

Рюмін В.В., Солодовник Ю.Ю.

Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ Т-ПОДІБНИХ КОМПОНЕНТІВ У ВУЗЛОВИХ З'ЄДНАННЯХ БАЛКИ З КОЛОНОЮ: ПРОВЕДЕННЯ ПОВНОГО ФАКТОРНОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ

У статті представлено алгоритм реалізації різних експериментальних планів та методи обробки отриманих даних із використанням загальної лінійної регресійної моделі для Т-подібних компонентів вузлових з'єднань. Для забезпечення достовірності результатів експеримент проводився триразово, використовуючи аналітичний метод, а також аналіз даних за допомогою програмних комплексів ANSYS Workbench та IDEA StatiCa.

Ключові слова: несуча здатність, оберտальна жорсткість, чисельна модель, Т-подібний компонент.

Постановка проблеми

Натурний експеримент має свою специфіку, оскільки проведення кожного випробування потребує значних фінансових та часових ресурсів. Формування великої вибірки, що складається з сотень або тисяч спостережень, є неможливим через обмежені можливості проведення випробувань. Тому кількість експериментів зазвичай зводять до мінімально необхідного рівня. Водночас отримані дані мають бути достатніми для формулювання статистично обґрунтованих висновків. Це вимагає ретельного планування експерименту та оптимізації методів збору й аналізу інформації.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Сучасні методи планування експерименту знаходять широке застосування в різних сферах. На практиці використання даної методології включає два основні аспекти: автоматизоване створення плану експерименту та обробку отриманих результатів після його проведення. Аналіз даних зазвичай здійснюється з використанням методів дисперсійного та регресійного аналізу, що базуються на загальній лінійній моделі.

Автори статті [1] досліджують побудову математичної моделі технологічних процесів на основі результатів повного факторного експерименту. Вони зазначають, що лише експериментальні дослідження можуть забезпечити необхідну інформацію для створення якісного алгоритму керування об'єктом. Особливу увагу приділено питанню зменшення кількості експериментів без втрати точності математичної моделі. Автори наголошують на

ефективності активного експерименту, який дозволяє цілеспрямовано вибирати значення факторів і суттєво скорочувати обсяг досліджень. В статті також розглянуто методи математичної обробки експериментальних даних для оптимізації технологічних процесів. Наукова робота зосереджена на важливості математичного планування експерименту.

Гартмут Шіфер та Фелікс Шіфер у своїх роботах [2] розглядають причинно-наслідкові зв'язки в контексті планування експериментів (ПЕ), які є потужним інструментом для визначення кореляцій між змінними. ПЕ дозволяє з високою точністю і в межах обмежених ресурсів, таких як час і матеріальні витрати, аналізувати вплив змінних на результат (цільову змінну). Вчені детально описують основні принципи планування експериментів, зокрема такі ключові аспекти, як повторення експериментів, рандомізація та блокування (формування блоків). Зазначаються різні типи експериментальних планів, зокрема повні факторні плани, дробові факторні плани та факторні плани з центральною точкою.

Дослідження [3] спрямоване на визначення оптимальної комбінації факторів для отримання правильного значення вмісту азоту за допомогою повного факторного плану експерименту з чотирма повтореннями. Результати проаналізовано за допомогою дисперсійного аналізу і показано, що визначені фактори, а також їх взаємодія є значущими. Розроблена регресійна модель пояснює 76,43% варіації між факторами.

Планування експерименту є цінним статистичним інструментом, який допомагає дослідникам отримувати точні та надійні результати. Воно сприяє

оптимізації досліджень, зменшуючи витрати ресурсів і часу. Завдяки цьому методу вчені та інженери можуть ефективно проводити експерименти та аналізувати їхні результати.

Формування мети статті

У даній роботі ставиться завдання дослідити напівжорстке вузлове з'єднання металевих конструкцій у системі «балка - колона». Необхідно проаналізувати вплив конструктивних рішень на обертальну жорсткість і піддатливість з'єднань для підвищення ефективності конструкцій. При цьому, використовуючи «компонентний метод», розглядати вузлове з'єднання як сукупність Т-подібних компонентів. Планується провести повний факторний експеримент, що дасть змогу визначити ключові параметри Т-подібного компонента, які впливають на його несучу здатність при розтягуванні.

Виклад основного матеріалу

У сучасному будівництві сталевих конструкцій важливу роль відіграє правильне проектування вузлових з'єднань, оскільки їхня механічна поведінка безпосередньо впливає на загальну несучу здатність конструкції. Одним із найбільш ефективних методів аналізу вузлових з'єднань є «компонентний метод», який дозволяє аналітично оцінювати їхню поведінку на основі механічних властивостей матеріалу компонентів та відповідних геометричних параметрів. Цей метод широко застосовується в інженерній практиці [4-10] та є основою для норм проектування сталевих конструкцій згідно з Єврокодом 3 (EC3). Важливим аспектом є моделювання вузлових з'єднань у зоні розтягування, де виділяються основні компоненти: фланець, торець колони та болти. Згідно з методикою, поданою в [8, 10], усі ці елементи моделюються за допомогою двох Т-подібних компонентів, що з'єднуються через фланець високоміцними болтами. Такий підхід дозволяє значно підвищити точність розрахунків і забезпечити надійність конструкцій, що відповідають сучасним стандартам проектування.

У дослідженнях складних систем часто використовують підхід, коли аналізується лише взаємозв'язок між вхідними та вихідними параметрами без врахування внутрішньої структури об'єкта. Для визначення цих залежностей застосовують імітаційне моделювання, яке дозволяє замінити реальний об'єкт його математичною моделлю [11, 12]. Важливим інструментом є планування експерименту, що

передбачає активне втручання дослідника у зміну рівнів контрольованих факторів. Водночас неконтрольовані фактори, такі як зовнішні впливи, можуть ускладнювати відтворюваність експерименту. Для аналізу отриманих даних будують математичну модель, яка встановлює залежність між параметром оптимізації та функцією відгуку.

Для проведення досліджень складено матрицю плану дворівневого повного факторного експерименту, у якій кількість дослідів визначено за формулою 2^k . Важливою умовою коректного опрацювання результатів є ортогональність матриці, коли сума добутків значень у будь-яких двох стовпцях дорівнює нулю. Повний факторний експеримент доцільно використовувати для обмеженої кількості факторів, оскільки зі збільшенням їхньої кількості зростає й обсяг необхідних експериментів. У дослідженні було реалізовано 16 варіантів взаємодії рівнів факторів (табл. 1). Значення факторів кодувалися символами «+» для максимального рівня та «-» для мінімального, що дозволило спростити аналіз даних. Перетворення лінійних величин у кодовані значення виконується за формулою (1).

$$X_i = \frac{x_i - 0.5(\max x_i + \min x_i)}{0.5(\max x_i - \min x_i)} \quad (1)$$

Визначено інтервали варіювання параметрів Т-подібного компонента для побудови математичної моделі його впливу на граничне зусилля під час розтягування (табл. 2). Розглядалися наступні параметри: товщина поясу $X_1 (t_f)$, відстань між болтами $X_2 (w)$, діаметр болтів $X_3 (d)$ та крок болтів $X_4 (p)$ (рис. 1).

Таблиця 1

Матриця повного факторного експерименту з кодованими рівнями факторів

План	№ дослідів	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
2^2	1	+	+	+	+	+
	2	-	+	+	+	+
	3	+	-	+	+	+
	4	-	-	+	+	+
2^3	5	+	+	-	+	+
	6	-	+	-	+	+
	7	+	-	-	+	+
	8	-	-	-	+	+
2^4	9	+	+	+	-	+
	10	-	+	+	-	+
	11	+	-	+	-	+
	12	-	-	+	-	+
	13	+	+	-	-	+
	14	-	+	-	-	+
	15	+	-	-	-	+
	16	-	-	-	-	+

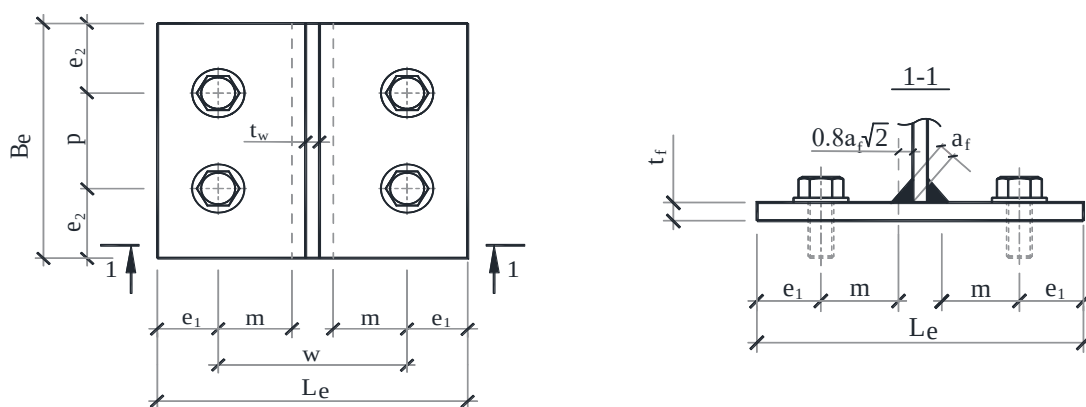


Рис. 1. Геометричні параметри моделі, що досліджується.

Таблиця 2

Рівні факторів

Фактори	X1 (t_f , мм)	X2 (w , мм)	X3 (d , мм)	X4 (p , мм)
Основний рівень (X_{i_0})	12	120	14	40
Інтервал варіювання ΔX_i	4	40	4	10
Верхній рівень ($x_i = 1$)	16	160	18	60
Нижній рівень ($x_i = -1$)	8	80	10	50

Для кожної точки плану було проведено віртуальний експеримент із визначення несучої здатності Т-подібного компонента під час розтягування, причому кожен дослід повторювався тричі. Оскільки натурні випробування є складними, розрахунки виконувалися за допомогою програмних комплексів IDEA StatiCa та ANSYS Workbench, а також аналітичних методів відповідно до норм проєктування ЕС3.

Стінка та пояси Т-компонента в IDEA StatiCa моделювалися оболонковими елементами, а пластини - пружнопластичним матеріалом із нахилом плато плинності згідно з ЕС3. Поведінка матеріалу базувалася на критерії плинності фон Мізеса, передбачаючи його пружний стан до досягнення межі плинності, а граничним критерієм для незминальних ділянок - максимальна мембранна деформація.

Для моделювання Т-подібного компонента в ANSYS Workbench використовувався об'ємний скінченноелементний підхід із застосуванням елемента типу SOLID 186, який враховує пластичність, повзучість, зміну жорсткості під навантаженням і можливість великих деформацій. Поведінка матеріалу в зоні поза пружними деформаціями була задана відповідно до рекомендацій ЕС3. Для оптимізації розрахунків модель будувалася з урахуванням її симетрії відносно площини YOZ. Процес розробки

скінченноелементних моделей базувалася на рекомендаціях, наведених у [13-15].

Результати розрахунку

Модель Т-подібного компонента за програмним комплексом IDEA StatiCa, що відповідає рядку плану 1 (табл. 1), представлена на рисунку 2.

Модель Т-подібного компонента за програмним комплексом ANSYS Workbench, що відповідає рядку плану 1 (табл. 1), представлена на рисунку 3.

У результаті проведення повного факторного експерименту 2^k було отримано рівняння регресії (2).

$$Y = 171 + 75x_1 - 49x_2 + 32x_3 - 18x_{12} - 17x_{23} + 14x_{123} \quad (2)$$

На основі отриманого рівняння було визначено розрахункові значення відгуку. Додатково проведено обчислення дисперсії неадекватності моделі.

Значення несучої здатності Т-подібного компонента для всіх точок експериментального плану представлено в таблиці 3.

При кількості дослідів у точці плану 3 та 9 ступенях свободи дисперсія неадекватності моделі становить $S_{\text{неад}}^2 = 1,6$. Оскільки розрахункове значення критерію F (0,8) менше табличного (2,20) при рівні значущості 0,05, гіпотеза щодо адекватності моделі не відхиляється.

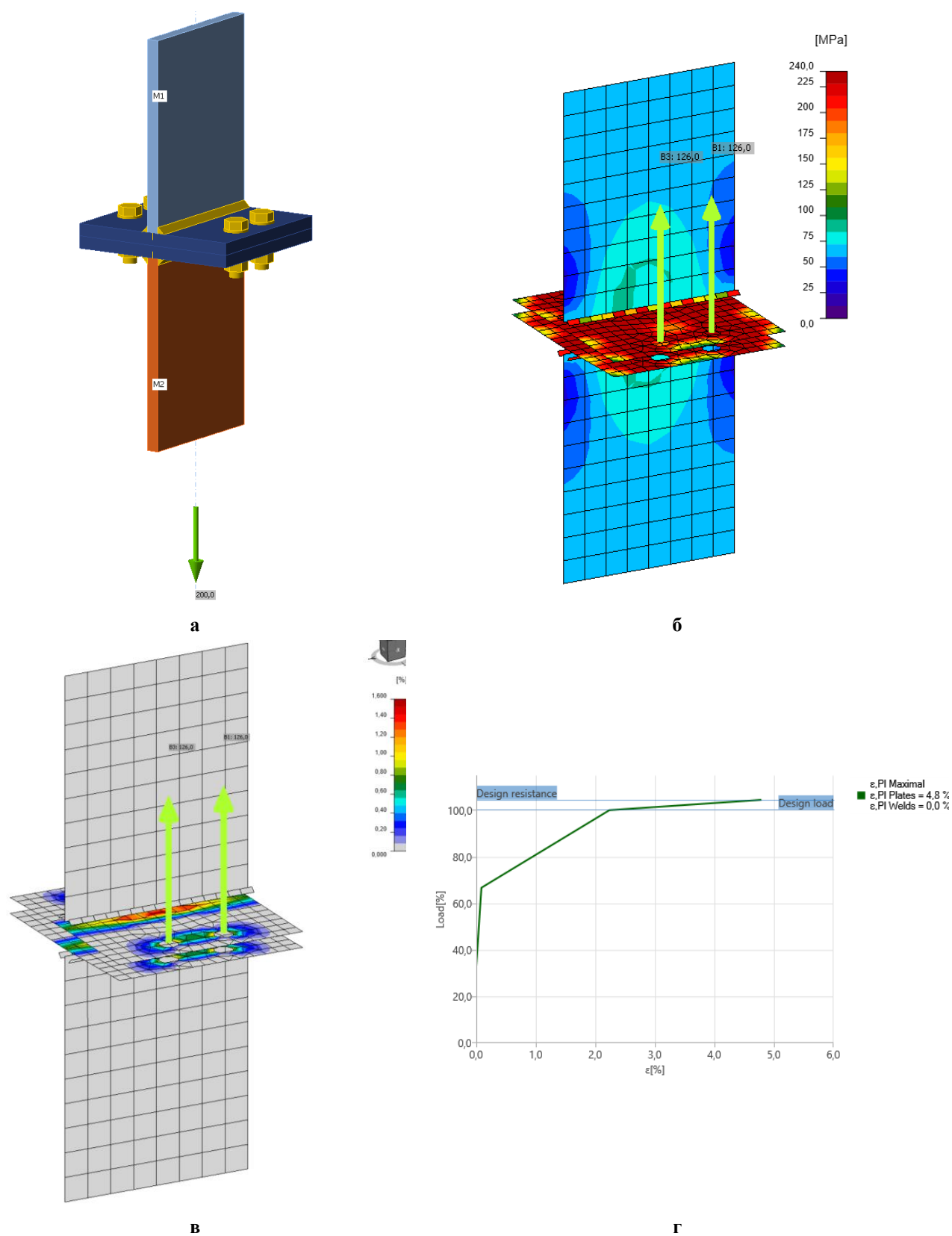
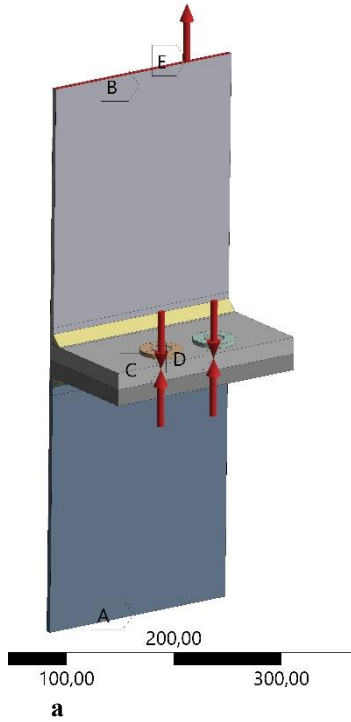


Рис.2. Результати розрахунку: а – розрахункова модель; б – характер розподілу еквівалентних напружень; в – розподіл пластичних деформацій; г – діаграма несучої здатності з'єднання.

A: Test1

Static Structural
Time: 10, s
09.02.2025 7:33

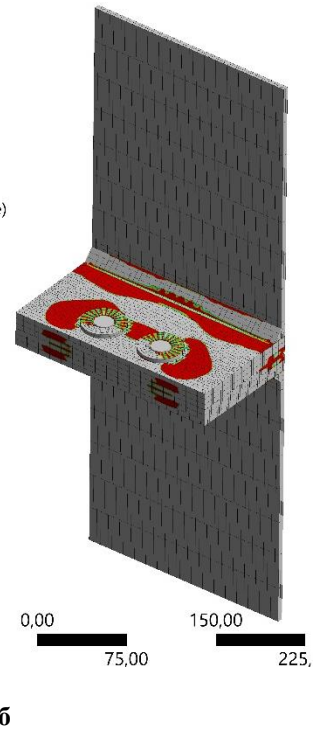
- A Fixed Support
- B Displacement
- C Bolt Pretension: Lock
- D Bolt Pretension 2: Lock
- E Force: 1,3e+005 N



A: Test1

Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: MPa
Time: 10 s
Deformation Scale Factor: 1.0 (True Scale)
09.02.2025 7:34

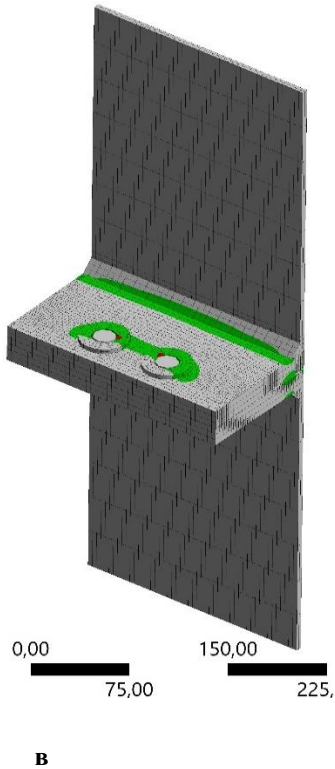
346,59 Max
245
242
240
0,68912 Min



A: Test1

Equivalent Plastic Strain
Type: Equivalent Plastic Strain
Unit: mm/mm
Time: 10 s
Deformation Scale Factor: 1.0
09.02.2025 7:35

0,022238 Max
0,015
0,001
0 Min



A: Test1

Pressure
Type: Pressure
Unit: MPa
Time: 10 s
Deformation Scale Factor: 1.0
09.02.2025 7:36

274,77 Max
228,33
181,88
135,43
88,989
42,543
-3,9026
-50,348
-96,794
-143,24 Min

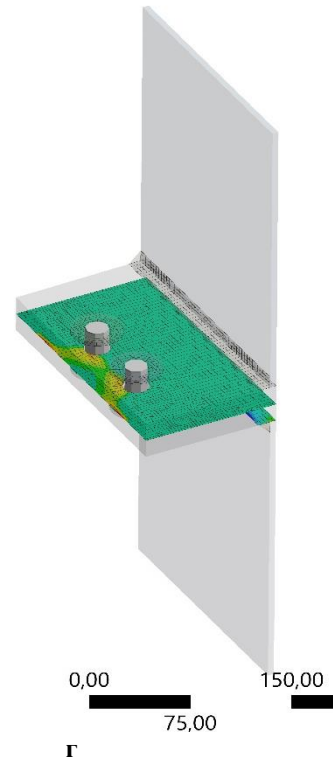


Рис. 3. Результати розрахунку: а – розрахункова модель; б – характер розподілу еквівалентних напружень; в – розподіл пластичних деформацій; г – розподілення контактних напружень.

Таблиця 3

Несуча здатність Т-компонента для 16 точок плану

Номер точки плану	Результати віртуальних експериментів			Середнє значення функції відклику	Розрахунок за отриманим рівнянням регресії	Квадрат різниці між середнім значенням функції відклику (експеримент) та розрахунковим значенням (модель)
	IDEA StatiCA	ANSYS	Аналітичний розрахунок			
	$F_{T.Rd}$, кН	$F_{T.Rd}$, кН	$F_{T.Rd}$, кН			
1	210	208	205	207,6666667	208	0,11111111
2	65	64	67	65,33333333	66	0,44444444
3	347	350	349	348,6666667	348	0,44444444
4	160	163	162	161,6666667	161	0,44444444
5	137	142	140	139,6666667	139	0,44444444
6	50	52	50	50,66666667	50	0,44444444
7	238	239	239	238,6666667	239	0,11111111
8	103	105	105	104,3333333	104	0,11111111
9	218	220	218	218,6666667	219	0,11111111
10	56	54	57	55,66666667	55	0,44444444
11	385	390	385	386,6666667	387	0,11111111
12	150	151	150	150,3333333	151	0,44444444
13	140	138	140	139,3333333	139	0,11111111
14	75	77	75	75,66666667	75	0,44444444
15	250	255	252	252,3333333	252	0,11111111
16	105	102	100	102,3333333	103	0,44444444

Важливо підкреслити, що всі висновки щодо напрямку та сили впливу досліджуваних факторів стосуються лише вибраних інтервалів їх варіювання. У межах цих інтервалів встановлено, що відстань між рядами болтів p не має значного впливу на несучу здатність Т-подібного компонента при розтягу, тоді як ефекти парної та потрійної взаємодії параметрів відіграють суттєву роль. Відносний вплив цих ефектів відображено на діаграмі (рис. 4), де висота стовпчиків характеризує силу впливу, причому заштриховані стовпчики відповідають додатним значенням коефіцієнтів, а незаштриховані – від’ємним.

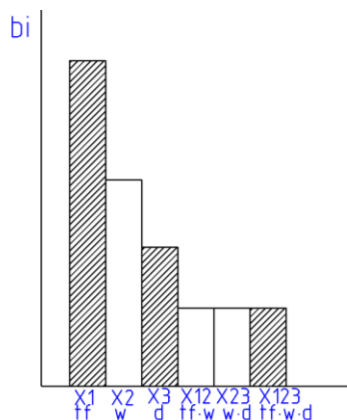


Рис. 4. Ступінь впливу окремих факторів та їх взаємодії.

З рисунка 4 видно, що найзначніший вплив на несучу здатність Т-подібного компонента має товщина полицок (X_1), відстань між болтами (X_2) та діаметр болтів (X_3), а також взаємодія парних (X_1X_2) та потрійних факторів ($X_1X_2X_3$). Спираючись на ці дані, можна визначити оптимальні рівні факторів для досягнення максимальної несучої здатності, що вже було реалізовано у матриці планування (точка плану 3).

Висновки

Було проведено повний факторний експеримент для визначення впливу основних параметрів Т-подібного компонента на його несучу здатність при роботі на розтяг. Такий підхід забезпечує комплексний аналіз чинників, що впливають на цільову функцію, та дає можливість оптимізувати параметри для досягнення максимальних характеристик міцності. Оскільки в дослідженні з'єднання розглядалося як набір Т-подібних компонентів, застосований метод дозволив прогнозувати його поведінку під навантаженням.

Таким чином, запропонований підхід є ефективним в подальших дослідженнях і вдосконаленні конструкційних рішень, а отримані результати можуть бути використані для подальшої оцінки несучої здатності вузлового з'єднання системи «балка-колона».

Література

1. Olga Prishchenko. Construction of statistical models of chemical and technological objects on the basis of a complete factor experiment. [Текст] / Olga Prishchenko, Tetyana Chernogor // *Bulletin of the National Technical University KhPI Series Innovation researches in students' scientific work* – 2023p.
2. Hartmut Schiefer. Statistical Design of Experiments (DoE). [Текст] / Hartmut Schiefer, Felix Schiefer // *Statistics for Engineers. An Introduction with Examples from Practice*. – 2021p. – С. 1-20. – Режим доступу: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-658-32397-4>.
3. John Joshua F. Montanez. Detection of Soil Nitrogen Levels via Grayscale Conversion: A Full-Factorial Design of Experiment Approach. [Текст] / John Joshua F. Montanez // *International Journal of Computing and Digital Systems*. – 2025p. – Vol. 17, №1, – С. 1-10. Режим доступу: <http://dx.doi.org/10.12785/ijcds/1570999111>.
4. Zoetemeijer P. A design method for the tension side of statically loaded bolted beam-to-column connections [Текст] // *Heron, Delft University* - 1974, Vol. 20, №1.
5. Boracchini A. Design and analysis of connections in steel structures [Текст] / Alfredo Boracchini - Ernst&Sohn, 2018.
6. Kozlovski, A. Estimation of the initial stiffness and moment resistance on steel and composite joints [Текст] / A. Kozlovski, R. Kowalczyk, M. Gizejowski - CTUBH 8-th World congress, 2008. – p 1-7.
7. Солодовник Ю.Ю. Розрахунок несучої здатності вузлів сталевих конструкцій на основі компонентного методу. [Текст] / Солодовник Ю.Ю., Рюмін В.В., Нікічанов В.В. // *Науково-технічний збірник "Комунальне господарство міст"* – 2021р. - Т.1 випуск №161, Харків, - С. 19-24. - Режим доступу: <http://dx.doi.org/10.33042/2522-1809-2021-1-161-19-24>.
8. Солодовник Ю.Ю. Аналітична модель т-подібного компоненту розтягнутої зони фланцевого вузлового з'єднання балки з колоною. [Текст] // *Науково-технічний збірник "Комунальне господарство міст"* – 2023р. - Т.1 випуск №175, Харків, - С. 58-63. - Режим доступу: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2023-1-175-58-6>.
9. Cabaleiro, M. Analytical T-stub model for the analysis of clamps in structural metal joints. [Текст] / Cabaleiro M., Riveiro B., Conde B., Saamaño J.C. // *J. Constr. Steel Res.* - 2017, №130, p. 138–147.
10. Солодовник Ю.Ю. Аналіз поведінки т-подібного компоненту фланцевого вузлового з'єднання балки з колоною на підставі чисельної моделі та норм EN – 1993-1-8. [Текст] / Солодовник Ю.Ю., Рюмін В.В. // *Науково-технічний збірник "Комунальне господарство міст"* – 2023р. - Т.4 випуск №178, Харків, - С. 92-101. - Режим доступу: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2023-4-178-92-101>.
11. Лапач С.М. Теорія планування експериментів. [Текст] // *Навчальний посібник* – 2020р. – КПП ім. Ігоря Сікорського, Київ, – 86с.
12. Білушак Г.І. Аналітичні та чисельні методи дослідження. Статистичні методи аналізу даних. [Текст] / Білушак Г.І., Чабанюк Я.М. // *Навчальний посібник для здобувачів вищої освіти* – 2024р. – Львів, – 315с.
13. Bursi O. S. Benchmarks for Finite Element Modelling of Bolted Steel Connections [Текст] / Bursi O. S., Jaspart J. P. // *J. Construct. Steel Res* - 1997a, № 43(3), p. 17–42.
14. Bursi O. S. Calibration of a Finite Element Model for Isolated Bolted End-Plate Steel Connections [Текст] / Bursi O. S., Jaspart J. P. // *J. Construct. Steel Res.* – 1997, Vol. 44, №. 3, p. 225-262.
15. Xiaolin Chen. Finite element modeling and simulation with ANSYS workbench [Текст] / Xiaolin Chen, Yijun Liu // *CRC Press Taylor & Francis group* – 2019, p.473.

References

1. Olga Prishchenko, Tetyana Chernogor (2023). Construction of statistical models of chemical and technological objects on the basis of a complete factor experiment. *Bulletin of the National Technical University KhPI Series Innovation researches in students' scientific work*.
2. Hartmut Schiefer, Felix Schiefer (2021). Statistical Design of Experiments (DoE). *Statistics for Engineers. An Introduction with Examples from Practice*. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-658-32397-4>.
3. John Joshua F. Montanez (2025). Detection of Soil Nitrogen Levels via Grayscale Conversion: A Full-Factorial Design of Experiment Approach. *International Journal of Computing and Digital Systems*. Vol. 17, №1, <http://dx.doi.org/10.12785/ijcds/1570999111>.
4. Zoetemeijer P. (1974). A design method for the tension side of statically loaded bolted beam-to-column connections. *Heron, Delft University*, Vol. 20, 1.
5. Alfredo Boracchini (2018). Design and analysis of connections in steel structures. *Ernst&Sohn*.
6. Kozlovski, A, Kowalczyk R., Gizejowski M. (2008). Estimation of the initial stiffness and moment resistance on steel and composite joints. *CTUBH 8-th World congress*, p1-7.
7. Solodovnyk Y., Riumin V., Nikichanov V. (2021). Evaluation of load-bearing capacity of the steel construction joints on the basis of component method. *Scientific and technical journal "Municipal economy of cities"*. Vol 1 №161, p. 19-24. <http://dx.doi.org/10.33042/2522-1809-2021-1-161-19-24>.
8. Solodovnyk, Y. (2023). Analytical model of the t- stub component in the end - plate bolted connection of the beam to the column in tension. *Scientific and technical journal "Municipal economy of cities"*. Vol 1, 175, 58-63. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2023-1-175-58-6>.
9. Cabaleiro, M., Riveiro, B., Conde B., Saamaño, J.C. (2017). Analytical T-stub model for the analysis of clamps in structural metal joints. *J. Constr. Steel Res.*, 130, 138–147.
10. Solodovnyk, Y., Riumin V. (2023). T-stub component behavior of the beam to column bolted flange connection based on a numerical analysis and EN 1993-1-8 design codes. *Scientific and technical journal "Municipal economy of cities"*. Vol 4, 178, 92-101. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2023-4-178-92-101>.
11. Lapach S.M. (2020). Experimental design theory. Study guide. *Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv*, 86p.

12. Bilushchak G.I., Chabaniuk Y.M. (2024). Analytical and numerical research methods. Statistical methods of data analysis. *Study guide for higher education students*, Lviv, 315p.

13. Bursi, O. S., Jaspart, J. P. (1997a). Benchmarks for Finite Element Modelling of Bolted Steel Connections. *J. Construct. Steel Res.*, 43(3), 17–42.

14. Bursi, O. S., Jaspart, J. P. (1997). Calibration of a Finite Element Model for Isolated Bolted End-Plate Steel Connections. *J. Construct. Steel Res.*, Vol. 44, 3, 225-262.

15. Xiaolin Chen, Yijun Liu. (2019). Finite element modeling and simulation with ANSYS workbench. *CRC Press Taylor & Francis group*, 473.

Рецензент: д-р техн. наук проф. Яровий С.М., Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, Україна

Автор: РІУМІН Володимир Володимирович
кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри
будівельного проєктування

Харківський національний університет міського
господарства імені О. М. Бекетова

E-mail - volodymyr.riumin@kname.edu.ua

ID ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8884-589X>

Автор: СОЛОДОВНИК Юлія Юріївна

асистент кафедри будівельного проєктування

Харківський національний університет міського
господарства імені О. М. Бекетова

E-mail - yuliia.solodovnyk@kname.edu.ua

ID ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5243-9993>

STUDY OF T-STUB COMPONENTS OF A BEAM TO COLUMN JOINT: A FULL FACTORIAL EXPERIMENT

V. Riumin, Yu. Solodovnyk

O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Ukraine

The article discusses the application of the component method to assess the bearing capacity of a T-stub component of steel structures in tension. The method allows analysing the behaviour of the joint based on the mechanical characteristics of the material and geometrical parameters. The proposed approach is based on the consideration of a joint as a set of individual main components that interact with each other to form a complex structural system.

The study was carried out by modelling and analysing various parameters of the component using the finite element method in software packages, which allowed to determine the critical factors that affect its bearing capacity. A full factorial experiment was carried out, within which a research planning matrix was built and regression equations were determined to assess the influence of the main parameters. The analysis of the data obtained allowed us to identify the most significant factors affecting the behaviour of the component, in particular, the thickness of the shelf, the distance between the bolts and the diameter of the bolts. The significant influence of pairwise and triple interactions between the factors on the bearing capacity of the connection was also revealed.

The results of the study showed that the model has high adequacy, since the calculated value of the F-criterion is less than the tabulated value, which confirms the reliability of the results. The relative strength of the influence of the factors was analysed using diagrams, which made it possible to determine the most optimal parameters for improving the bearing capacity of the structure.

The application of the component method makes it possible to significantly increase the accuracy of calculations, minimise the cost of physical experiments, and improve the design process of steel structures. The results obtained can be used to develop recommendations for optimising design solutions in the design of joints. Thus, this study contributes to improving the efficiency of bearing capacity calculations and expanding the possibilities for the practical application of mathematical modelling methods in structural engineering.

Keywords: bearing capacity, rotational stiffness, numerical model, T-stub component.