

УДК 691.175.3

ПОКАЗНИКИ ВОГНЕСТІЙКОСТІ КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ

ПОКАЗАТЕЛИ ОГНЕСТОЙКОСТИ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

FIRE RESISTANCE INDICATORS OF COMPOSITE MATERIALS

Валовой О.І., к.т.н., проф., Єрьоменко О.Ю., к.т.н., доц., Валовой М.О., ст. викл. (Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг)

Валовой А.И., к.т.н., проф., Ерёменко А.Ю., к.т.н., доц., Валовой М.А., ассистент (Криворожский национальный университет, г. Кривой Рог)

Valovoj A.I., professor, Eremenko A.U., associate professor, Valovoj M.A., associate professor (Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih)

Наведено експериментальні дані випробувань на розтяг зразків вуглепластику (CFRP) та склопластику (GFRP) за умови дії високих температур

Приведены экспериментальные сведения испытаний на растяжения углепластика (CFRP) и стеклопластика (GFRP) под воздействием высоких температур

The experimental information on the carbon plastic tensile test (CFRP) and glass fiber reinforced plastic (GFRP) under high temperatures

Ключові слова:

Композит (FRP), вуглепластик (CFRP), склопластик (GFRP), температура склування (T_g), матриця, фібра, міцність, вогнестійкість
Композит (FRP), углепластик (CFRP), стеклопластик (GFRP), температура стеклования (T_g), матрица, фибра, прочность, огнестойкость
The composite (FRP), carbon fiber (CFRP), glass fiber (GFRP), a glass transition temperature (T_g), the matrix, fiber, strength, fire resistance

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. В процесі експлуатації будівель та споруд їх конструкції фізично зношуються, зазнають ушкоджень і, з часом, становлять небезпеку. Шляхи вирішення даної проблеми полягають або у побудові нових об'єктів промисловості та оновленні житлового фонду, або у реконструкції існуючих.

Поряд з традиційними способами підвищення несучої здатності конструкцій, останні 10 –15 років, все більшої популярності набуває спосіб

підсилення конструктивних елементів зовнішнім армуванням композитними матеріалами [1].

Широке застосування композитних матеріалів в будівництві, на теренах нашої країни, обмежується практично повною відсутністю нормативної бази, яка б регламентувала їх використання. У 2013 році набув чинності ДСТУ-Н Б В.2.6-185:2012, який стосується проектування та виготовлення бетонних конструкцій з композитною арматурою на основі базальто- і склоровінгу. В останньому містяться загальні положення по розрахунку та конструюванню таких елементів, які, багато в чому, повторюють аналогічні вимоги до елементів з металевою арматурою.

Композити, крім відомих переваг, мають певні недоліки про які, переважно, намагаються не згадувати аби підвищити привабливість даних матеріалів перед замовником робіт. Одним з таких недоліків є різке зниження міцності композитних матеріалів при підвищенні температури зовнішнього середовища [2]. В нормативних документах інших країн [2...6] останній факт знайшов відображення у вигляді загальних рекомендацій, щодо забезпечення вогнестійкості конструкцій підсилені композитами шляхом влаштування систем вогнезахисту конструкцій. В нашій країні дане питання не як не регламентоване і, відповідно, ніким не контролюється.

Зважаючи на зростаючі темпи використання композитних матеріалів в будівництві питання їх поведінки, за умови дії підвищених температур, є актуальним.

Аналіз досліджень і публікацій. Сучасні композитні матеріали, які застосовуються у будівництві, як правило, представляють собою двокомпонентний матеріал, що складається з армуючих високоміцних волокон (фібри) та матриці. Матриця представляє собою полімер потрібний для забезпечення сумісної роботи окремих волокон, рівномірного розподілу зусиль між ними та збереження їх початкового розташування, захисту волокон від зовнішніх впливів, тощо. Зважаючи на таку структуру матеріалів вони отримали назву фіброармованих полімерів (FRP).

На теперішній час широкого розповсюдження набули композити на основі скловолокна, вуглецевих та арамідних волокон. В закордонній літературі вони отримали назви GFRP, CFRP та AFRP, відповідно. Скловолокно є найбільш економічно привабливим з перелічених, але при цьому композити GFRP є чутливими до підвищеної вологості, при довготривалому дії навантаження їх міцність зменшується внаслідок виникнення повзучості [7]. Арамідні волокна, незважаючи на гарні фізико-механічні властивості, обмежено використовуються внаслідок високої вартості. Найбільшого поширення набули композити на основі вуглецевих волокон CFRP. Останні мають високі показники міцності та жорсткості, стійкості до впливу агресивного середовища, низький коефіцієнт температурного лінійного розширення.

Найбільш розповсюдженими типами матриць є поліестер, вініловий ефір та епоксидні смоли. Останні, внаслідок ряду специфічних властивостей, отримали широкого вжитку при виготовленні композитів (FRP).

Однією з характеристик FRP є температура склування (T_g). При досягненні клеєм матриці T_g відбувається його перехід з твердого, склоподібного стану до пластичного, в'язкотекучого стану. Високі механічні показники композитів забезпечуються сумісною роботою матриці та фібри. При досягненні клеєм матриці T_g її модуль пружності значно зменшується, порушується зв'язок між окремими фібрами, знижується здатність матриці до передачі зусиль між волокнами, відбувається деградація всієї системи [8]. Переважна більшість матриць для FRP мають T_g в діапазоні 60...90 °С. Дослідження поведінки FRP матеріалів [9] вказують на те, що при досягненні температури зовнішнього середовища 300-400 °С клей матриці може зайнятися проваючи розповсюдження полум'я по всій поверхні композита та оточуючих конструкцій, виділяючи велику кількість токсичного полум'я.

На відміну від клею матриці фібри є більш стійкими до впливу температури і не підтримують горіння, навіть при прямому контакті з відкритим полум'ям.

Арамідні волокна починають окислюватися при температурі 150 °С, а руйнування їх структури відбувається при температурі 500 °С і більше [8].

Скляні волокна є більш стійкими. Їх розм'якшення (падіння міцності) відбувається в діапазоні температур 350...970 °С, а плавлення при $T = 1225...1370$ °С [10].

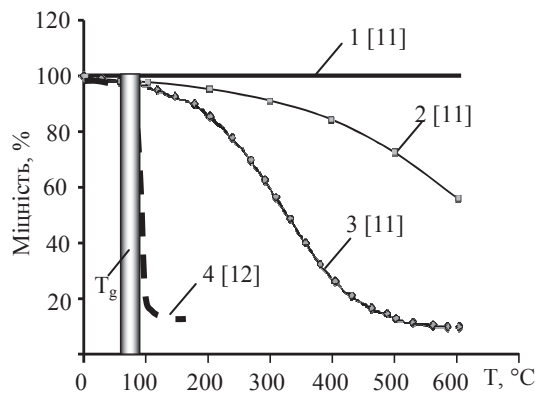


Рис. 1. Зміна міцності компонентів FRP матеріалів з підвищенням температури:

- 1 – вуглецеве волокно; 2 – скловолокно;
- 3 – арамідне волокно; 4 – полімер матриці.

Вуглецеві волокна не окислюються до температури 400 °С, а їх температура плавлення біля 4000 °С [10].

На рис. 1 наведено залежності втрати міцності окремо полімеру матриці та фібр в залежності від підвищення температури [11].

Зображені залежності свідчать про те, що в двокомпонентній системі FRP матеріалів слабкою ланкою є полімер матриці. В

зв'язку з цим постає питання визначення фактичних показників міцності

композитів (FRP) за умови впливу високих температур в цілому, а не кожного компоненту окремо.

Постановка завдання. Метою дослідження було проаналізувати та узагальнити існуючі експериментальні дані [13...22] змінення міцності та модуля пружності композитних матеріалів (CFRP, GFRP) за умови дії підвищених температур.

Викладення матеріалу та результати. Дослідження характеристик композитів, які зазнали впливу підвищених температур, на теренах СНД, носять дуже обмежений характер. Є окремі роботи присвячені особливостям роботи залізобетонних конструкцій підсилених композитами за умови дії знакозмінних температур [20...22]. При цьому рівень температур, яких зазнавали конструкції, не перевищував 90...120 °С. Такий рівень температур набагато нижчий ніж той, що може виникати внаслідок пожеж, аварій на об'єктах промисловості, тощо.

За кордоном приділяється більша увага питанням вогнестійкості композитів. За останні 10...15 років в країнах ЄС, Канаді, США проведено певну кількість експериментальних досліджень впливу температури на властивості FRP.

В роботі [13] наведені результати та описано експеримент з дослідження залишкових характеристик міцності та модуля пружності FRP після впливу підвищеної температури різної інтенсивності. Згідно програми випробувань передбачалося дослідження стрічок GFRP та CFRP, довжиною 25см. Характеристики зразків наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Властивості дослідних зразків GFRP та CFRP [13]

Тип зразка	Виробник	T _g , °C	Міцність на розтягання, МПа	Модуль пружності при розтяганні, ГПа
CFRP	Tyfo SCH-41 System w/ Tyfo S Epoxy	82	986	95.8
GFRP	Tyfo SEH-51 System w/ Tyfo S Epoxy	82	575	26.1

Зразки поміщали до печі для випробувань сухим теплом і витримували при певній температурі 3 години. Температури випробувань складали 20, 100, 200, 300 та 400 °С. Після витримки при задній температурі зразки охолоджували на повітрі, а потім визначали їх показники міцності на розтягання та модуль пружності [13].

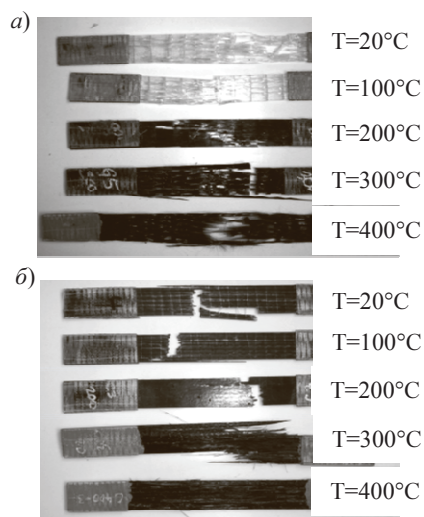


Рис. 2. Дослідні зразки після впливу температури та випробувань на розтягання [13]:
a – GFRP; *б* – CFRP.

При проведенні експерименту, шляхом візуального спостереження, було зафіксовано зміни поверхні зразків [13]. Стрічки, що зазнали впливу температури 100 °С, не змінили колір поверхні, але відбулося їх незначне викривлення та відчувався стійкий запах горілої епоксидної смоли, що свідчило про початок деструкції епоксидного клею матриці. При нагріванні до температури 200 °С колір їх поверхні змінився, що свідчило про термічне розкладання матриці. В діапазоні температур 300...400 °С відбувалося вигорання епоксидної смоли

матриці. Спостерігалось розділення зразків на окремі фібри з залишками клею матриці між ними (рис. 2). Зважування зразків до експерименту та після нього показало, що в діапазоні температур 0...300 °С відбувається незначна зміна маси зразків (до 5%), а починаючи з температури ≈ 370 °С відбувається різке зниження маси на ≈ 40 % для CFRP та на ≈ 70 % для GFRP [13].

Випробування зразків на розтягання показали, що підвищення рівня температур істотно впливає на міцність та пружність CFRP, GFRP. Так зразки CFRP в діапазоні температур 0...300 °С показали рівномірне зниження міцності на розтяг, в середньому, на 15...20 %. Температура 400 °С призвела до різкого падіння міцності CFRP. Залишкова міцність склала біля 30% від початкової [13]. Близькі результати були отримані для зразків GFRP. Відмінність полягала в більшому падінні показників міцності. В діапазоні температур 0...300 °С до 80%, а при температурі 400 °С до 20% від початкової міцності [13].

Величина модуля пружності також зазнала змін, але в меншій мірі. В діапазоні температур 0...300 °С змін не відбувалося. Після досягнення температури 400 °С зразки CFRP показали зниження модуля пружності, в середньому, на 10%, а зразки GFRP на 40% [13].

Слід зазначити, що фізичне вигорання полімерної матриці притаманне для FRP матеріалів. На рис. 3 наведено зразки CFRP та GFRP арматури, які

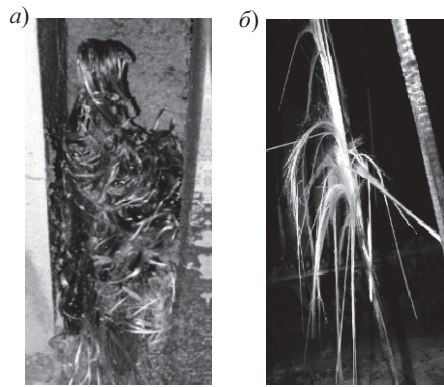


Рис. 3. Вигоряння полімерної матриці композитної арматури [14]:
a – GFRP; *б* – CFRP.

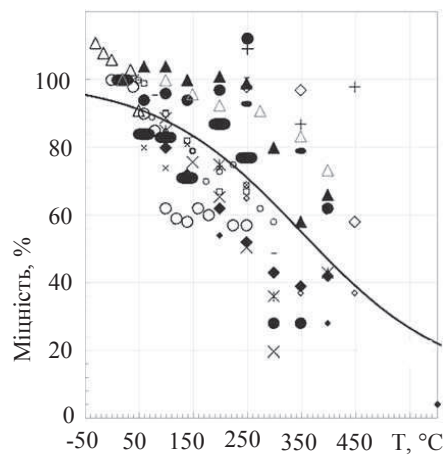


Рис. 4. Варіативність результатів експериментальних дослідів міцності CFRP та GFRP при підвищені температури [15].

зазнали дії розтягуючи зусиль та впливу температури одночасно [14]. Як видно з рис. 3 полімер матриці повністю вигорів.

На теперішній час немає норм, які б регламентували властивості того чи іншого композиту, більшість виробників використовують власні ТУ або патентовані технології з їх виготовлення. Звідси існує певний розбіг в результатах експериментів в залежності від виробника FRP.

Так на рис. 4 зображено результати експериментальних дослідів проведених різними дослідниками в різний час [15] з визначення вогнестійкості FRP. Можна помітити, що отримані дані мають досить значні відмінності, обумовлені характеристиками матеріалів. Побудована інтерполюючі крива досить наближено описую наведені результати. Більш детальні відомості по залежностям наведеним на рис.4 містяться в праці [15].

Наведені раніше відомості підтверджуються результатами інших експериментальних

досліджень. На рис. 5 наведено узагальнюючі залежності втрати міцності зразками FRP при підвищених температурах [16...19]. Аналіз рис. 5 дозволяє сформулювати наступні, спільні для всіх FRP матеріалів, особливості їх роботи. А саме, незначне зниженні міцності (3...7%) починає відбуватися при температурах на 10..15 °C менших від T_g . Для переважної більшості композитів, які

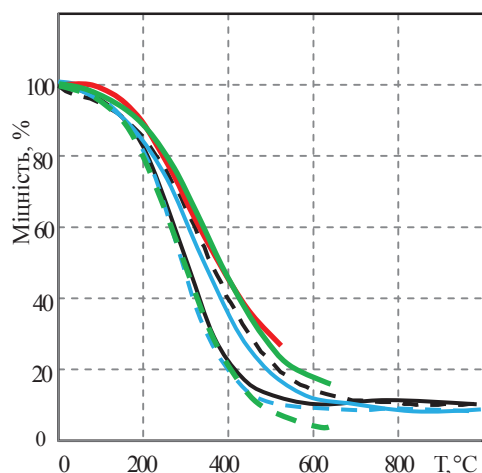


Рис. 5. Залежність між міцністю на розтяг та підвищенням температури:

- CFRP [19]; — CFRP [16]; — CFRP [17];
- - GFRP [19]; - - GFRP [16]; - - GFRP [17];
- CFRP [18].

пришвидшується, що пов'язують з початком незворотних процесів деградації матриці композитів. При температурах 300...400 °C, більшість дослідників, відмічає початок фізичного загоряння полімеру матриці. Цей етап також характеризується значним зниженням показників міцності - до $\approx 40\%$ (при температурі 300 °C) та до $\approx 80\%$ (при температурі 400 °C) від початкової міцності. Останнє пояснюється не тільки з фізичним руйнуванням матриці, а і процесами окислення волокон (фібр) композиту. Підвищення температури до 600 °C знижує показники міцності до 10% від початкової (рис. 5). Подальше підвищення температури не призводить до падіння міцності, вона залишається стабільною до руйнування зразків. Слід зазначити, що CFRP матеріали показують на 5...10% більші показники міцності порівняно з GFRP.

Модуль пружності CFRP та GFRP в меншій мірі залежить від температури оточуючого середовища. За даними робіт [13...19] до температури 300...400 °C падіння модуля пружності не спостерігалось, а після досягнення означених температур, відбувається його зниження. При цьому, як і у випадку з показниками міцності, модуль пружності GFRP порівняно з CFRP, знижувався більш інтенсивно (рис. 6).

використовуються в будівництві, цей поріг знаходиться в діапазоні 50...70 °C. Після досягнення клеєм матриці T_g , властивості починають погіршуватися більш стрімко, що пов'язують з переходом матриці до в'язкотекучого стану. Внаслідок цього погіршується взаємодія між окремими волокнами композиту. Міцність продовжує поступово знижуватися до температури 200 °C. Падіння міцності, при цьому, складає, в середньому, 10...20%. Після зростання температури вище 200 °C падіння показників міцності значно

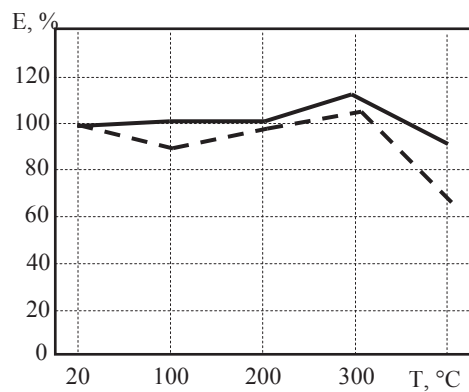


Рис. 6. Залежність модуля пружності композитів від температури зовнішнього середовища [13]:

— CFRP - - GFRP

Висновки та напрямок подальших досліджень.

Проведений аналіз експериментальних даних по вогнестійкості композитів (CFRP, GFRP) дозволяє дійти висновку про істотний вплив температури на показники міцності та модуль пружності. Зниження показників міцності починається в діапазоні температур близьких до температури склування (T_g), яка для композитів масового виробництва, складає 60...90 °C. Такі показники набагато нижче рівня температур при якому відбувається зниження

міцності традиційних матеріалів – бетону, сталі (400...600 °C). Зважаючи на те, що CFRP та GFRP матеріали в нашій країні, переважно, використовують для підсилення чи відновлення несучої здатності відповідальних конструкцій будівель та споруд (мости, громадські та промислові об'єкти), які мають певну ступінь вогнестійкості, використання таких матеріалів, без належного вогнезахисту, може призвести до непередбачуваних наслідків.

В зв'язку з тим, що композитні матеріали мають низькі показники вогнестійкості, актуальним питанням подальших досліджень є аналіз існуючих та розробка нових систем вогнезахисту конструкцій підсиленіх зовнішнім армуванням з використанням FRP.

1. Шилин А.А., Пшеничный В.А., Картузов Д.В. Внешнее армирование железобетонных конструкций композиционными материалами. – М., ОАО «Издательство «Стройиздат», 2007. 181 с.
2. ACI (2008), Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures, ACI 440.2R-08, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA.
3. СП 164.1325800.2014 Усиление железобетонных конструкций композитными материалами. Правила проектирования. – М. : Минстрой России, 2015. – 52 с.
4. CSA (2002). CAN/CSA S806-02: Design and construction of building components with fibereinforced polymers. Canadian Standards Association.
5. CNR-DT 200/2004, Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures, National research council, Rome.
6. ISCE (2001), Recommendation for Upgrading of Concrete Structures with Use of Continuous Fiber Sheets, Concrete Engineering Series 41, Japan Society of Civil Engineers, Tokyo.
7. Bank, L. C., Gentry, T. R., and Barkatt, A. (1995). "Accelerated test methods to determine the long-term behavior

of FRP composite structures: environmental effects." *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 14(6), 559. **8.** Bakis, C. E. (1993). *FRP reinforcement: materials and manufacturing*, Elsevier Science Publisher. **9.** Apicella, F., and Imbrogno, M. (1999a). "Fire Performance of CFRP-Composites Used for Repairing and Strengthening." *Proceedings of Fifth ASCE materials Engineering Conference*, Cincinnati, Ohio, 266. **10.** Bourbigot, S., and Flambar, X. (2002). "Heat resistance and flammability of high performance fibres: A review." *Fire and Materials*, 26(4-5), 155-168. **11.** Bisby, L. A. (2003). "Fire behavior of fibre-reinforced polymer (FRP) reinforced or confined concrete," Doctoral Thesis, Queen's University, Kingston, Canada. **12.** FRP composites for new construction and strengthening: properties, applications & research at ist (2015), report, Instituto Superior Técnico, University of Lisbon, Portugal Kaunas University of Technology (KTU), Lithuania, 96. **13.** Foster SK, Bisby LA. High Temperature Residual Properties of Externally-Bonded FRP Systems. 7th Int. Symp. Fiber-reinforced Polym. Reinf. Concr. Struct., American Concrete Institute; 2005, p. 1235–52. **14.** Zlámal M, Kučerová A, Štěpánek P Effect of fire on fip reinforced concrete structures, Central Europe towards Sustainable Building 2013. **15.** Williams B, Bisby L, Kodur V, Su J, Green M. An investigation of fire performance of FRP-strengthened R/C beams. 8th International Symposium on Fire Safety Science, Beijing, September 18–23, 2005. **16.** Ahmed, A., "Behavior of FRP-Strengthened Reinforced Concrete Beams Under Fire Conditions", PhD thesis, Michigan State University, USA, 2010, 262pp. **17.** Benichou, N. "Fire Performance of FRP-strengthened concrete systems", short course, Response of Materials and Structures to Fires, Carleton University, Ottawa, Ontario, May 20-22, 2009. **18.** Nigro, E.; Manfredi G.; Cosenza, E.; Cefareli, G. High-temperature behaviour of concrete slabs reinforced with FRP bars. Fourth International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE2008), 22-24 July 2008, Zurich, Switzerland. **19.** Mohannad Z. Naser (2011). "Behavior of rc beams strengthened with cfrp laminates under fire -a finite element simulation a thesis in civil engineering." M.Sc. American University of Sharjah, Sharjah, UAE, 152 pp. **20.** Смердов, Д. Н. Оценка несущей способности железобетонных пролетных строений мостов, усиленных композиционными материалами : дис. ...канд. техн. наук : 05.23.11 / Смердов Дмитрий Николаевич. – Новосибирск, 2010. – 159 с. **21.** Бокарев, С. А. Экспериментальные исследования при пониженных и повышенных температурах железобетонных образцов, усиленных полимерными композиционными материалами / С. А. Бокарев, А. Н. Костенко, Д. Н. Смердов, А. А. Неровных // Интернет-журнал «Науковедение». – 2013. – № 3. – С. 1–9. **22.** И.Г. Овчинников, И.И. Овчинников, Г.В. Чесноков, Е.С. Михалдыкин. Анализ экспериментальных исследований по усилению железобетонных конструкций полимерными композитными материалами. Часть 1. Отечественные эксперименты при статическом нагружении. *Науковедение [Электронный ресурс]: науч. журнал / Ин-т. Гос. Управ., права и иннов. техн. – Электрон. журн. – М.: ИГУПИТ, 2016. – №8. – Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/index.php?p=vol8-3>, свободный.*