

УДК 624.072.33:624.014.2:519.6 [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).2.241-249](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).2.241-249)

Г. Д. Портнов¹, доц., канд. техн. наук, В. В. Дарієнко¹, доц., канд. техн. наук,
В. В. Пукалов¹, доц., канд. техн. наук, В. В. Яцун¹, проф., канд. техн. наук
С. А. Гудзь², доц., канд. техн. наук

¹Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна

²ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, Україна

e-mail: budkom999@gmail.com, goods_s_a@pstu.edu

Модернізація сталевих ферм із труб квадратного та прямокутного перерізу

Проаналізовано напружено-деформований стану вузлів кроквяних ферм із гнutoзварних профілів прямокутного перерізу (ГЗП) та способів підвищення їх несучої здатності. Визначено, що низький коефіцієнт використання матеріалу в серійних конструкціях обумовлений нерівномірним розподілом напружень у зонах сполучення поясів і решітки. Для зниження концентрації напружень запропоновано введення проміжних елементів. Обґрунтування конструктивних рішень виконано за допомогою методу скінченних елементів у комбінації зі спеціалізованим програмним комплексом IDEA StatiCa. На прикладі розрахунку вузла ферми доведено, що впровадження локального підсилення дозволяє збільшити несучу здатність конструкції у 1,45 рази без зміни її геометрії. Результати підкреслюють ефективність використання сучасних інструментів моделювання для оптимізації сталевих покриттів.

ферма, гнutoзварні профілі прямокутного перерізу, метод скінченних елементів, компонентний метод

Постановка проблеми. Системи покриттів на основі гнutoзварних профілів прямокутного перерізу (ГЗП) набули широкого застосування в цивільному та промисловому будівництві завдяки оптимальному співвідношенню радіусів інерції та здатності елементів добре чинити опір крученню та вигину. Однак аналіз напружено-деформованого стану (НДС) таких конструкцій показав низький коефіцієнт використання міцності сталі ($K_b \approx 30\text{--}50\%$) через концентрацію напружень у вузлах з'єднань. Це призводить до втрати місцевої стійкості тонких стінок і зниження несучої здатності конструкції в цілому [1, 5, 17].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Причиною неефективного використання сталі є те, що збільшення локальних напружень у місцях сполучення стрижневих елементів ГЗП призводить до порушення місцевої стійкості тонких стінок профілю щодо розвитку НДС, що визначає загальну міцність стрижня [7, 9, 18].

Зниження локальних напружень можливо досягти шляхом уведення у вузол спряження додаткових проміжних елементів. Обґрунтування параметрів такого конструктивного вирішення вузлів пов'язано з труднощами розрахунку [6, 8].

Внутрішні зусилля у стрижнях, переміщення вузлів та елементів ферм визначаються переважно за допомогою різноманітних програмних комплексів (ПК), що реалізують метод скінченних елементів (МСЕ): ЛІРА-САПР, Autodesk Robot Structural Analysis Professional, Dlubal RFEM, Tekla Structural Designer, CSI SAP2000, Bentley RAM тощо.

Впровадження у практику розрахунку ферм тривимірного моделювання має передбачати у кожному конкретному випадку всебічний аналіз способів поєднання тонкостінних оболонок труби у вузлі і широке використання результатів трудомістких експериментальних досліджень [6, 9, 12].

Нормативні документи регламентують розрахунок стандартних вузлів, реалізований у СТК-САПР (ЛІРА-САПР) [10], Autodesk Robot Structural Analysis Professional та ін.

При цьому, зазвичай, не враховується нелінійна робота матеріалу, пов'язана з появою локальних пластичних деформацій, що призводить до зниження граничного навантаження, яке може бути сприйняте вузлом.

Розрахунок нестандартних вузлів вимагає створення моделі, що описує поведінку вузла у складі конструкції. Застосування методу скінченних елементів, реалізованого у вище згаданих розрахункових комплексах, не виправдовує себе в інженерних розрахунках. Балкова модель лінійно-протяжної конструкції не дозволяє достатньо детально визначити НДС ділянки моделі поза межами дії гіпотези плоских перерізів. Розгляд твердотільної моделі призводить до виникнення проблем, пов'язаних з сингулярністю [6].

В даний час для розрахунку з'єднань сталевих конструкцій у європейських нормативних документах (EN 1993-1-8-2009) застосовується компонентний метод (КМ), при якому вузол розглядається як сукупність пов'язаних один з одним компонентів. Для заданого вузла будується розрахункова модель, що складається з пружних в'язей та стрижневих елементів, що сприймають деформацію. Це значно полегшує процес розрахунку типових вузлів. Основний недолік методу – обмеження при розрахунку вузлів довільної форми, пов'язані з відсутністю прототипу моделі.

Постановка завдання. Таким чином метою дослідження є підвищення рівномірності розподілу напружень у вузлових з'єднаннях ферми з квадратних та прямокутних сталевих труб та збільшення її несучої здатності шляхом оптимізації конструктивних рішень із застосуванням сучасних чисельних методів розрахунку.

Для досягнення мети нами було поставлено та вирішено низку наступних задач:

- провести аналіз сучасних конструкцій ферми з квадратних та прямокутних сталевих труб з метою визначення їх переваг і недоліків при формуванні напружено-деформованого стану вузлових з'єднань;
- визначити основні фактори, що спричиняють нерівномірний розподіл напружень, зокрема концентрацію локальних напружень, що знижує коефіцієнт використання міцності сталі;
- розробити оптимальне конструктивне рішення із застосуванням підсилювальних елементів (наприклад, зміцнювальних пластин) для зменшення концентрації напружень без зміни геометричних параметрів ферми;
- провести розрахунок вузлових з'єднань із застосуванням методу скінченних елементів у спеціалізованому програмному комплексі IDEA StatiCa з метою обґрунтування ефективності запропонованих рішень та підвищення несучої здатності конструкції.

Виклад основного матеріалу. Розроблений на основі поєднання підходів МСЕ та КМ спеціалізований розрахунковий комплекс IDEA StatiCa [16], призначений для аналізу та розрахунку вузлів сполучення елементів несучих конструкцій, дозволяє моделювати нестандартні вузли з автоматичним обчисленням жорсткості окремих компонентів.

Спільне залучення до розрахунку ферм згаданих ПК дозволить створити на основі серійних конструкцій прототип із вирівняними показниками несучої здатності вузлів та елементів. Така конструкція матиме підвищену несучу здатність при збереженні геометричних і вагових характеристик без істотної зміни технології виготовлення.

Нижче наведено результати модернізації кроквяної ферми, розробленої на основі типових принципових рішень альбому Асоціації «Український центр сталевого будівництва» [11]. Схему такої ферми зображено на рис. 1.

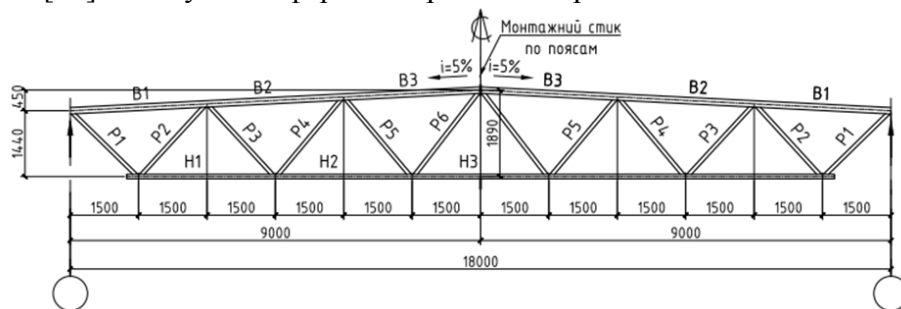


Рисунок 1 – Схема ферми відповідно до альбому [11]

Джерело: розроблено на підставі [11]

По верхньому поясу кроквяних ферм передбачено влаштування прогонів покриття з кроком 3 м (у вузлах ферм) із швелерів.

Нижній пояс кроквяних ферми розв'язаний з площини двома лініями розпірок.

При створенні розрахункової схеми враховувалося розцентрування осей елементів решітки і поясу (зазор між суміжними стінками розкосів 20 мм).

Ескізу проробку вузлів ферми, що модернізується, представлено на рис. 2.

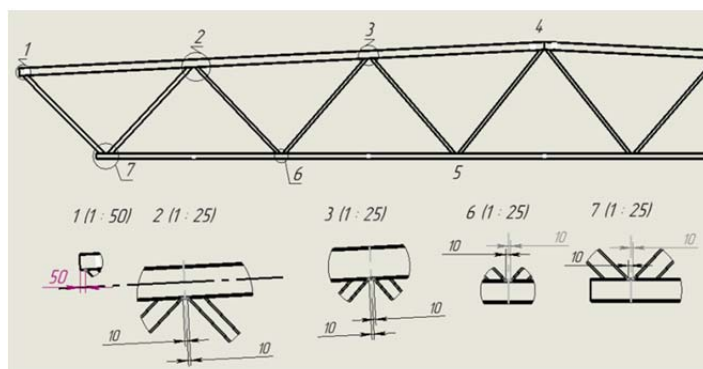


Рисунок 2 – Вузли половини симетричної ферми [1...7]

Джерело: розроблено авторами.

Характеристики елементів ферми (рис. 1, рис. 2) представлено в табл. 1.

Таблиця 1 – Характеристики елементів ферми

Елементи ферми	Позначення елементів	Переріз	Сталь
Верхній пояс	B1	140x100x4	С345
	B2		
	B3		
Нижній пояс	H1	100x4	С345
	H2		
	H3		
Розкоси	P1	80x4	С345
	P2		
	P3	60x4	С255
	P4		
	P5		
	P6		

*Матеріал елементів прийнято згідно з вимогами [4].

Джерело: розроблено авторами.

Розрахункову схему ферми прийнято у вигляді плоскої розкріпленої у вертикальній площині системи (тип схеми 2 – «Плоска рама»). Розрахунок виконаний з урахуванням жорсткості вузлових з'єднань та вигину елементів у площині ферми [3].

У розрахунковій схемі спирання ферми прийнято шарнірним, одна з опор шарнірно нерухома, а інша – шарнірно рухома.

Розглядалася одна схема застосування однакових зосереджених навантажень F до вузлів ферми (рис. 3). Значення $F = 3330$ Н підібрано таким чином, щоб забезпечити значення коефіцієнта використання матеріалу $K_v \approx 100\%$ у проміжних перерізах найбільш напруженого елемента ферми (Н3, рис. 1). Власна вага ферми враховувалася програмним засобом.

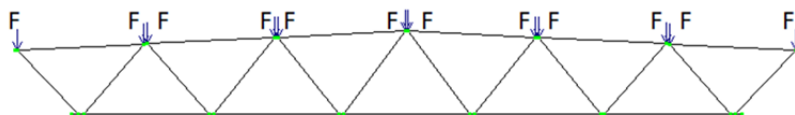


Рисунок 3 – Схема вузлових навантажень

Джерело: розроблено авторами.

Розрахунок зусиль у стрижнях ферми, оцінку їх напруженого стану у проміжних перерізах та вузлах було виконано у ПБК ЛІРА-САПР з використанням підпрограми СТК-САПР у локальному режимі. Усі розрахунки проводилися у припущенні повного провару зварних з'єднань.

На діаграмі (рис. 4) представлено результати розрахунку відсоткового використання матеріалу порівняно з граничною величиною напруження для пружної роботи сталі (коефіцієнт використання K_v).

Повністю використовується міцність матеріалу нижнього поясу поза вузлами примикання елементів (стрижень Н1; $K_v = 100\%$). У вузлах 2, 3, 6, 7 матеріал поясів суттєво перенапружений. Фактично несуча здатність ферми може бути забезпечена при зниженні вузлового навантаження в 1,45 рази (критичним елементом є вузол 6).

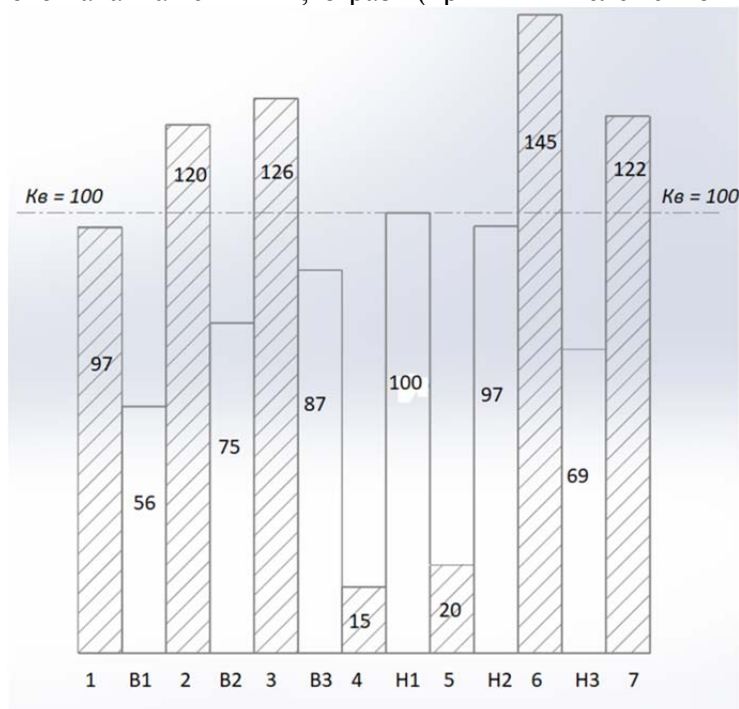


Рисунок 4 – Діаграма значень коефіцієнта використання матеріалу в елементах ферми
1 ... 7 – позначення вузлів (рис. 2) B1 ... H3 – позначення стержнів (рис. 1)

Джерело: розроблено авторами.

Трасування розрахунку показує значне перенапруження верхньої полиці поясу в місцях примикання елементів решітки, що виникає внаслідок локального продавлювання. Це може спричинити розвиток пластичних деформацій, що, у свою чергу, впливає на загальну несучу здатність конструкції.

Формульне уявлення процесів, які відбуваються у вузлі, є складним та багатофакторним, що значно ускладнює прийняття обґрунтованих конструкторських рішень щодо підвищення його несучої здатності. Врахування нелінійних ефектів, зокрема пластичних деформацій, зміни геометричних характеристик і впливу вторинних напружень, є вкрай необхідним для точного аналізу роботи вузла.

Одним із поширених підходів до підвищення міцності вузлів є введення додаткових елементів, таких як ребра жорсткості, накладки або посилені з'єднувальні пластини. Однак застосування таких рішень стримується недосконалістю існуючих методик розрахунку, які не завжди враховують всі особливості реальної роботи вузлів, а також недостатністю експериментальних даних для коригування розрахункових моделей.

ПК IDEA StatiCa дозволяє обґрунтувати конструктивні параметри елементів, що підсилюють вузол, зокрема, провести розрахунок вузла з урахуванням фізичної нелінійності роботи матеріалу; отримати зображення вузла в деформованому вигляді з ізополями напружень, зонами пластичних деформацій, визначити елементи вузла із зонами пластичності; здійснити розрахунок граничної несучої здатності вузла.

На рис. 5 показаний деформований вид вузла 6 (рис.2) та ізополя приведених напружень по Мізесу.

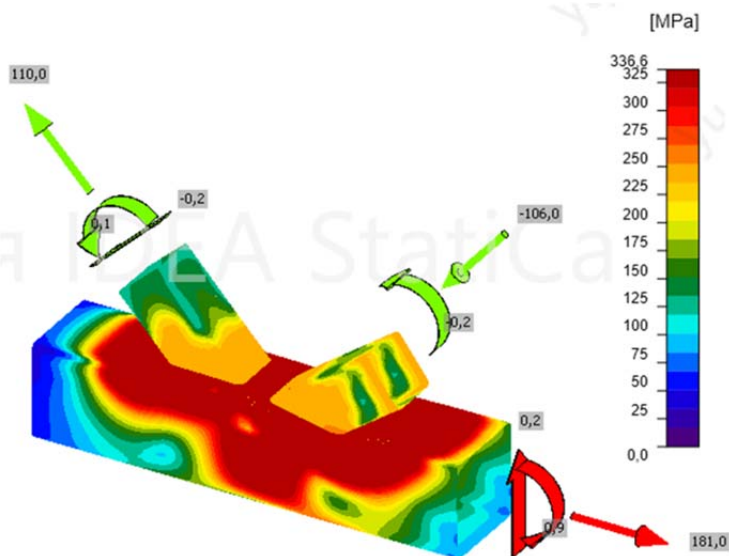


Рисунок 5 – Деформований вид вузла 6 та ізополя приведених напружень по Мізесу
Джерело: розроблено авторами.

На рис. 6 показано зони пластичності цього вузла.

Найбільш напруженими є ділянки сполучення розкосів з полицею поясу.

Найпростішим рішенням зниження напружень є введення в місце сполучення розкосів і поясу підсилювальної пластини.

На рис. 7 і рис. 8 показано ізополя напружень і зони пластичності вузла 6 з підсилювальною пластинною.

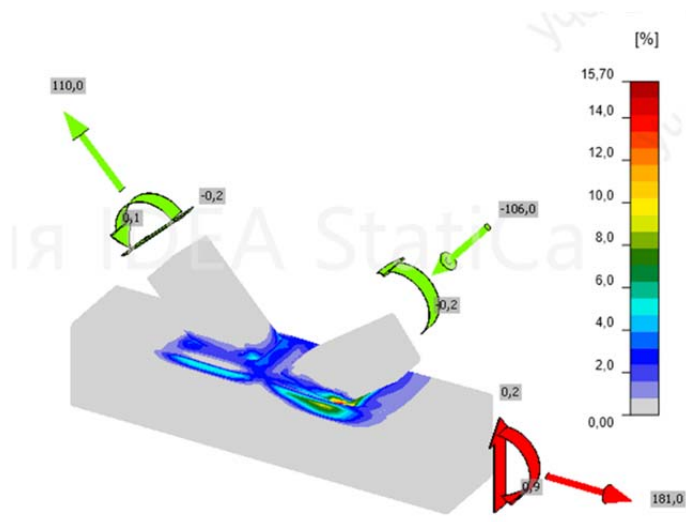


Рисунок 6 – Зони пластичності вузла 6

Джерело: розроблено авторами.

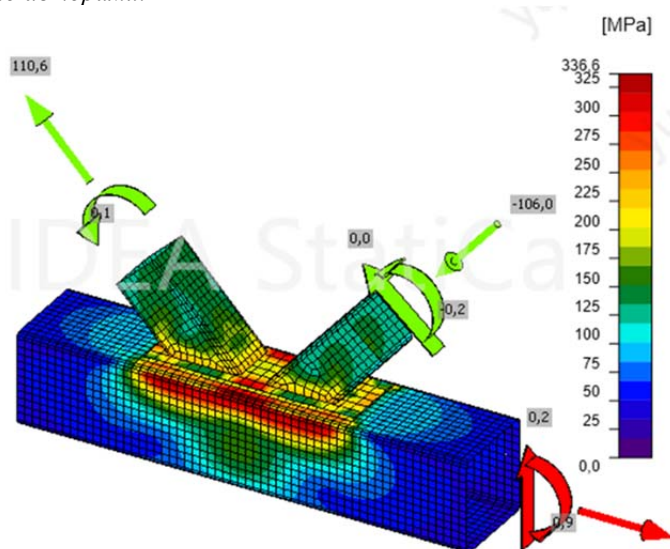


Рисунок 7 – Деформований вид вузла 6 з пластиною та ізополя приведених напружень по Мізесу

Джерело: розроблено авторами.

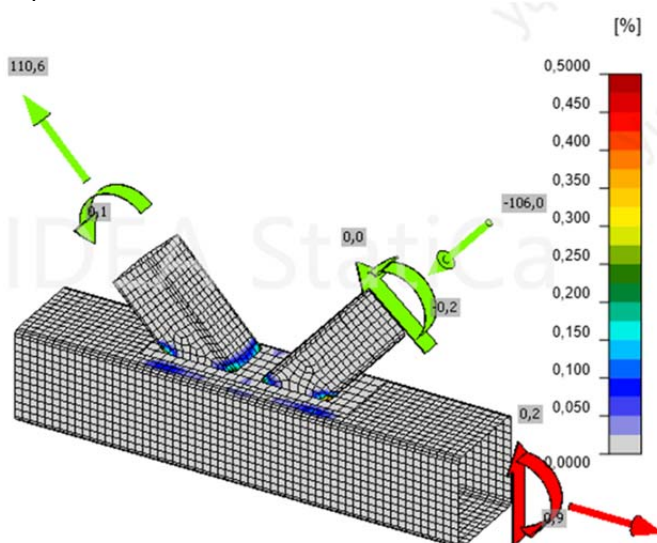


Рисунок 8 – Зони пластичності вузла 6 з пластиною

Джерело: розроблено авторами.

Введення пластини суттєво змінює напружений стан вузла. Несуча здатність вузла, розрахована з припущенням граничної пластичної деформації 0,05 (EN 1993-1-5-C1.C.8), збільшується зі збільшенням товщини пластини (рис. 9).

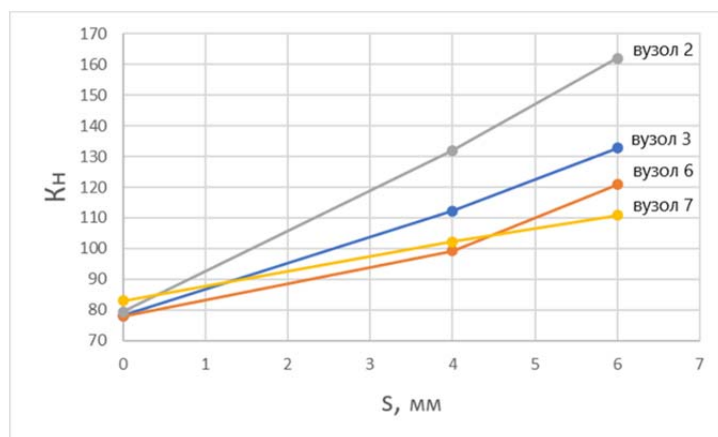


Рисунок 9 – Залежність коефіцієнта несучої здатності вузла K_H від товщини пластини S
Джерело: розроблено авторами.

Ескізи посилення вузлів ферми, що забезпечують достатню рівномірність її елементів, показано на рис. 10. Розміри пластин вибрано з міркувань зручності зварювальних операцій.

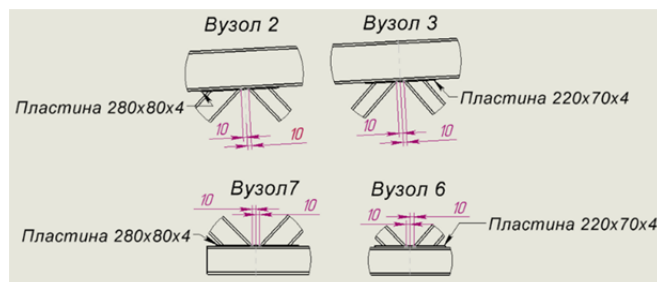


Рисунок 10 – Ескізи посилення вузлів ферми
Джерело: розроблено авторами.

Представлений варіант посилення вузлів забезпечує несучу здатність ферми, що відповідає міцності найбільш напруженої ділянки нижнього поясу.

Висновки. Комплексний аналіз несучої здатності та деформаційної поведінки кроквяної ферми з гнutoзварними прямокутними профілями, виконаний за допомогою сучасних програмних комплексів на основі методу скінченних елементів та спеціалізованого інструментарію IDEA StatiCa, дозволив отримати такі висновки:

1. Безфасонне з'єднання гнutoзварних прямокутних профілів ферми не забезпечує рівномірність її елементів.

2. Несуча здатність такої ферми може бути значно підвищена посиленням критично напружених вузлів.

3. Розрахунок таких вузлів з подальшим обґрунтуванням способів посилення може бути виконаний за допомогою програмних комплексів, побудованих на основі методу скінченних елементів у комбінації зі спеціалізованим комплексом для розрахунку вузлів сполучення елементів несучих конструкцій IDEA StatiCa.

4. Модернізація кроквяної ферми прольотом 18 м шляхом обґрунтованого розрахунку підсилення вузлів дозволяє підвищити її несучу здатність з припущенням граничної пластичної деформації у 1,45 рази без зміни структури та геометричних параметрів.

Список літератури

1. Балук І.М. Оптимальне проектування реконструкції та підсилення стрижневих металевих конструкцій: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01. Львів, 2016. 22 с.
2. Бліхарський З.Я. Реконструкція та підсилення будівель і споруд. Львів: Вид-во Нац. ун-ту «Львівська політехніка», 2008. 108 с.
3. ДБН В.2.6-198:2014. Сталеві конструкції. Норми проектування. Чинний від 2015-01-01. Вид. офіц. Київ: Мінрегіон України, 2014. 199 с.
4. ДСТУ Б В.2.6-74:2008. Конструкції будинків і споруд. Ферми сталеві кроквяні з гнutoзварних профілів прямокутного перерізу. Чинний від 2010-01-01. Вид. офіц. Київ: Мінрегіонбуд України, 2009. 33 с.
5. Зінкевич О.Г. Рациональное проектирование каркасов малоэтажных зданий и надстроек из легких стальных тонкостенных конструкций: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01. Дніпро, 2013. 20 с.
6. Немчинов Ю.І. Метод просторових скінчених елементів (з застосуванням до розрахунку будівель та споруд): монографія. Київ: НДІБК, 1995. 386 с.
7. Пічугін С.Ф., Чичулін В.П. Нові конструктивні системи легких комбінованих ферм. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. Рівне, 2015. № 31. С. 486–491.
8. Пічугін С. Ф., Чичулін В. П., Чичуліна К. В. Нові ресурсоекономні конструкції з профільних труб. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. Рівне, 2016. № 32. С. 243–248.
9. Пермяков В.О., Гоголь М.В. Рекомендації з проектування раціональних металевих несучих конструкцій перекриття та покриття. Львів: Видавництво Національного університету "Львівська політехніка", 2006. 24 с.
10. Програмний комплекс Ліра-САПР. Приклади розрахунку і проектування. *Ліраленд*. URL: https://www.liraland.ua/download/private/lira/2023/lira_sapr_examples_ua.pdf (дата звернення: 24.02.2025).
11. Сталеві конструкції покриття. Ферми покриття із квадратних та прямокутних сталевих труб. УЦСБ. URL: https://uscc.ua/uploads/page/images/konceptii/fermy_truby_18-24m.pdf (дата звернення: 24.02.2025).
12. Бабаєв В.М., Бугаєвський С.О., Євель С.М. Чисельні та експериментальні методи раціонального проектування та зведення конструктивних систем. Київ: Сталь, 2017. 404 с.
13. Чихладзе Е.Д. Удосконалення методів розрахунку і проектування сталебетонних і сталевих конструкцій промислових будівель і споруд. Харків, 2002. 126 с.
14. Frantisek, W. et al. (2019). *Benchmark cases for advanced design of structural steel connections*. Czech Technical University in Prague [in English].
15. CEN – European Committee for Standardisation. EN 1993. (2005) Eurocode 3: *Design of steel structures, Part 1-3: General rules – supplementary rules for coldformed members and sheeting (incorporating CEN corrigendum Nov. 2009)*. Brussels [in English].
16. Idea StatiCa Steel. URL: <https://www.ideastatica.com> (date of access: 24.02.2025) [in English].
17. Steel frame structures. WOLF System. URL: <https://www.wolfssystem.at/en-at/product-lines/industrial-and-commercialconstruction/industrial-construction/steel-frame-structures> (date of access: 06.09.2024) [in English].
18. Pichugin, S.F., Chichulin, V.P., & Chichulina, K.V. (2017). Spatial structures of closed profiles. ACADEMIC JOURNAL series: industrial machine building, civil engineering. Vol. 1. 48. 138–143. URL: <https://doi.org/10.26906/znp.2017.48.787> (date of access: 07.09.2024) [in English].

References

1. Baluk, I.M. (2016). *Optimal design of reconstruction and reinforcement of core metal structures*. Extended abstract of candidate's thesis. Lviv [in Ukrainian].
2. Blikharskyi Z.Ya. (2008). *Reconstruction and reinforcement of buildings and structures*. Lviv [in Ukrainian].
3. DBN. (2014). *Steel Structures*. (ДБН В.2.6-198:2014). Kyiv [in Ukrainian].
4. Derzhstandart Ukrainy. (2008). *Construction of buildings and structures. Steel roof trusses made of rectangular bent-welded profiles*. (ДСТУ Б В.2.6-74:2008). Kyiv [in Ukrainian].
5. Zinkevych, O.H. (2013). *Rational design of frames of low-rise buildings and superstructures made of light steel thin-walled structures*. Extended abstract of candidate's thesis. Dnipro [in Ukrainian].
6. Nemchynov, Yu.I. (1995). *Spatial finite element method (with application to the design of buildings and structures)*. Kyiv: NDIBK [in Ukrainian].
7. Pichuhin, S.F., Chychulin, V.P. (2015). New structural systems for lightweight combined trusses. *Resursoekonomni materialy, konstruktzii, budivli ta sporudy*, 31, 486–491 [in Ukrainian].
8. Pichuhin, S.F., Chychulin, V.P., & Chychulina, K.V. (2016). *New resource-saving structures made of shaped tubes*. *Resursoekonomni materialy, konstruktzii, budivli ta sporudy*, 32, 243–248 [in Ukrainian].

9. Permiakov, V.O., & Hohol M.V. (2006). *Recommendations for the design of rational metal load-bearing structures to slab and roof*. Lviv [in Ukrainian].
10. Program complex Lira-SAPR. *Examples of calculation and design*. Liraland. https://www.liraland.ua/download/private/lira/2023/lira_sapr_examples_ua.pdf [in Ukrainian].
11. *Steel roof structures. Roof trusses made of square and rectangular steel hollow sections*. USCC. https://uscc.ua/uploads/page/images/koncepcii/fermy_truby_18-24m.pdf [in Ukrainian].
12. Babayev, V.M., Bugayevsky, S.O., & Evel, S.M. (2017). *Numerical and experimental methods of rational design and construction of structural systems*. Kyiv: Stal [in Ukrainian].
13. Chykhlyadze, E.D. (2002). *Improvement of calculation and design methods of steel-concrete and steel structures of industrial buildings and structures*. Kharkiv [in Ukrainian].
14. Frantisek, W. et al. (2019). *Benchmark cases for advanced design of structural steel connections*. Czech Technical University in Prague.
15. CEN – European Committee for Standardisation. EN 1993. (2005) *Eurocode 3: Design of steel structures, Part 1-3: General rules – supplementary rules for coldformed members and sheeting (incorporating CEN corrigendum Nov. 2009)*. Brussels.
16. *Idea StatiCa Steel*. <https://www.ideastatica.com>.
17. *Steel frame structures*. WOLF System. <https://www.wolfssystem.at/en-at/product-lines/industrial-and-commercialconstruction/industrial-construction/steel-frame-structures>.
18. Pichugin, S.F., Chichulin, V.P., & Chichulina, K.V. (2017). Spatial structures of closed profiles. *ACADEMIC JOURNAL series: industrial machine building, civil engineering*. Vol. 1. 48. 138–143. <https://doi.org/10.26906/znp.2017.48.787>.

Hennadii Portnov¹, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Viktor Dariienko**¹, Assoc. Prof., PhD tech. sci.,

Pukalov Viktor¹, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Volodymyr Yatsun**¹, Prof., PhD tech. sci.

Serhii Hudz², Assoc. Prof., PhD tech. sci.

¹*Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine*

²*Pryazovskyi State Technical University, Dnipro, Ukraine*

Modernization of Steel Trusses Made of Square and Rectangular Hollow Sections

The purpose of this study is to investigate the stress-strain behavior of nodes in purlin trusses fabricated from square and rectangular steel tubes. In modern steel construction, ensuring optimal material utilization and structural reliability is essential. The research aims to identify the causes of uneven stress distribution in conventional truss joints and to explore innovative reinforcement methods. By addressing the low utilization coefficient inherent in standard connections, the study seeks to develop a reinforcement strategy that enhances load-bearing capacity without altering the overall geometry of the structure.

In the presented work, an advanced numerical analysis was carried out using the finite element method in combination with the specialized IDEA StatiCa software. A detailed computational model of the truss nodes was developed to assess the internal force distribution and to pinpoint critical zones where stress concentrations occur. The investigation involved iterative simulations and parametric studies to evaluate the effectiveness of incorporating intermediate reinforcement elements, such as strengthening plates, into the node configurations. The simulation results revealed that conventional unreinforced connections exhibit significant local overstressing, which limits the effective use of steel. In contrast, the introduction of targeted reinforcement produced a more uniform stress distribution and resulted in an increase in the overall load-bearing capacity of the truss system by approximately 1.45 times. The comprehensive analysis confirms that advanced modeling techniques can reliably predict the benefits of design modifications for enhanced structural performance.

The results of this study confirm that the integration of intermediate reinforcement in purlin truss nodes substantially improves structural efficiency and load capacity. The optimized design achieves a more even stress distribution and minimizes the risk of local failures without requiring any changes to the truss geometry. Advanced finite element analysis has proven to be a crucial tool in identifying critical stress zones and guiding effective reinforcement strategies. Consequently, the proposed methodology offers a viable solution for modernizing steel truss systems in both civil and industrial applications, ensuring enhanced safety and material efficiency.

truss modernization, finite element analysis, stress distribution, structural reinforcement

Одержано (Received) 18.03.2025

Прорецензовано (Reviewed) 28.03.2025

Прийнято до друку (Approved) 22.04.2025