

УДК 624.014.078.4

Аналіз результатів дослідження болтових та гвинтових з'єднань, розрахунк часткового коефіцієнта надійності

Шумейко К.О., Семко В.О., к.т.н.

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка,
Україна

Анотація. У роботі представлені результати експериментальних досліджень з'єднань холодноформованих тонкостінних конструкцій, проведено аналіз результатів експерименту, згідно з якими наведено результати розрахунку часткового коефіцієнту надійності γ_m .

Аннотация. В работе представлены результаты экспериментальных исследований соединений холодноформованных тонкостенных конструкций, проведен анализ результатов эксперимента, в соответствии с которыми приведены результаты расчета частичного коэффициента надежности γ_m .

Abstract. The paper presents the results of experimental investigation on connections of cold-formed thin-walled steel structures. On the basis of experimental analysis the results of partial safety factor γ_m determination are derived.

Ключові слова: з'єднання, коефіцієнт надійності.

Постановка проблеми у загальному вигляді. Поряд із розвитком металевих конструкцій з гарячекатаних профілів і листового прокату в Україні останнім часом щодалі більше використовуються тонкостінні холодноформовані сталеві профілі (ТХСП) як несучі та огорожувальні конструкції. Використання цих профілів у несучих конструкціях має ряд особливостей, пов'язаних із тонкостінністю і формою перерізу, роботою з'єднань, корозійною стійкістю та іншими факторами. Міцність і жорсткість з'єднання є пріоритетними при проектуванні та розрахунку вузлів у тонкостінних холодноформованих профілях. Основним типом відмови вузлів конструкцій є зминання. Особливості та специфіка роботи цих з'єднань потребує детального дослідження.

Аналіз останніх досліджень та виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми. Дослідженням та розрахунком з'єднань холодноформованих профілів займаються дослідники різних країн з 40-х років ХХ століття. Найбільше досліджень щодо роботи та поведінки з'єднань, а також їх нормування проведено у США, Канаді та країнах Західної Європи [9, 10, 13], у Росії цими питаннями займаються Катранов І. Г. [4], Кунін Ю. С. [3], Айрумян Е. Л. [1], Коротких А. В. [5], Кретинін А. М. [6]. Важливим питанням, що виникає перед конструктором-

проектувальником, є вибір оптимального типу кріпильних елементів у з'єднаннях та їх розрахунок. Виникає проблема нормування при проектуванні даних конструкцій. Як результат впровадження зарубіжного досвіду розроблення нормативних документів, в Україні прийняті Єврокоди для розрахунку і проектування конструкцій з ТХСП.

Метою даної статті є наведення результатів експериментально-теоретичного дослідження болтових і гвинтових з'єднань ТХСП, використовуючи результати експерименту, представлення результатів оцінки часткового коефіцієнта надійності за матеріалом γ_M .

Виклад основного матеріалу. Метою проведення експериментальних досліджень у рамках даної роботи є отримання даних щодо несучої здатності, деформативності, особливості роботи і відмови з'єднань елементів ТХСП на болтах і самосвердлувальних самонарізних гвинтах (ССГ). У дослідженнях використовувалися зразки з наступними характеристиками: товщини зразків для випробування прийняті, мм: 0,75, 1,0, 1,5, 2,0, як основні товщини, що застосовуються для виготовлення холодноформованих профілів; розміри зразків приймалися згідно з рекомендаціями ECCS TC7 TWG 7.10 [11], ширина пластин – 50 мм, довжина – 300 мм. В якості досліджуваних кріпильних елементів були прийняті болти М10 класів міцності 5.8 і 8.8, і ССГ – $d=5,5$ мм; зазначені види кріпильних елементів отримали найбільш широке застосування в легких сталевих тонкостінних конструкціях. Ширина пластин підібрана таким чином, щоб руйнування зразків відбувалося унаслідок зминання базового матеріалу або по зрізу кріпильного елемента, тим самим уникаючи руйнування по перерізу нетто і виколю крайової частині листа з'єднувальних елементів.

Програма експерименту включала випробування двох серій зразків, наведених у табл. 1, за ескізами зразків відповідно до серій випробувань, зображених на рис. 1. Деформації видовження замірялися за допомогою двох індикаторів годинникового типу з ціною поділки 0,01 мм, встановлених з двох боків досліджуваного зразка. Деформації визначалися як середнє значення між показниками за двома індикаторами. Навантаження подавалося ступенями, з доведенням зразка до руйнування.

Таблиця 1

Серії зразків	
Болтові з'єднання (В)	Гвинтові з'єднання (S)
1 серія («В1», «В1Ш», «S1»)	
Однболтові з'єднання елементів різних товщин з використанням шайб $d_{ш} = 20$ мм і $d_{ш} = 30$ мм, без використання шайб. Болти М10, клас міцності 5.8	Однорядові з'єднання елементів різних товщин з використанням: ССГ $d = 5,5$ мм
2 серія («В2», «S2»)	
Однболтові з'єднання елементів різних товщин з використанням шайб $d_{ш} = 20$ мм і $d_{ш} = 30$ мм, без використання шайб. Болти М10, клас міцності 8.8	Двоярядові з'єднання елементів різних товщин з використанням: ССГ $d = 5,5$ мм (горизонтальне і вертикальне розташування гвинтів у відповідності до прикладеного навантаження)

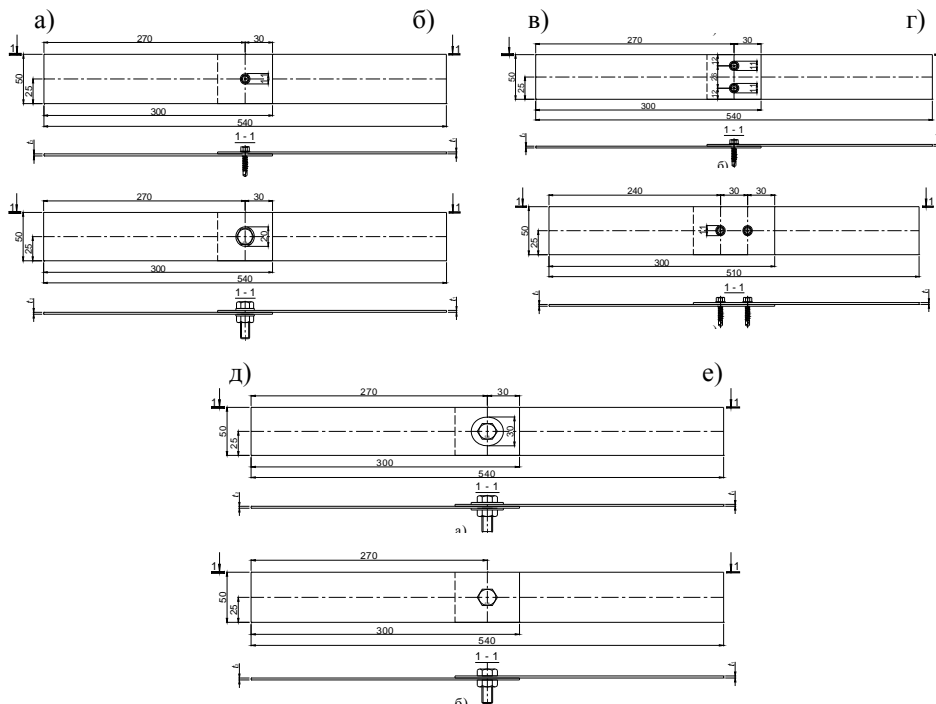


Рис. 1. Ескізи зразків: а) гвинтове з'єднання серії «S1»; б) болтове з'єднання з шайбами $d_{ш}=20$ мм, серій «В1» та «В2»; в) двоярядові з'єднань для випробування з паралельним розташуванням ССГ серії «S2»; г) двоярядові з'єднань гвинти, розташовані перпендикулярно, серії «S2»; д) болтові з'єднань з шайбами $d_{ш}=30$ мм, серій «В1Ш» та «В2»; е) болтові з'єднань без шайб, серій «В1» та «В2»

Послідовно розглянемо роботу з'єднань під навантаженням у випадку відмови при зрізі кріплення та зминанні матеріалу. На початковій стадії прикладення навантаження до зразків спостерігається ділянка пружної роботи для гвинтових з'єднань, а для болтових з'єднань спостерігається зона вибору зазору, що утворений різницею діаметрів болта і отвору, виконаного в базовому матеріалі, після чого виникає пружна робота болтового з'єднання. При збільшенні навантаження відбувається стрімкий перехід у стадію пружно-пластичних деформацій, при відмові внаслідок зминання виникає ділянка текучості, що переходить у стадію самозміцнення, зминання сталі, досягнення межі міцності з'єднання і остаточної відмови з'єднання. У разі руйнування за кріпильним елементом чітко вираженої ділянки текучості практично не спостерігається, пружна стадія переходить у стадію самозміцнення з подальшим досягненням межі міцності кріплення. Це відбувається в тому випадку, коли матеріал з'єднувальних елементів значно міцніший, ніж матеріал кріпильного елемента. Відмова з'єднання при зминанні супроводжується значними пластичними деформаціями, а відмова при зрізі кріпильних елементів носить крихкий характер.

Згідно з результатами аналізування випробування за серіями з'ясовано, що у зразках серії «S1», «B1» і «B2» товщиною 0,75–1,5 мм відмова наступала в результаті зминання матеріалу. Відмови внаслідок зрізу кріпильних елементів відбувалися у зразках товщиною 2 мм для всіх серій випробувань.

Порівнюючи результати випробувань зразків серії «B1» і «B1ш» (рис. 2 а, б, в, г), зроблено висновок, що використання шайб діаметром 30 мм дає збільшення несучої здатності, в порівнянні з шайбами діаметром 20 мм, залежно від товщини з'єднувальних елементів, відповідно: при $t = 0,75$ мм на 20 % ; при $t = 1,0$ мм на 25 %; при $t = 1,5$ мм на 19%. Оскільки збільшений діаметр шайби не дає вільній частині з'єднувальних елементів зминатися і забезпечує додаткове закріплення від нахилу болта, він тим самим збільшує несучу здатність. У той же час, коли товщина листа зростає до того ж порядку, що і шайба, додатковий вплив шайби зникає, що підтверджується для зразків $t = 2,0$ мм (рис. 2, а), тобто збільшення несучої здатності не відбувалося.

У зразках без шайб відбулося зменшення несучої здатності в середньому на 22–25 % порівняно із зразками з шайбами діаметром 20 мм. Результати досліджень для зразків серії «B2» з попереднім натягом болтів показали, що характер роботи та деформаційні характеристики з'єднань із шайбами діаметром 20 мм і з'єднань без шайб при використанні болтів класу міцності 8.8 майже однакові. Але у зразках товщиною 2,0 мм (рис. 2, а) деформативність з'єднань майже однакова для всіх трьох варіантів

з'єднання. Проводячи порівняння деформаційної поведінки болтових з'єднань з болтами класів міцності 5.8 і 8.8 із попереднім натягом, можна сказати, що попередній натяг болтів збільшує ділянку пружної роботи з'єднання та підвищує несучу здатність з'єднання, особливо для зразків товщиною до 1 мм включно.

Результати випробування серії «S2» (рис 2, а, б, в, г) при різних варіантах розташування гвинтів відносно лінії дії прикладеного навантаження показали, що відмінність полягає в деформативності з'єднань, оскільки при паралельному розташуванні гвинтів у напрямку до прикладеного навантаження, через послідовність включення в роботу гвинтів, деформативність даних зразків нижча при дії однакового навантаження в порівнянні з перпендикулярним розташуванням гвинтів.

Керуючись рекомендаціями з планування та оброблення даних експерименту за нормативними документами [11, 12], результати усереднених показників експериментальних даних «навантаження/деформації» по серіях випробуваних зразків на рисунку 2 порівнюються з теоретично розрахованою несучою здатністю при змінанні $F_{b, Rd}$ за [3]. Відповідно, на рисунку 2 нанесені теоретичні значення несучої здатності болтового з'єднання – $F_{b, Rd}^{bolt}$ і гвинтового з'єднання – $F_{b, Rd}^{screw}$, при коефіцієнті надійності за матеріалом $\gamma_{M2} = 1,0$, а також теоретичне значення розрахункових опорів з коефіцієнтом надійності за матеріалом $\gamma_{M2} = 1,25$ – $F_{b, Rd}^{bolt\ 1,25}$, $F_{b, Rd}^{screw\ 1,25}$ відповідно до рекомендацій нормативного документа [3]. Як видно на графіках «навантаження/деформації» (рис. 2 б, в, г), для болтових з'єднань коефіцієнт надійності 1,25 не забезпечує необхідний рівень несучої здатності при граничній деформації 3 мм, яка допускається для з'єднань нормативним документом [11]. У розрахунках коефіцієнта надійності γ_M не враховуються зразки товщиною 2 мм як такі, що мали відмови при зрізі кріпильних елементів.

Для оцінки необхідного рівня часткового коефіцієнта надійності за матеріалом γ_M проведено розрахунок за алгоритмом, розробленим Frans Vijaard [9] для EN 1990 [2]. Його методика використовує метод граничних станів, що дозволяє враховувати специфіку роботи різних конструкцій і фактичну невизначеність розрахункової моделі та властивостей матеріалів, а також деякі інші обставини, що характеризують роботу різних конструкцій, рис. 3.

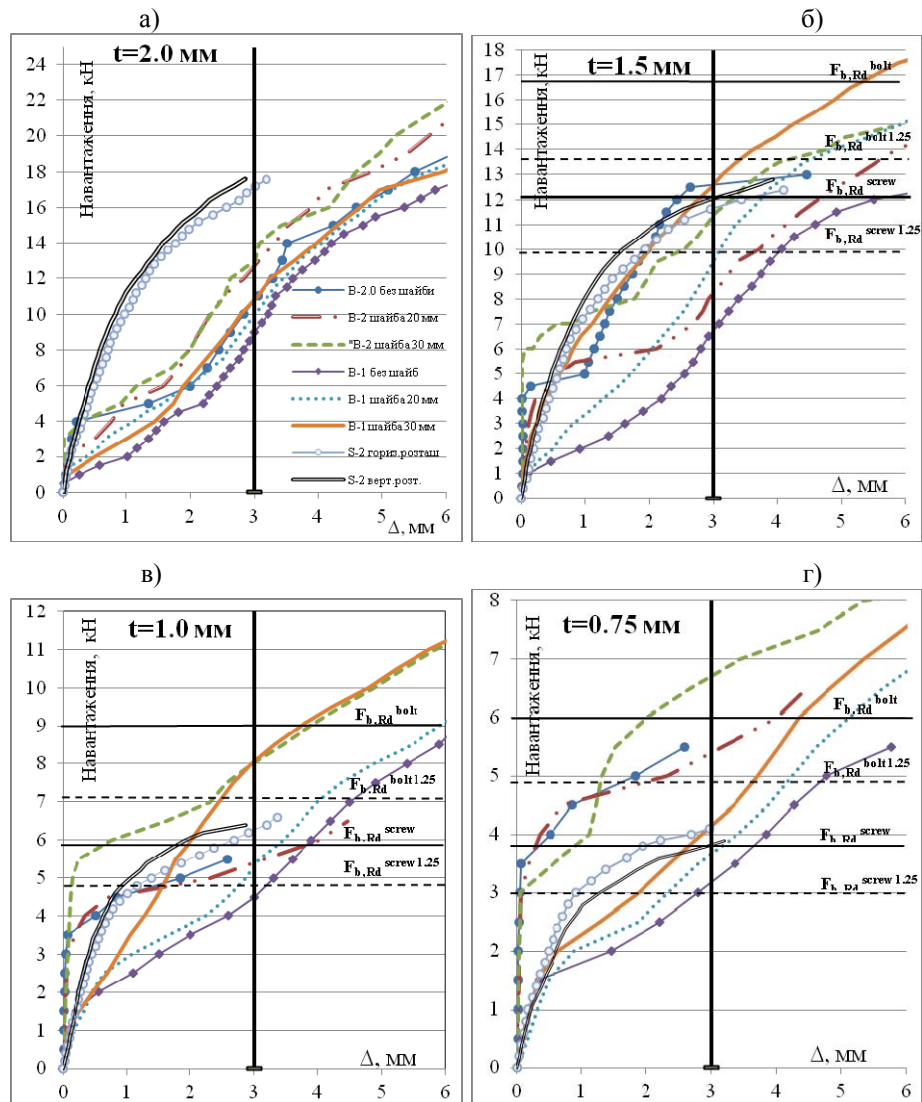


Рис. 2. Діаграми «Навантаження/деформації» середніх значень за серіями, порівняння результатів випробувань за серіями та теоретичним розрахунком:
а) зразки товщиною 2,0 мм; б) зразки товщиною 1,5 мм;
в) зразки товщиною 1,0 мм; г) зразки товщиною 0,75 мм.

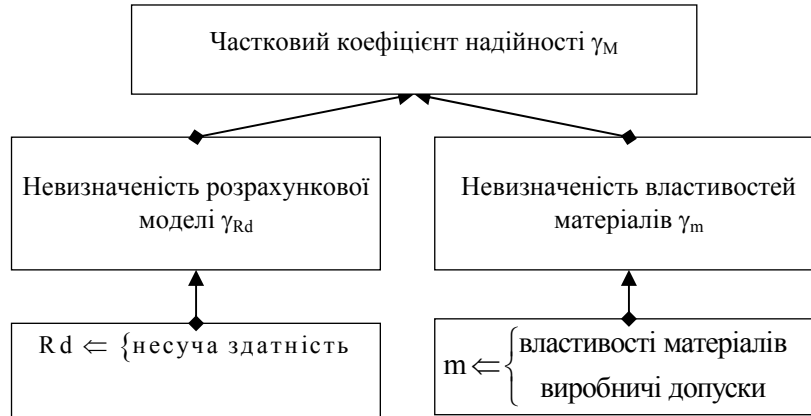


Рис. 3. Фактори впливу на частковий коефіцієнт надійності за матеріалом

Розрахунковий опір кріплень під статичним навантаженням визначається як характеристичне значення опору, поділене на відповідний коефіцієнт безпеки:

$$r_d = \frac{r_k}{\gamma_M}, \quad (1)$$

де r_d – розрахункове значення; r_k – характеристичне значення опору, $r_k = r_m - k \cdot s$; k – коефіцієнт, що залежить від обсягу вибірки, величини ймовірності (квантилі) і наявності або відсутності даних про величину апіорного стандартного відхилення (слід використовувати значення k з таблиці D1 EN 1990 [2]; s – стандартне відхилення; r_m – опір, визначений на основі середніх значень масиву \underline{X} базисних величин.

У свою чергу, частковий коефіцієнт надійності за матеріалом визначається з залежності (1):

$$\gamma_M = \frac{R_k}{R_d}. \quad (2)$$

Розрахункова модель для теоретичної величини опору r_t розглянутого елемента конструкції представлена функцією опору:

$$r_t = g_r(\underline{X}) = g_r(\alpha, t, d, f_u), \quad (3)$$

де α, t, d, f_u – базисні величини (\underline{X}), відповідно: коефіцієнт зминання, товщина з'єднувальних елементів і тимчасовий опір сталі. Функція опору повинна охоплювати всі базові перемінні \underline{X} , що впливають на опір

відповідного граничного стану. Фактичні виміряні параметри підставляються у функцію опору для визначення теоретичних значень, які потім порівнюють з експериментальними значеннями. Алгоритм розрахунку γ_M наводиться у додатку D [2].

Для обґрунтування значення коефіцієнта надійності роботи гвинтових і болтових з'єднань були використані результати власних досліджень, проведених в ПолтНТУ [7, 8], а також результати зарубіжних дослідників [10, 13]. Результати випробувань і статистичної обробки отриманих результатів свідчать про те, що необхідно підвищити значення коефіцієнта надійності γ_M для з'єднань на болтах до значення 1,35. Також обробка результатів показала, що для гвинтів достатньо значення коефіцієнта надійності $\gamma_M = 1,25$.

Висновки

У Єврокодах залишаються відкритими пункти для внесення змін до національного додатка EN 1993-1-3 [12], один з них – це нормування коефіцієнта надійності за матеріалом γ_M , при цьому слід відзначити, що за базовий рівень значення прийнято 1,25. Результати випробувань і статистичної обробки отриманих результатів свідчать про те, що необхідно підвищити значення коефіцієнта надійності γ_M для з'єднань на болтах при розрахунку за критичною формою відмови внаслідок зминання, як основної для з'єднань у тонкостінних холодноформованих конструкціях, до значення $\gamma_M = 1,35$.

Література

- [1] Айрумян Э. Л. Вытяжные заклепки или самонарезающие винты / Э. Л. Айрумян, С. В. Ганичев, С. В. Камынин // Монтажные и специальные работы в строительстве. – 2009. – №3. – С. 2–8.
- [2] Настанова. Основи проектування конструкцій : ДСТУ-Н Б В.1.2-13:2008 (EN 1990:2002, IDN). – Офіц. вид. – К. : Мінрегіонбуд України, 2009. –146 с. – (Система надійності та безпеки у будівництві. Національний стандарт України).
- [3] Катранов И. Г. К вопросу расчета винтовых соединений ЛСТК на растяжение / И. Г. Катранов, Ю. С. Кунин // Промышленное и гражданское строительство. – 2011. – №3. – С. 9–11.
- [4] Катранов И. Г. Несущая способность винтовых и заклепочный соединений стальных тонкостенных конструкций : дис. ... канд. техн. наук : спец. 05,23,01 / Иван Георгиевич Катранов. – М., 2011. – 202 с.

- [5] Коротких А. В. Фермы из тонкостенных оцинкованных профилей с перекрестной решеткой на сдвигустойчивых соединениях : автореф... дис. канд. техн. наук : спец. 05.23.01 / А. В Коротких. – Красноярск, 2012. – 23 с.
- [6] Кретинин А. Н. Тонкостенные балки из гнутых оцинкованных профилей: составных поясов коробчатого сечения и гофрированных стенок : автореф. ... дис. канд. техн. наук : спец. 05.23.01 / А. Н. Кретинин. – Новосибирск, 2008. – 24 с.
- [7] Лебединський С. П. Експериментальні дослідження з'єднань листових сталевих тонкостінних конструкцій / К. О. Шумейко, В. О. Семко, О. В. Семко // Тези 65-ї наукової конференції професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів університету. Том 1. (Полтава, 22 квітня по 15 травня 2013 р.) – ПолтНТУ, 2013. – С. 97–99.
- [8] Семко О. В. Експериментальні дослідження роботи болтових з'єднань у легких сталевих тонкостінних конструкціях / К. О. Шумейко, О. В. Семко // Современные строительные конструкции из металла и древесины : сборник научных трудов ОГАСА. – Одесса, ООО «Внешрекламсервис», 2013. – №17 – С. 218–223.
- [9] Bijlaard F. Eurocode 3: Design of steel structures – Present status and further developments / Frans Bijlaard // Steel Construction. – 2008. – № 1. Issue 1. – P. 16–23.
- [10] Chong K. P. Light-Gage Steel Bolted Connections without Washers / K. P. Chong, R. B. Matlock // Journal of the Structural Division, ASCE. – 1974. – № 101. – P. 1381–1391.
- [11] ECCS TC7 TWG 7.10. Connections in cold-formed steel structures. The testing of connections with mechanical fasteners in steel sheeting and sections / European recommendations for steel construction // ECCS publication. – No.124. – Portugal, 2009.
- [12] Eurocode 3: Design of steel structures – Part1-3: General rules – Supplementary rules for cold-formed members and sheeting : EN 1993-1-3:2006. – Brussels : CEN–CENELEC Management Centre, 2006.– 127 p. – (European Standard).
- [13] Zhang J. Structural behavior of washerless bolted connections in shear / J. Zhang // McGill University : book of thesis. – Canada, 2002. – 315 p.

Надійшла до редколегії 21.11.2014 р.