

УДК 624.012.454

**ЗАЛЕЖНІСТЬ МІЖ ВЕЛИЧИНОЮ ЗАГОРІВ БОЛТОВИХ
ОТВОРІВ ТА ПОКАЗНИКАМИ МІЦНОСТІ БОЛТОВОГО
З'ЄДНАННЯ КОМПОЗИТНИХ ПРОФІЛІВ (GFRP)**

**DEPENDENCE BETWEEN CLEARING HOLES'
DIMENSION AND TOUGHNESS INDECES OF BOLT JOINTS
FOR GFRP COMPOSITE CROSS-SECTIONS**

Валовой О.І., к.т.н., проф., Єрьоменко О.Ю., к.т.н., доц., Валовой М.О., к.т.н., доц., Афанасьєв В.В., к.т.н., доц., Герб П.І., к.т.н., доц., Кобзар С.С., студент (Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг)

Valovoi O.I., PhD, Prof., Eremenko A.U., PhD, Assoc. Prof., Valovoi M.O., PhD, Assoc. Prof., Afanasev V.V., PhD, Assoc. Prof., Gerb P.I., PhD, Assoc. Prof., Kobzar S.S., Stud. (Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih)

Наведено узагальнені результати аналізу існуючих експериментальних даних впливу загорів болтових отворів на несучу здатність болтових з'єднань композитних профілів (GFRP).

The summarized analyses results are set out for the existing experimental data of the clearing holes' influence on the bolt joints' bearing ability of composite cross-sections (GFRP).

Corrosion of metal and metal items is the main reason of premature structural failure and ability of a structure to perform satisfactory. The solution is in the using of materials which are inert to moisture effect or other causing corrosion factors. At present in Ukraine there are no specification documents to bring under regulation the using of composite cross-sections and the ways of their combination in the construction.

Among the types of composite materials joints are the following: solid (glue, molding, welded); mechanical (bolt, rivet, needle, cross-linking); combined (clay mechanical).

Bolt joints are the most durable. They provide maintainability of the item. Bolt joints are widely used in construction.

The conducted research allows distinguishing the following basic types of the destruction of the bolt joints of composites, which are exposed to tensile / compressive forces:

- destruction of the weakened material of the composite during stretching;
- destruction due to the cutting of composite material;
- punching of the composite material with a bolt;
- destruction due to cracking with stretching;
- destruction due to jamming;
- destruction of a bolt.

It is stated that destruction due to jamming is more acceptable because it is not of a sudden nature and allows us to take measures to prevent possible consequences. The realization of the latter is possible, taking into account a number of parameters of the connected elements.

One such parameter is the change in the density of the size for bolt holes. An optimally determined gap width between the bolt and the connecting material allows achieving ductile fracture of the joint, which is more acceptable than fragile, sudden destruction.

The fracture mode and specifics of the single-bolted joint's on-load operation of GFRP plates are studied. It is stated that the dimension of the clearing holes from 0 mm to 3 mm does not affect on the final toughness of joint.

At the same time, the clearing of the hole enlarging decreases the stress at the beginning of fracture by 24%. It is defined that optimal dimension of the clearing hole to provide adequate toughness and plastic fracture mode is the hole of opening distance equal to 1-2 mm.

Ключові слова: композитний профіль, болтове з'єднання, міцність, зсув, зминання.

Keywords: FRP-Profiles, bolted joint, strength, shear, bearing.

Вступ. Корозія металу та виробів з нього є основною причиною передчасної втрати несучої здатності та придатності до нормальної експлуатації конструкцій. Використання матеріалів, інертних по відношенню до впливу вологи чи інших чинників, які викликають корозію, є шляхом вирішення даної проблеми. До таких матеріалів відносять композитні профілі, які в нашій країні представлені переважно склопластиковими профілями (GFRP). Використання

останніх у світі збільшується переважаючими темпами [1]. В той же час актуальним залишається питання розробки надійних способів поєднання композитних профілів між собою, створення бази типових рішень, щодо означеної проблематики. На теперішній час у нашій країні відсутні нормативні документи, які б регламентували використання композитних профілів в будівництві та способів їх поєднання між собою.

Аналіз останніх досліджень. GFRP є найбільш розповсюдженою формою пластикових композитних профілів. Останні складаються зі склоровінга та композитної матриці, які поєднуються в готовий виріб за допомогою процесу пултрузії. Типова структура композитного профілю показана на рис. 1.

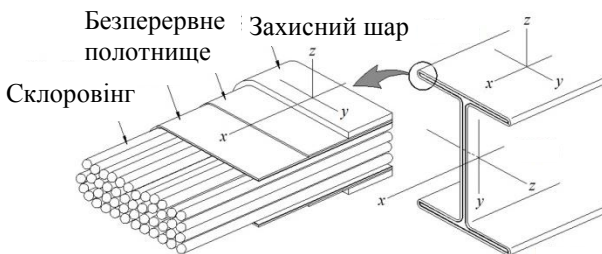


Рис. 1. Структура композитного профілю

Проведені дослідження [2, 3] дозволяють виділити наступні переваги композитних профілів порівняно з металевими: високі питомі міцність та жорсткість, підвищені показники витривалості, корозійна стійкість, низька теплопровідність, немагнітність, низькі витрати на утримання.

Розрізняють такі типи з'єднань композитних матеріалів між собою [4, 5]:

- суцільні (клеєві, формовочні, зварні);
- механічні (болтові, заклепкові, голчасті, зшивні);
- комбіновані (клейомеханічні).

Болтові з'єднання вирізняються найбільшою міцністю. Вони забезпечують ремонтпридатність виробу та отримали найбільше розповсюдження в будівництві.

Проведені раніше дослідження [6-8] дозволяють виділити такі основні види руйнувань болтового з'єднання композитів, які зазнають впливу розтягуючих/стискачих зусиль:

1. Руйнування за ослабленим матеріалом композиту при розтяганні (рис. 2, а);
2. Руйнування внаслідок зрізу матеріалу композиту (рис. 2, б);
3. Продавлювання матеріалу композита болтом (рис. 2, в);
4. Руйнування від сколювання з розтяганням (рис. 2, г);
5. Руйнування від зминання (рис. 2, д);
6. Руйнування болта (рис. 2, е).

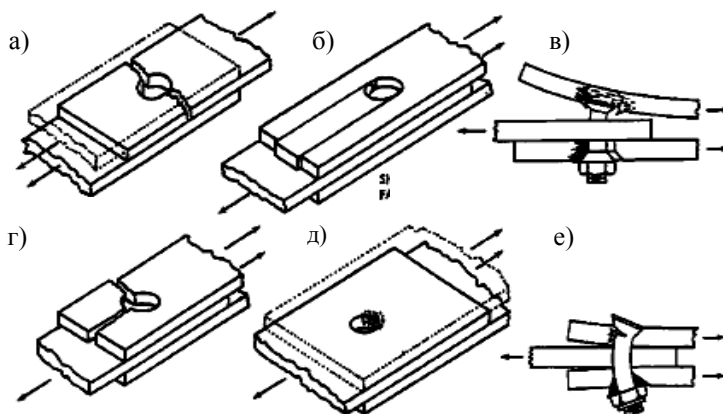


Рис. 2. Схеми руйнування болтових з'єднань композитів GFRP [6]

Встановлено, що руйнування внаслідок зминання є більш прийнятним, оскільки не носить раптового характеру і дає можливість вжити заходів з упередження можливих наслідків. Тобто, проектувати болтове з'єднання потрібно таким чином, щоб руйнування відбулося за схемами, наведеними на рис. 2, б чи 2, д. Досягнення останнього можливе, якщо враховувати ряд параметрів елементів, що з'єднуються, таких як геометричні розміри елементів, відстані між болтами, відстані від середини отвору до зовнішніх граней, зусилля обтиску, що створюються болтом, послідовність розміщення болтів, розмір отворів [6-14].

Серед перелічених факторів зміна щільності розміру отворів під болти може призводити до крихкого руйнування композиту при щільному розташуванні болта або до надмірного рухливого

з'єднання при великих отворах. Оптимально визначена величина зазору між болтом і з'єднувальним матеріалом дозволяє досягти пластичного руйнування з'єднання, що є більш прийнятним, ніж крихке, раптове руйнування.

Постановка мети та задач досліджень. Проведений у відкритих джерелах інформації пошук вітчизняних експериментальних даних чи нормативної літератури, щодо впливу діаметрів отворів болтового з'єднання композитів на характер їх руйнування, не дав результатів. Визначення оптимального співвідношення даних характеристик є актуальним питанням розвитку методів розрахунку виробів із композитних профілів.

Методика досліджень. Зважаючи на викладене вище, було проведено узагальнення та аналіз експериментальних відомостей закордонних дослідників [9-14] щодо впливу співвідношення діаметру болта та діаметру отвору на характер роботи та руйнування одноболтового з'єднання композитів.

Результати досліджень. Надалі розглядаються результати досліджень, отримані в роботі [9], як більш репрезентативні. В даній роботі аналізу підлягали одноболтові з'єднання окремих прямокутних пластин склопластика (GFRP). Геометрію з'єднувальних елементів та відстані від отворів до їх зовнішніх граней було підібрано таким чином, щоб виключити можливість руйнування за ослабленим перерізом (рис. 2, а) чи сколювання композиту (рис. 2, г). Було використано металеві болти, щоб уникнути можливості руйнування з'єднання від зрізу болта. Змінним фактором виступив діаметр отвору для розташування болта, в той час як діаметр болта залишався незмінним. Різниця між отвором і діаметром болта, залежно від серії, становила 0-3мм і змінювалася з кроком 0,5мм. Маркування зразків за серіями та відповідні їм характеристики зразків наведено в таблиці 1.

Зразки випробовувалися на універсальній випробувальній машині розтягуючим осьовим зусиллям. Поєднання пластин GFRP було виконано таким чином, щоб навантаження діяло вздовж волокон.

Особливості роботи під навантаженням та характер руйнування зразків відображав специфічні властивості склопластиків (рис. 3).

Таблиця 1

Характеристики дослідних зразків [9]

Маркування зразків	Геометричні характеристики				Кількість зразків
	Товщина GFRP пластины t , мм	Діаметр болта d_b , мм	Діаметр отвору d_o , мм	Δd , мм	
A-C0.0	10	10	10	0	3
A-C0.5			10.5	0.5	3
A-C1.0			11	1.0	3
A-C1.5			11.5	1.5	3
A-C2.0			12	2.0	3
A-C2.5			12.5	2.5	3
A-C3.0			13	3.0	3

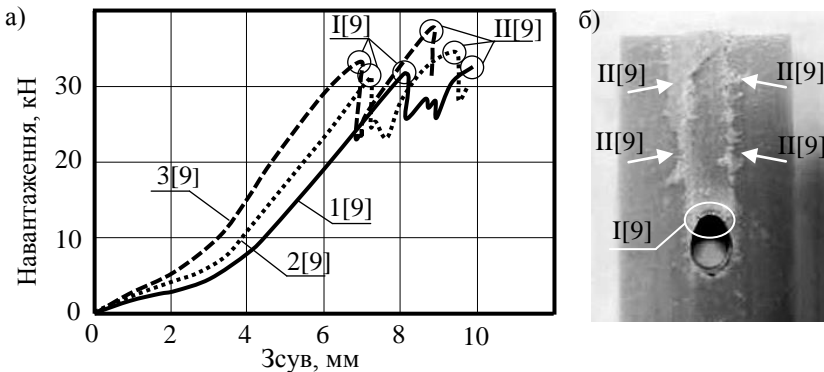


Рис. 3. Характер роботи зразків під навантаженням 9]: а) – залежність навантаження-зсув дослідних зразків; б) – загальний вигляд зруйнованого зразка; I – початок руйнування від локального змінання; II - остаточне руйнування від зсуву (зрізу); 1 - A-C1.0; 2 - A-C2.0; 3 - A-C3.0

Як видно з рис. 3, навантаження початкового рівня викликали деформації з'єднання, які наростали за лінійною залежністю. Нелінійність на початку роботи пояснюється початковими деформаціями на величину, яка відповідає проміжку між поверхнею болта та отвором. Подальше збільшення навантаження призводило до змінання частини матеріалу GFRP під боковою поверхнею болта

(ділянка I, рис. 3). Даний процес відбувається внаслідок роздроблення композиту матриці та проминання склоровінгу, що відповідає типу руйнування, наведеному на рис. 2, д. Цьому етапу роботи зразків відповідає низхідна крива залежності навантаження-зсув (рис. 3,а). Надалі відбувається незначне зростання несучої здатності, пов'язане з перерозподілом зусиль у з'єднанні (висхідна крива між ділянками I та II, рис. 3,а). При цьому формуються поздовжні тріщини, які беруть початок біля бокових граней болта, простягаючись до кінця пластини в напрямку дії навантаження (рис. 3,б), що відповідає режиму руйнування, наведеному на рис. 2,б. Зростання навантаження призводить до руйнування внаслідок зсуву (зрізу) з втратою несучої здатності з'єднання (ділянка II, рис. 3). Схожий характер руйнування болтових з'єднань односпрямованих композитів відмічають і інші дослідники [8, 12, 14].

У роботі [9] запропоновано етап роботи з'єднання, який відповідає ділянці I, називати місцевою втратою несучої здатності, а ділянці II – структурним (остаточним) руйнуванням з'єднання.

У таблиці 2 наведено значення зусиль, які відповідають місцевій втраті несучої здатності дослідних зразків та їх структурному руйнуванню.

Таблиця 2

Показники несучої здатності болтового з'єднання GFRP [9]

Серія зразків	Навантаження, яке відповідає місцевій втраті несучої здатності, кН	Навантаження, яке відповідає структурному руйнуванню, кН
A-C0.0	32.25	35.97
A-C0.5	28.59	38.62
A-C1.0	29.00	38.56
A-C1.5	29.81	35.44
A-C2.0	29.64	35.95
A-C2.5	25.37	38.65
A-C3.0	24.63	37.19

Аналіз таблиці 2 вказує на те, що зміна діаметру отвору болтового з'єднання GFRP не призводить до зменшення загальної міцності з'єднання. Так, величини зовнішнього навантаження, при яких відбувалося структурне руйнування зразків, відрізняються не

більше, ніж на 7%. Крім того, відсутня чітка залежність зміни величини руйнівного навантаження від величини проміжку між болтом і боковою поверхнею матеріалу GFRP. При цьому спостерігається чітка залежність зменшення величини зусилля місцевої втрати несучої здатності зі збільшенням діаметру отвору. Різниця даних показників склала близько 24%.

Наведені в таблиці 2 результати вказують на те, що при мінімальній величині зазорів отворів болтів (зразок А-С0.0) стадія структурного руйнування (35.97 кН) починається практично відразу після стадії місцевої втрати несучої здатності (32.25). Останнє свідчить про крихкий, раптовий характер руйнування.

З огляду на сказане, можна зробити висновок, що оптимальним є величина зазору в межах 1,0-2,0мм. Так, зразки А-С1.0, А-С1.5, А-С2.0 мають високі показники місцевої та загальної міцності, при цьому забезпечено пластичний характер руйнування з'єднання.

Висновки. Проведений загальний [8, 10-14] та опосередкований [9] аналіз існуючих досліджень впливу величини зазору болтових отворів на міцність з'єднання дозволяє зробити такі висновки:

- зміна величини зазору болтових отворів не впливає на загальну структурну міцність болтового з'єднання GFRP [9, 11];
- збільшення величини зазору болтових отворів призводить до зменшення величини зусилля місцевої втрати несучої здатності болтового з'єднання GFRP (збільшення зазору з 0 мм до 3 мм призвело до зменшення даного зусилля на 24% [9]);
- мінімальна величина зазору (0 мм) призводить до крихкого характеру руйнування з'єднання [8, 9, 12];
- оптимальною з точки зору показників міцності та характеру руйнування зразків є величина зазору болтового отвору, яка знаходиться в межах 1,0-2,0 мм [8, 9, 11].

Наведені висновки можуть бути використанні при проектуванні болтових з'єднань GFRP елементів, але вони потребують уточнення шляхом проведення додаткових експериментальних досліджень.

1. L. Ascione, J.-F. Caron, P. Godonou, K. Van Ijsselmuijden, J. Knippers, T. Mottram, M. Oppe, M. G. Sorensen, J. Taby, L. T. Editors, E. Gutierrez, S. Dimova, and S. Denton, Prospect for New Guidance in the Design of Frp. 2016.

2. Karbhari, V. M., and Zhao, L. (2000). Use of composites for 21st century civil infrastructure. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 185, 433-454.
3. Wang M., Zhang Z., Li Y., Li M., Sun Z. (2008). Chemical Durability and Mechanical Properties of Alkali-proof Basalt Fiber and its Reinforced Epoxy Composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 27(4), 393-407.
4. Семян, М. И. Расчеты соединений элементов конструкций из полимерных материалов на прочность и долговечность [Текст]: моно-графия / М. И. Семян. – М.: МАДИ, 2016. – 92 с.
5. Park, J.S, Lee, S, Joo, H.J, Yoon, S.J, 2009, 'Experimental and analytical investigations on the bolted joints in pultruded FRP structural members', *International Institute for FRP in Construction for the Asia-Pacific Region*, pp 395-400.
6. Hart-Smith, L. J. (1996a). "Analysis methods for bolted composite joints subjected to in-plane shear loads," *Proc., AGARD 83rd Structures and Materials Panel: Bolted/Bonded Joints in Polymeric Composites, Specialist Meeting, Florence, Italy, September 2-3. McDonnell Douglas Corp. Paper MDC 96K-0086.*
7. Hassan, N. K., Mohamedien, M. A., and Rizkalla, S. H. (1997). "Rational model for multibolted connections for GFRP members." *J. Composites for Constr.* 1(2), 71-78.
8. Turvey, G. J. (1998). "Single-bolt tension joint tests on pultruded GRP plate: Effects of tension direction relative to pultrusion direction" *Composite Struct.*, 42(4), 341-351.
9. Sang-Pyuk Woo, Sun-Hee Kim, Soon-Jong Yoon, and Wonchang Choi, "Effect of Bolt-Hole Clearance on Bolted Connection Behavior for Pultruded Fiber-Reinforced Polymer Structural Plastic Members," *International Journal of Polymer Science*, vol. 2017, Article ID 8745405, 12 pages, 2017.
10. Li G, Wu X, Zhang C, Hu H, Zhang Y, Zhang Z. Theoretical simulation and experimental verification of C/SiC joints with pins or bolts. *Mater Des* 2014;53:1071-6.
11. T. A. D. Tajeuna, F. Lregeron, S. Langlois, and M. Demers, "Effect of geometric parameters on the behavior of bolted GFRP pultruded plates," *Journal of Composite Materials*, vol. 50, no. 26, pp. 3731-3749, 2016.
12. Y. Xiao and T. Ishikawa, "Bearing strength and failure behavior of bolted composite joints (part I: Experimental investigation)," *Composites Science and Technology*, vol. 65, no. 7-8, pp. 1022-1031, 2005.
13. G. Kelly and S. Hallström, "Bearing strength of carbon fibre/epoxy laminates: Effects of bolt-hole clearance," *Composites Part B: Engineering*, vol. 35, no. 4, pp. 331-343, 2004.
14. M.A. McCarthy, V. P. Lawlor, W. F. Stanley, and C. T. McCarthy, "Bolt-hole clearance effects and strength criteria in single-bolt, single-lap, composite bolted joints," *Composites Science and Technology*, vol. 62, no. 10-11, pp. 1415-1431, 2002.