10м	0,03284	440,97		14,48				
	C1546-66	Пропан-бутан технічний	м3	1,03604	53,65		55,58				
	C1999-9001	Енергоносії машин, врахованих в складі загальнопромислових витрат	кВт- год	0,05268	123,41845		6,50				
		Разом матеріалів					602,44				
		Разом прямі витрати по кошторису					159163	25904	17877 4114		305,75 45,42
		Разом будівельні роботи, грн. в тому числі:					159163				

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
		вартість матеріалів, виробів та комплектів, грн.					119 068				
		всього заробітна плата, грн.					40095				
		Загальновиробничі витрати, грн.					16559				
		трудомісткість в загальновиробничих витратах, люд.год.					42,05				
		заробітна плата в загальновиробничих витратах, грн.					5622				
		Всього будівельні роботи, грн.					177582				

		Всього по кошторису					177582				
		Кошторисна трудомісткість, люд.год.					469.29				
		Кошторисна заробітна плата, грн.					40095				

Склав _____ Сидорак Д
[посада, підпис (ініціали, прізвище)]

Перевірив _____
[посада, підпис (ініціали, прізвище)]