

УДК 691.175.3

**ОЦІНКА ЗЧЕПЛЕННЯ КОМПОЗИТИВ З ПОВЕРХНЕЮ КОНСТРУКЦІЙ
ЗА УМОВИ ВПЛИВУ ПІДВИЩЕНИХ ТЕМПЕРАТУР**

**ОЦЕНКА СЩЕПЛЕНИЯ КОМПОЗИТОВ С ПОВЕРХНОСТЬЮ
КОНСТРУКЦИЙ ПРИ УСЛОВИИ ДЕЙСТВИЯ ПОВЫШЕННЫХ
ТЕМПЕРАТУР**

**ASSESSMENT OF ADHESION COMPOSITES CONSTRUCTIONS WITH
THE SURFACE OF THE CONDITION OF HIGH TEMPERATURE**

**Валовой О.І., к.т.н., проф., Єрмоєнко О.Ю., к.т.н., доц., Валовой М.О.,
к.т.н., доцент** (Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг)

**Валовой А.И., к.т.н., проф., Ерёмєнко А.Ю., к.т.н., доц., Валовой М.А.,
к.т.н., доцент** (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 міцності зчеплення вуглепластиків
(CFRP) та склопластиків (GFRP) з поверхнею бетонних зразків та між
собою за умови впливу підвищених температур**

**Приведены експериментальные данные прочности сцепления
углепластиков (CFRP) и стеклопластиков (GFRP) с поверхностью
бетонных образцов и между собой при воздействии повышенных
температур**

Experimental data are presented adhesion of strength carbon fiber reinforced
plastics (CFRP) and glass-reinforced plastics (GFRP) with the surface of the concrete
samples and each other when exposed to elevated temperatures

Ключові слова:

Вуглепластик (CFRP), склопластик (GFRP), температура склування (T_g),
міцність на зсув, адгезія, клей, вогнестійкість
Углепластик (CFRP), стеклопластик (GFRP), температура стеклования (T_g),
прочность на сдвиг, адгезия, клей, огнестойкость
carbon fiber (CFRP), glass fiber (GFRP), a glass transition temperature (T_g), shear
strength, adhesion, glue, fire resistance

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями.

Композитні матеріали знайшли широкого вжитку по всьому світу. Одним з напрямків їх використання в будівництві є зовнішнє армування конструкцій при ремонті чи реконструкції будівель та споруд. Популярність цього способу можна пояснити швидкістю виконання робіт, можливістю ведення робіт малими засобами механізації та з мінімальними перервами в експлуатації споруд, суттєвим підвищенням несучої здатності конструкцій без збільшення їх власної ваги, тощо [1].

Незважаючи на велику кількість дослідів спрямованих на з'ясування особливостей роботи композитів в складі конструкцій, залишається багато малодосліджених питань їх роботи в умовах впливу агресивного середовища, підвищених температур, тощо. Відомо, що властивості композитних матеріалів, в більшій, мірі залежать від підвищення температур, ніж матеріали конструкцій, що підсилюються – бетон та арматура. З огляду на це задача отримання, накопичення та систематизації експериментальних даних про поведінку композитних матеріалів у складі зовнішнього армування конструкцій за умови впливу підвищених температур є актуальною.

Аналіз досліджень і публікацій. Особливістю використання зовнішнього армування при підсиленні чи відновленні конструкцій є потреба в забезпеченні надійного контакту та перерозподілу зусиль між конструкцією що підсилюється та елементом підсилення. Оскільки підсилення, за цим методом, полягає в наклеюванні полос чи полотнищ композиту на поверхню конструкції, то саме клей забезпечує їх сумісну роботу. Умовно, можна поділити таку конструкцію на три складові частини – безпосередньо сама конструкція, композит та адгезив у вигляді клею. З огляду на вплив підвищених температур, кожна складова частина повинна забезпечувати прийнятний рівень вогнестійкості. Аналіз експериментальних досліджень [2...6] свідчить про досить низькі показники міцності композитів та клейових сумішей.

Так в роботі [6] було виконано порівняння зниження показників міцності традиційних будівельних матеріалів, вуглепластику (CFRP) та склопластику (GFRP) з підвищенням температури оточуючого середовища. Отримані залежності (рис. 1) вказують на те, що за температури 300...400 °C композити втрачають до 80% початкової міцності на розтяг, в той час, як зниження міцності бетону чи арматури не перевищувало 20%. Таку поведінку композитів пов'язують з наявністю у їх складі полімерної матриці, яка при зростанні температури починає розм'якшуватися, що призводить до порушення сумісної роботи окремих фібр композиту, нерівномірного розподілу зусиль між ними, тощо. Температуру за якої клей матриці переходить з твердого стану до в'язкопластичного, текучого стану називають температурою склування (T_g). Полімери матриць, які використовують при виготовленні композитів для будівництва, як правило, мають температуру склування в межах 60...90 °C [7]. Оскільки для наклеювання композиту на поверхню конструкції використовують полімерні клеї схожі за складом до полімерів композитів, то T_g буде істотно впливати на їх показники. Проведені дослідження [8] вказують на те, що при

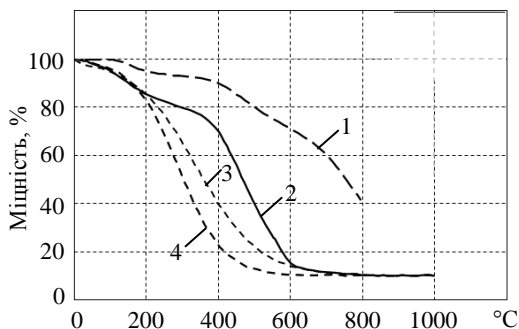


Рис. 1. Зниження міцності матеріалів в залежності від зростання температури [6]:

- 1 – бетон; 2 – сталь;
3 – вуглепластик (CFRP); 4 – склопластик (GFRP).

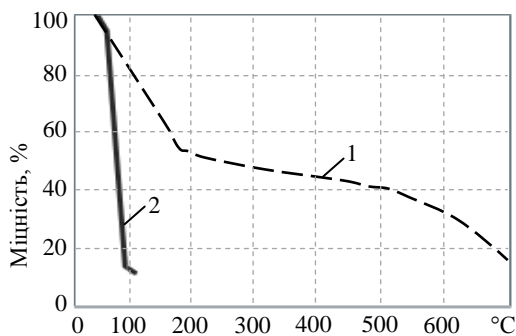


Рис. 2. Зміна міцності CFRP та епоксидного адгезиву:

- 1 – CFRP [9]; 2 – адгезив на основі епоксидного клею [10].

експериментальних випробувань реальних зразків.

Постановка завдання. Метою дослідження було проаналізувати та узагальнити існуючі експериментальні дані [8, 11...17] зміни міцності зчеплення композитних матеріалів з поверхнею один одного та бетонною поверхнею конструкції за умови впливу підвищених температур.

Викладення матеріалу та результати. Зважаючи на те, що поведінка дослідних зразків, описувана в роботах [8, 11...17], має багато спільного, то надалі розглядаються результати наведені в роботах [8, 15], як більш репрезентативні.

досягненні температури склування клей адгезиву втрачає до 90 % від початкової міцності. На рис. 2 наведені залежності зниження межі міцності CFRP та полімерного адгезиву на основі епоксидного клею зі зростанням температури.

Таким чином в системі підсилення конструкцій зовнішнім армуванням композитами, кожна зі складових системи має свою ступінь вогнестійкості. При цьому адгезив (клей) в більшій мірі залежить від впливу температури ніж конструкція без підсилення чи композит підсилення. Втрата зчеплення матеріалу підсилення з конструкцією може призвести до втрати ефекту підсилення. Зрозуміло, що останні твердження потребують перевірки шляхом

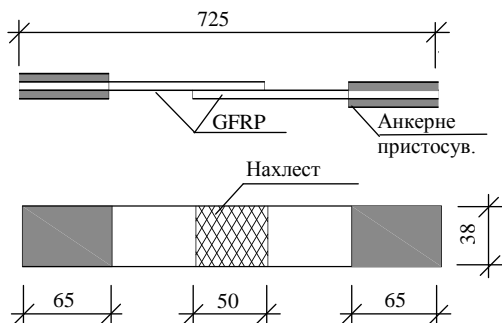


Рис. 3. Схема дослідного зразка [15].

Через 72 години після виготовлення зразки поєднувалися між собою внахлєст за допомогою епоксидного адгезиву (Sikadur 30) з температурою склування $T_g = 75\text{ }^\circ\text{C}$ [15]. Схема дослідних зразків наведена на рис. 3.

Випробування проводилися за температури оточуючого середовища 20, 45, 60, 75, 90 та 200 $^\circ\text{C}$. Після витримки при заданій температурі протягом 10 хвилин, зразки зазнавали розтягання [15].

Результати випробувань зразків наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Межа міцності на зсув зразків GFRP з'єднаних внахлєст [15]

Температура, $^\circ\text{C}$	20	45	60	75	90	200
Усереднена міцність з'єднання на зсув, МПа	9,2	6,5	3,8	2,1	1,9	1,3

Аналіз результатів вказує на те, що при температурі 45 $^\circ\text{C}$ відбулося зниження несучої здатності з'єднання, в середньому, на 30%, а при температурі 75 $^\circ\text{C}$ на 77%. Тобто суттєвого зниження міцності з'єднання зазнало вже при температурі 45 $^\circ\text{C}$, що менше ніж температура склування ($T_g = 75\text{ }^\circ\text{C}$) на 30 $^\circ\text{C}$. Досягнення температури T_g клеєм адгезиву призводить, практично, до повної втрати міцності на зсув з'єднанням. В роботі [15] також було виконано дослідження міцності суцільних смуг GFRP на розтяг при тих же рівнях температур. За результатами випробувань зразки також показали зниження міцності, але навіть при температурі 200 $^\circ\text{C}$ міцність була на рівні 50 % від початкової [15]. Такі результати вказують на те, що, як клей адгезиву, так і матриця композиту є більш вразливими до впливу температури, ніж фібра. У випадку суцільних полос GFRP фібра чинила опір діючому навантаженню, навіть попри деградацію клею матриці, а з'єднання внахлєст зруйнувалося разом з втратою міцності клейової суміші.

В роботі [8] проводилися дослідження на зсув бетонних призм з'єднаних полосами вуглепластику (CFRP). Розглядалося два варіанти закріплення полоси CFRP на поверхні призм. Згідно першого полоси приклеювали на поверхню обох призм за допомогою адгезиву на основі епоксидного клею (зразки серії C1). Згідно другого полоси CFRP укладали в паз утворений на поверхні призм з наступним заповненням тим же клейовим складом, що і для першого випадку (зразки серії C-2). Схему дослідних зразків наведено на рис. 4.

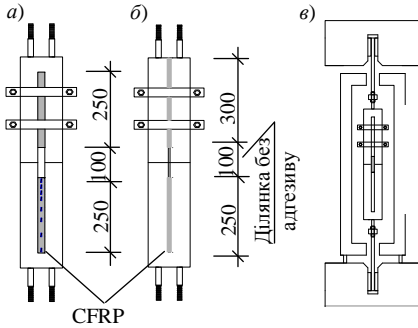


Рис. 4. Схема дослідних зразків [8]:
 а – розташування CFRP на поверхні зразка;
 б – розташування CFRP в пазу;
 в – схема експериментальної установки.

застосовувався дорівнювала $T_g = 50\text{ }^\circ\text{C}$. Зразки зазнавали зусиль розтягання при

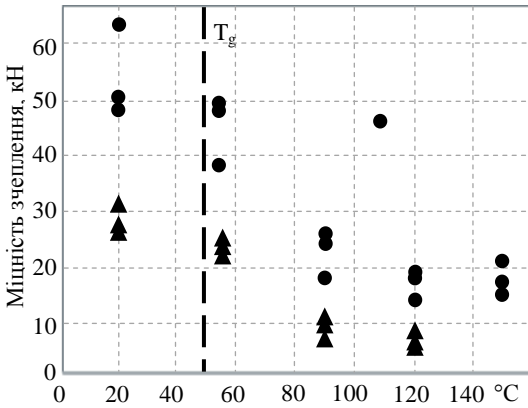


Рис. 5. Показники міцності на зчеплення дослідних зразків[8]:
 ▲ – зразки серії C-1;
 ● – зразки серії C-2.

кожному фіксованому рівні температур [8]. Величини зовнішнього навантаження за яких відбулося руйнування зразків внаслідок втрати зчеплення композиту та бетону призм, при різному рівні температур, наведено на рис. 5. Наведені на рис. 5 відомості свідчать, про те, що міцність на зчеплення зразків серії C-2, при температурі 20 °C виявилася, в середньому, на 180% вищою порівняно зі зразками серії C-2. Останнє можна пояснити більшою площею поверхні за якою відбувається контакт між бетоном зразка та CFRP підсилення. Таке співвідношення спостерігалось до руйнування зразків. При цьому зразки серії C-1 при температурі 150 °C не випробовувалися внаслідок проковзування CFRP по поверхні зразка, в той час як зразки серії C-2 продовжували чинити опір [8]. Така поведінка зразків пояснюється тим, що при

розташуванні вуглепластику в пазах, він мав захисний шар у вигляді бетону призми та епоксидного клею, який заповнював паз.

В зв'язку з цим процес переходу адгезиву в пластичний стан відбувався повільніше ніж у зразків серії С-1, в яких адгезив від оточуючого середовища відділяв тільки шар CFRP. В цілому, зразки обох серій показали зниження показників зчеплення зі зростанням температури. Вже при температурі оточуючого середовища 90 °С падіння міцності на зчеплення, у порівнянні з показниками при температурі 20 °С, склало, в середньому, 50%.

Висновки та напрямок подальших досліджень. Аналіз даних наведених в роботах [8, 15] вказують на те, що міцність зчеплення композитів з поверхнями конструкцій швидко знижується з підвищенням температури зовнішнього середовища. Дослідження на зчеплення зразків GFRP та CFRP показали, що при досягненні температури адгезиву рівня ± 15 °С від температури склування, міцність на зчеплення знижується на 50...77%. Зразки з розташуванням зовнішнього армування в пазах показали кращі показники зчеплення з поверхнею.

При підсиленні конструкцій зовнішнім армуванням композитами важливим є забезпечення надійного зв'язку між бетоном конструкції та елементом підсилення за будь-яких умов експлуатації конструкції. Наведені дані свідчать про те, що підвищення температури призводить до зниження механічних властивостей клею, що впливає на зв'язок композиту з бетоном. З подальшим підвищенням температури відбувається повна втрата взаємозв'язку між композитом і бетоном конструкції. При цьому конструкція, яка втратила ефект підсилення, під впливом навантаження, що перевищує проектне, за обмежений проміжок часу втратить несучу здатність. Таким чином, попередньо можна зробити висновки, про те, що використання композитів в якості зовнішнього армування при підсиленні конструкцій, можливо лише за умови забезпечення рівня вогнестійкості елементів підсилення такого ж, як і рівень вогнестійкості самої конструкції. Останнє передбачає використання відповідних засобів вогнезахисту таких конструкцій. Дослідження ефективності тих чи інших засобів вогнезахисту, а також розробка рекомендацій з їх застосування є актуальним питанням подальших досліджень пов'язаних з використанням композитів в якості зовнішнього армування при підсиленні конструкцій.

1. Шилин А.А., Пшеничний В.А., Картузов Д.В. Внешнее армирование железобетонных конструкций композиционными материалами. – М., ОАО «Издательство «Стройиздат», 2007. 181 с. 2. 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. 3. Zlámal M, Kučerová A, Štěpánek P Effect of fire on frp reinforced concrete structures, Central Europe towards Sustainable Building 2013. 4. 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. 5. Ahmed, A., “Behavior of FRP-Strengthened Reinforced Concrete Beams Under Fire Conditions”, PhD thesis, Michigan State University, USA, 2010, 262pp. 6. B. Williams, V. Kodur, M. Green, and L. Bisby, "Fire Endurance of Fiber-Reinforced Polymer

Strengthened Concrete T-Beams," J ACI Structural , vol. 105, no. 1, pp. 60-67, 2008. **7.** Bakis, C. E. (1993). FRP reinforcement: materials and manufacturing, Elsevier Science Publisher. **8.** FRP composites for new construction and strengthening: Properties, Applications & Research at IST, Department of Civil Engineering, Architecture and geological resources, Instituto Superior Técnico, University of Lisbon, Portugal& Kaunas University of Technology (KTU), Lithuania, 2015. – p. 97. **9.** Wang K., Young B. and Smith S.T. (2011). "Mechanical properties of pultruded carbon fibre-reinforced polymer (CFRP) plates as elevated temperatures". Engineering Structures , Vol. 33, pp. 2154-2161. **10.** Moussa, O., A.P.Vassilopoulos, J. de Castro, and T. Keller, 2012, Time–temperature dependence of thermomechanical recovery of cold-curing structural adhesives. International Journal of Adhesion and Adhesives, 35, 94-101. **11.** Tadeu, A. J. B., and Branco, F. J. F. G. (2000). "Shear Test of Steel Plates Epoxy-Bonded to Concrete Under Temperatures." Journal of Materials in Civil Engineering, 12(1), 74-80. **12.** Blontrock, H., Taerwe, L., and Vanwalleghem, H. (2002). "Bond testing of externally glued FRP laminates at elevated temperature." Proceeding of the International 253 Conference Bond in Concrete – from research to standards, Budapest, Hungary, 648-654. **13.** Klammer, E. L., Hordijk, D. A., and Janssen, H. J. M. (2005b). "The influence of temperature on the debonding of externally bonded CFRP." Proceedings of 7th International Symposium on Fiber Reinforced Polymer (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (FRP7RCS), Kansas City, 1551-1592. **14.** Leone, M., Matthys, S., and Aiello, M. A. (2009). "Effect of elevated service temperature on bond between FRP EBR systems and concrete." Composites Part B, 40(1), 85-93. **15.** Chowdhury, "Behaviour of fibre reinforced polymer confined reinforced concrete columns under fire condition", PhD thesis, Queen's University Kingston, Ontario, Canada December, 2009, 260pp. **16.** Leone, M., Aiello, M.-A., & Matthys, S. (2006). The Influence of Service Temperature on Bond between FRP Reinforcement and Concrete. Fédération Internationale du Béton Session 10 - FRP reinforcement for new and existing structures. Naples, Italy: Fédération Internationale du Béton. **17.** Baolin Y., " Fire response of reinforced concrete beams strengthened with near-surface mounted frp reinforcement", PhD thesis, Michigan State University, USA, 2013, 391pp.