

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ
БОЛТОВИХ З'ЄДНАНЬ У ЛЕГКИХ СТАЛЕВИХ
ТОНКОСТІННИХ КОНСТРУКЦІЯХ**
*EXPERIMENTAL STUDY OF BOLTED CONNECTIONS IN LIGHT
STEEL THIN-WALLED CONSTRUCTIONS*

д.т.н., професор Семко О.В., аспірант Шумейко К.О. (Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка)

Dr. Professor A.V. Semko., postgraduate student K.A. Shumeyko (Poltava Yuri Kondratyuk National Technical University)

Анотація

Стаття присвячена результатам випробувань і теоретичним розрахункам болтових з'єднань у легких тонкостінних конструкціях.

Abstract

The article is devoted to the testing and theoretical calculations of bolted connections in thin-walled light-weight structures

Постановка проблеми у загальному вигляді. Метою цих випробувань було дослідити тип відмов та вплив використання шайб з різним діаметром, розглянути методики розрахунку за нормативами ECCS Recommendations EN 1993-1-3[1], AISI Specification [2], British Standard BS 5950-5 [3], методом Zadanfarrokh [4], як в цих нормативах враховується вплив використання шайб та їх діаметр, порівняти результати випробувань із теоретичними розрахунками, визначити типи відмов.

Аналіз останніх досліджень та виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми. Питання впливу використання шайб у болтових з'єднаннях та їх розміру були розглянуті авторами F.Zadanfarrokh [4], J. Wallace та R. Schuster, R. LaBoube.[5]. За результатами попередніх досліджень [4,5] увагу слід приділити наступним параметрам, які можуть вплинути на несучу здатність болтових з'єднань при роботі на розтяг: 1) діаметр болта d ; 2) відстань від краю e ; 3) відстань між болтами по нормалі до напрямку дії сили s , (для одного болта, s повна ширина листа); 4) товщина листа t ; 5) межа міцності сталі при розтягу F_u ; 6) межа текучості сталі F_y ; 7) відношення параметрів e/d , d/t , d/s та F_u/F_y ; 8) кількість болтів; 9) використання шайб.

Виклад основного матеріалу. Проведемо аналіз провідних існуючих нормативів із розрахунку несучої здатності болтових

з'єднань у легких сталевих тонкостінних конструкціях. Оскільки товщина з'єднувальних пластин мала, то руйнування відбудеться при втраті несучої здатності металу пластин, або при руйнуванні по перерізу нетто. Якщо товщина пластин $t < 2$ мм – зріз болта майже не можливий. Отже, розрахунок болтового з'єднання виконується в такому порядку:

Відповідно до EN1993-1-3 [1], несуча здатність болтового з'єднання:

$$F_{b,Rd} = 2,5\alpha_b k_t f_u d t / \gamma_{M2}, \quad (1)$$

де: α_b - найменше значення з 1,0 та $e_t / (3d)$; $k_t = (0,8t + 1,5) / 2,5$ для $0,75 \text{ мм} \leq t \leq 1,25 \text{ мм}$; $k_t = 1$ для $t \geq 1,25 \text{ мм}$.

Розрахунок на міцність по перерізу нетто у нормативі представлений формулою:

$$F_{n,Rd} = (1 + 3r(d_0 / u - 0,3)) A_{net} f_u / \gamma_{M2}, \quad (2)$$

де r – число болтів у поперечному перерізі, поділене на загальне число болтів у з'єднанні, d_0 – номінальний діаметр отвору, u – менша величина з $2e_2$ або p_2 .

Деяко відмінний підхід до розрахунку несучої здатності у північноамериканському нормативному документі AISI [2]: у формулі присутні коефіцієнт C , що може розглядатися як коефіцієнт несучої здатності, котрий є функцією відношення діаметра болта до товщини листа, варіюється у межах від 3 до 1,8 у відповідності до табл. Е3.3.1-1[2], а також m_f змінний фактор, що залежить від типу з'єднання та наявності шайб і їх розташування, табл. Е3.3.1-2[2]:

$$P_n = m_f C d t F_u, \quad (3)$$

де d – номінальний діаметр болта; t – мінімальна з товщин з'єднувальних елементів, F_u – межа міцності сталі при розтягу.

Для запобігання руйнуванню по робочому перерізу нетто, номінальна міцність на розтяг повинна визначатися наступним чином:

$$P_n = A_n F_t, \quad (4)$$

у свою чергу F_t визначається з рівняння (5) для випадку використання шайб під головку та гайку болта, для інших комбінацій – дивитись пункт Е3.2 [2]:

$$F_t = (0,1 + 3d / s) F_u \leq F_u \quad (5)$$

де d – номінальний діаметр болта, s – ширина листа, розділене на число отворів для болтів в поперечному перерізі, що аналізується, F_u – межа міцності сталі при розтягу.

У британському нормативі BS 5950-5 [3] несуча здатність визначається у залежності від товщини листів, що з'єднуються та відношенню крайової відстані до діаметру. При таких параметрах $1\text{мм} < t \leq 3\text{мм}$ та $e/d > 3$, несуча здатність визначається як:

$$P_{bs} = (1.65 + 0.45t)dt\rho_y \quad (6)$$

Значення несучої здатності повинно бути зменшено на 25%, якщо хоча б одна шайба не використовується або шайби взагалі відсутні. Розрахункове значення зусилля, що діє у перерізі нетто болтового з'єднання розраховується аналогічно як і в AISI Specification [2].

У результаті досліджень Zadanfarrokh [4], автором була розроблена формула для визначення несучої здатності, яка залежить від ряду факторів k , що зведені у таблицю 1. Розрахунковий вираз для несучої здатності P визначається як:

$$P_{ds} = \alpha \cdot d \cdot t \cdot \sigma_{ult} \quad (7)$$

Коефіцієнт визначається за виразом: $\alpha = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot k_5 \cdot k_6 \cdot k_7$

Таблиця 1 – Фактори k для визначення несучої здатності болтового з'єднання

Діаметр болта $k_1 = \sqrt{(16/d)}$	Товщина сталі $k_2 = (1,9 + 0,2t)$ для $t \leq 3\text{мм}$ $= 2,5$ для $3 < t \leq 8\text{мм}$
Механічні властивості матеріалу $k_3 = \sqrt{(390 / \sigma_{ult.design})}$, де $\sigma_{ult.design}$ – це розрахункове значення граничної міцності сталі	Діаметр шайб Для нормального діаметру шайб $k_4 = 1$ Для збільшеного діаметру: $k_4 = 1,15$ для $t \leq 2\text{мм}$ $k_4 = 1,05$ для $2 < t \leq 3\text{мм}$ $k_4 = 1,0$ для $t > 3\text{мм}$
Кількість та розташування шайб $k_5 = 1$, коли використовують 2 шайби $k_5 = 0,8$, коли використовують лише одна шайба $k_5 = 0,7$, коли не використовується жодної шайби	Відстань до краю по лінії дії сили $k_6 =$ менше з $e/2,5d$ та 1, з мінімальним значенням $e/d = 1,5$
Площина зрізу припадає на циліндричну частину болта чи на різьбу болта $k_7 = 1,15$, площа зрізу припадає на циліндричної частини болта. $k_7 = 1,0$ у іншому випадку.	

Для випробування на зріз статичним навантаженням підготовлені зразки являють собою з'єднання внапуск (рис. 1, а), які складаються з двох пластин із оцинкованої сталі товщиною $t=0.75$ мм, 1.0 мм, 1.5 мм, 2.0 мм, і шириною 50 мм. У якості кріпильних елементів в експерименті використовуються болти М10 класом міцності 5.8 з шайбами діаметром 20 мм і 30 мм. Кожен зразок позначений маркуванням з трьох сегментів з метою визначення типу кріплення (В-болт) і серії випробувань, товщини пластин, що скріплюються, порядкового номера зразка (рис. 1, б).

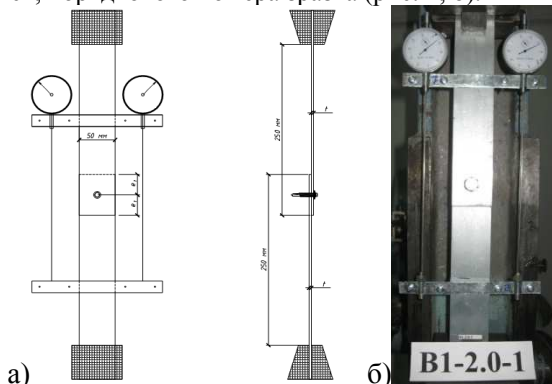


Рисунок 1. Експериментальна установка: а) ескіз, б) натурный зразок

Результати експерименту, а також порівняння з розрахунками за нормативними документами, що описані вище, представлені в табл. 2. У ході експерименту випробувані зразки руйнувалися по трьом типам відмови для болтів, такими як: відмова в результаті втрати міцності при зминанні (I) (рис. 2, а), руйнування з'єднання в результаті зрізу кріпильного елемента (II) (рис. 2, б), а також протягування та висмикування болта крізь сталеву пластину(III) (рис. 2, в).

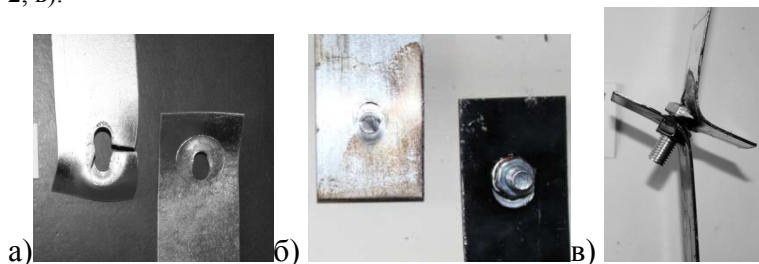


Рисунок 2. Види відмов: а) втрата міцності при зминанні; б) зріз болта; в) протягування болта крізь метал.

Таблиця 2 – Результати випробування зразків з'єднань на зріз

Серія зразок	Результати випробувань Середнє значення		EN 1993-1-3		AISI		BS		Метод Zadanfarrokh	Типи відмов
			$F_{b,Rd}$, кН	$F_{n,Rd}$, кН	P_n , кН	P_n , кН	P_{bs} , кН	P_n , кН	P_{ds} кН	
В1-2.0	шайби d=20мм	21,0	19,9	25,17	24,0	21,4	20,4	21,4	23,0	II
	шайби d=30мм	21,0							26,4	II
	без шайб	19,1							18,0	15,3
В1-1.5	шайби d=20мм	14,8	15	17,98	18,0	16,1	13,95	16,1	16,5	I
	шайби d=30мм	19,54							19,0	I
	без шайб	12,75							13,5	11,5
В1-1.0	шайби d=20мм	9,0	8,73	11,75	11,4	10,3	7,98	10,3	10,2	I
	шайби d=30мм	12,64							11,8	I
	без шайб	8,0							8,55	7,3
В1-0.75	шайби d=20мм	6,97	4,93	7,75	6,6	6,5	4,92	6,5	7,0	I
	шайби d=30мм	8,59							8,0	I
	без шайб	5,0							4,95	4,71

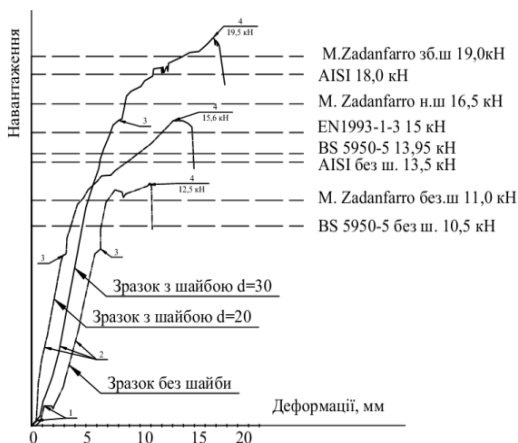


Рисунок 3. Графік роботи з'єднань на прикладі зразка В1-1.5 у порівнянні зі середніми значеннями теоретичних розрахунків (таб.2).

1-початок роботи, зміщення болта в отворі; 2-пружна стадія роботи з'єднання; 3-перехід до пластичної стадії роботи; 4-пік кривої, максимальне навантаження, втрата несучої здатності.

Висновок. У ході досліджень були підтверджені характерні ознаки відмов, які описані в нормативі [6]. Типові ознаки відмови в результаті втрати міцності при зминанні: видовження отворів; зминання матеріалу перед болтом; закручування з'єднання з площини листа; утворення поперечної тріщини в листі, суміжному з кріпленням; утворення шийки в листі; зріз кріпильного елемента і видовження отворів; нахил і висмикування кріпильного елемента та закручування листа з площини із вириванням кріплення з одного із листів.

Результати випробувань показали, що при роботі з'єднання внапуск використання шайби діаметром 30 мм, замість шайби діаметром 20 мм, веде до підвищення несучої здатності до 40%. Ця пояснюється тим, що у тонких листах, додатковий діаметр шайби забезпечує додаткову протидію нахилу болта, тим самим, поліпшує несучу здатність. Коли товщина листа зростає до того ж порядку, що і шайби, ефект защемлення від шайби нівелюється, зменшуючи вплив на несучу здатність. Таким чином, якщо не використовується шайба під головку та гайку болта, то їх гострі кути будуть зминати та поривати лист і тим самим прискорювати відмову з'єднання на більш ранній стадії.

Список літератури:

1. EN 1993-1-3:2006. Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1-3: General rules. Supplementary rules for cold-formed members and sheeting. – Brussels : CEN, 2006. – 134 p.
2. AISI-S100. North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members – Washington : American Iron and Steel Institute, 2007. – 149 p.
3. BS 5950-5:1998 Structural use of steelwork in building – Part 5. Code of practice for design of cold formed thin gauge sections. – BSI ,1998. – 75 p.
4. Zadanfarrokh, F. Analysis and design of bolted connections in cold formed steel members: Ph.D. Thesis, – England. University of Salford, 1991. – 394p.
5. Schuster R. M., LaBoube R. A., Wallace James A. Calibrations of bolted cold-formed steel connections in bearing (with and without washers). Research report RP01-5. – Washington: AISI, 2001. – 44 p.
6. ECCS TC7 TWG 7.10 The testing of connections with mechanical fasteners in steel sheeting and sections, European recommendations for steel construction. ECCS publication no.124. Portugal.2009.