

к.т.н., проф. **Валовой О.І.**,
к.т.н., доц. **Єрмоменко О.Ю.**,
к.т.н., доц. **Валовой М.О.**,
ДВНЗ “Криворізький національний університет”.

ВПЛИВ КОЛИВАНЬ ТЕМПЕРАТУР НА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БАЛОК ПІДСИЛЕНИХ КОМПОЗИТАМИ

Викладено методичку розрахунку та результати експериментальних випробувань залізобетонних балок підсилені зовнішнім армуванням вуглецевими полотнами за умови одночасного впливу зовнішнього навантаження та діапазону температур.

Calculation methods and experimental tests of the ferroconcrete beams strengthened with the outer reinforcement are given. Strengthening carbon plates were simultaneously influenced with the outer loading and temperature range.

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

Залізобетон отримав широкого розповсюдження в якості конструкцій будівель та споруд. Під час експлуатації конструкції зазнають негативного впливу оточуючого середовища, що, з часом, призводить до накопичення ушкоджень і їх фізичної зношеності.

Задачі відновлення або підвищення несучої здатності залізобетонних конструкцій тривалий час вирішувалися шляхом збільшення їх перерізів, встановленням дублюючих елементів, зміною розрахункових та геометричних схем конструкцій, тощо. Одним із нових методів підсилення конструктивних елементів є застосування зовнішнього армування у вигляді композитних стрічок та полотен.

Накопичений світовий і вітчизняний досвід застосування композиційних матеріалів для підсилення будівельних конструкцій є позитивним, тобто у всіх випадках підсилені конструкції перебувають в експлуатаційному стані, і відмови зовнішньої арматури з композиційних матеріалів не спостерігається [1].

На теперішній час в існуючих нормах та рекомендаціях з проектування підсилення конструкцій композиційними матеріалами, відсутні розрахункові параметри, які б дозволили враховувати реальні температурні умови оточуючого середовища, як кліматичні, так і технологічні. Зважаючи на те, що значна кількість будівель та споруд зазнають впливу широкого діапазону температур, дослідження несучої здатності залізобетонних конструкцій підсиленних композитами, з врахуванням температурних факторів, є актуальним питанням.

Аналіз досліджень і публікацій. Розвиток сучасних композиційних матеріалів було обумовлено потребами авіації, космонавтики та суднобудування, де вони знайшли широке застосування. Композиційні матеріали на основі фібри, що застосовуються при ремонті і підсиленні будівельних конструкцій, виготовляються з видовжених мікрОВОЛОКОН, омонолічених в полімері, який зв'язує їх в єдине ціле. В якості полімеру, зазвичай, використовуються епоксидні і поліакрінітрілові смоли. За рахунок більшого модуля пружності та міцності на розтяг композиційні матеріали на основі вуглецевого волокна набули широкого використання при підсиленні залізобетонних конструкцій [2].

На теперішній час проведено значну кількість досліджень та випущено публікацій присвячених підсиленню конструкцій композиційними матеріалами, їх розрахунку та проектуванню [3...7]. Проведені дослідження дозволили розробити методики розрахунку конструкцій підсиленних композиційними матеріалами. За кордоном розроблено велику кількість стандартів та правил, які регламентують питання проектування та підсилення залізобетонних конструкцій полімерними матеріалами [8...10]. На превеликий жаль в нашій країні при виконанні підсилення композитами потрібно задовольнятися нормами інших країн, рекомендаціями компаній постачальників композиційних матеріалів, експериментальними методиками розробленими окремими дослідниками.

Аналіз норм та рекомендацій показав, що існуючі формули з розрахунку конструкцій підсилених композитами не враховують температурні умови оточуючого середовища в якому перебувають конструкції. Встановлено [3, 4, 11], що величина коефіцієнта температурного розширення, для вуглецевих волокон, від’ємна і знаходиться в межах $-0,6...-1,45$. При цьому, коефіцієнт температурного розширення, арматури і бетону є додатною величиною $\sim 10,40$ [4]. Відповідно при нагріванні вуглецеві волокна композиційних матеріалів вкорочуються, а прямолінійні елементи зі сталі і бетон подовжуються. Підвищення температури вуглецевих волокон композиційного матеріалу відносно температури, при якій відбувається затвердіння смоли епоксидного клею, викликає в ньому додаткові нормальні напруження. Охолодження підсилених залізобетонних конструкцій нижче цього ж рівня, навпаки знімає частину нормальних напружень в композиційному матеріалі за рахунок протилежного знаку коефіцієнта температурного розширення щодо бетону і металевої арматури.

Зважаючи на сказане, нормальні напруження в матеріалі підсилення пропонується визначати в залежності від температури при якій експлуатується конструкція (T_a) та температури за якої відбувається твердіння епоксидної смоли (T_f) [12]. Так, якщо виконується умова $T_a \geq T_f$, то граничні нормальні напруження в композиційному матеріалі визначаються за формулою [12]:

$$\Delta\sigma_{fu} = \sigma_{fu} - \sigma_{ft} \leq 0.9 R_{ft}, \quad (1)$$

де σ_{fu} – граничні нормальні напруження в композитному матеріалі, які визначаються за формулою (2), МПа [3];

σ_{ft} – нормальні напруження в композиційному матеріалі від впливу температури, які визначаються за формулою (3), МПа;

R_{ft} – розрахунковий опір композитного матеріалу розтягання, МПа.

$$\sigma_{fu} = k_f \sqrt{\frac{R_b E_f b_f}{\sum t_f}}, \quad (2)$$

$$\sigma_{ft} = (\alpha_f + \alpha_b)(T_a - T_f) E_f, \quad (3)$$

де α_f, α_b – коефіцієнт температурного розширення композиційного матеріалу та бетону, відповідно, $10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$;

E_f – модуль пружності композиційного матеріалу, МПа;

t_f – товщина одного шару композиційного матеріалу, мм;

k_f – коефіцієнт, який враховує тип конструкції підсилення;

b_f – розрахункова ширина смуги підсилення, $b_f = 1$ мм.

Якщо виконується умова $T_a < T_f$, то граничні нормальні напруження визначаються за формулою [12]:

$$\Delta\sigma_{fu} = \sigma_{fu} + \sigma_{ft} \leq 0.9 R_{ft}. \quad (4)$$

Для випадку $T_a < T_f$ величина нормальних напружень в композиційному матеріалі визначається за формулою [12]:

$$\sigma_{ft} = (\alpha_f - \alpha_b) |T_a - T_f| E_f. \quad (5)$$

Викладені теоретичні залежності, безсумнівно, заслуговують на увагу, однак теоретичних моделей можна побудувати велику кількість, але вони нічого не будуть вартувати без результатів експериментальних випробувань, які б спростували або підтвердили коректність запропонованої методики розрахунку.

Постановка завдання. З огляду на викладений матеріал в даній роботі було проаналізовано, існуючи на теперішній час, результати експериментальних випробувань залізобетонних конструкцій підсилених композиційними матеріалами за умови впливу двох факторів – навантаження та температури [4, 5, 12, 13]. Порівняння останніх з теоретичними результатами несучої здатності конструкцій, розрахованих за наведеною методикою, дозволить дійти висновків про можливість її застосування для розробки моделей деформування такого типу конструкцій.

Викладення матеріалу та результати. Згідно до означеної мети було проведено статистичну обробку та порівняння результатів експериментальних досліджень по визначенню впливу зміни температур на несучу здатність залізобетонних конструкцій підсилених композиційними матеріалами

виконаних в різний час окремими дослідниками [4, 5, 12, 13]. За результатами проведеної роботи було визначено, що більш ретельно дане питання розглянуто в роботі [12], а інші результати [4, 5, 13] добре корелюють з ними.

Експериментальним випробуванням підлягали дві серії залізобетонних балок А та Б [12]. Балки серії А підсиленню не підлягала, а серії Б підсилювались в розтягнутій зоні наклеюванням вуглецевих полотен (FibARM Tare). Зразки випробувалися за схемою шарнірно опертої балки навантаженої в третинах прольоту. При цьому балки серії А випробувалися при температурі навколишнього середовища +30 °С, а серії Б при температурах +90, +60, +30, 0, -30, -60, °С.

Усереднені величини експериментальних показників міцності балок за серіями наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Експериментальні величини несучої здатності зразків

№	Серія	Температура, °С	P_{cp} , кН	Приріст міцності балок, %
1	2	3	4	5
1	А	+ 30	61	100
2	Б	+ 30	118	195
3		+60	105	174
4		+90	58	95
5		0	131	216
6		-30	121	199
7		-60	123	203

Примітка. P_{cp} – середня величина руйнівного навантаження балок при згині.

Аналіз таблиці 1 дозволяє дійти висновку, що підсилення залізобетонних балок вуглецевими полотнами дозволило збільшити їх несучу здатність в межах 174...216%. Виключення склали балки серії Б, які випробувалися при температурі навколишнього середовища +90 °С. Їх несуча здатність склала 95% від руйнівного навантаження балок серії А. Останнє пояснюється розм'якшенням епоксидного клею від впливу температури, після чого сумісна

робота балки та матеріалу підсилення була порушена і він не чинив опору діючому навантаженню.

Порівняння експериментальних результатів несучої здатності балок з теоретичними, розрахованими за формулами (1...5), наведені в таблиці 2.

Дані наведені в таблиці 2 свідчать про те, що різниця між теоретичною величиною руйнівного навантаження і експериментальними величинами цього навантаження знаходиться в межах 5...21%. При цьому тільки для одного випадку розбіжність перевищила 15%, які вважаються прийнятними при проведенні такого типу розрахунків.

Таблиця 2

Експериментальні та розрахункові величини несучої здатності зразків

№	Серія	Температура, °С	P_{cp} , кН	P_{tr} , кН	P_{cp} / P_{tr}
1	2	3	4	5	6
1	А	+30	61	-	-
2	Б	+30	118	102,34	1,15
3		+60	105	100,52	1,05
4		+90	58	51,23	1,13
5		0	131	107,93	1,21
6		-30	121	108,87	1,11
7		-60	123	109,82	1,12

Примітка. P_{tr} – розрахункова величина руйнівного навантаження.

Найбільшу розбіжність в 21% було отримано для балок, які випробовувалися при температурі 0 °С. Зважаючи на те, що коефіцієнти температурного розширення бетону та вуглецевого полотна мають за своєю величиною різні знаки, коливання температур може призводити до збільшення або зменшення величини напруження від діючого навантаження. Формули (1...5) повинні були врахувати ці температурні впливи. В той же час, в даній методикі розрахунку [12], не запропонована так звана “точка відліку”, тобто температура при якій вплив температури оточуючого середовища на напружено-деформований стан конструкцій практично відсутній і їх потрібно

розраховувати за стандартною методикою, без температурної складової. Попередньо можна зробити висновок, що при температурі 0 °С, вплив температури є мінімальним і розрахунок з врахуванням температурної складової призведе до надмірного запасу міцності такої конструкції. Зрозуміло, що останнє припущення повинно бути підтверджено або спростовано результатами додаткових теоретично-експериментальних досліджень.

Висновки та напрямок подальших досліджень. Викладені відомості про особливості роботи залізобетонних балок підсилених вуглецевими полотнами за умови впливу додатних і від'ємних температур дає підстави стверджувати, що температура, як зовнішній фактор, впливає на несучу здатність балок.

Наведена методика розрахунку залізобетонних конструкцій підсилених зовнішнім армуванням композитами з врахуванням впливу температур, в переважачій більшості випадків, показала задовільну збіжність теоретичних і експериментальних величин несучої здатності зразків. Використання даної методики розрахунку при проектуванні підсилення залізобетонних конструкцій композиційними матеріалами дозволить підвищити ступінь надійності конструкцій, що підсилюються за рахунок врахування впливу температур при яких вона експлуатується.

Література

1. И.Г. Овчинников, Ш.Н. Валиев, В.С. Зиновьев Вопросы усиления железобетонных конструкций композитами. Наукоеведение [Электронный ресурс]: науч. журнал / Ин-т. Гос. Управ., права и иннов. техн. – Электрон. журн. – М.: ИГУПИТ, 2012. – №4. – Режим доступа: <http://publ.naukovedenie.ru>, свободный.
2. Шилин А.А., Пшеничный В.А., Картузов Д.В. Внешнее армирование железобетонных конструкций композиционными материалами. – М., ОАО «Издательство «Стройиздат», 2007. 181 с.
3. Неровных, А. А. Совершенствование методики оценки грузоподъемности железобетонных пролетных строений железнодорожных мостов, усиленных композиционными материалами : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.11 / Неровных Алексей Алексеевич. – Новосибирск, 2013. – 201 с.
4. 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.
5. Смердов, М. Н. Предложения по учету влияния положительных температур в методике расчета нормальных сечений изгибаемых железобетонных элементов, усиленных

- полимерными композиционными материалами / М. Н. Смердов, Д. Г. Неволин, А. О. Клементьев, Д. Н. Смердов // *Инновационный транспорт*. – 2015. – №3. – С. 80–83.
6. Климпуш М.Д. Міцність, витривалість та деформативність залізобетонних згинальних елементів, підсилених наклеєними композитними стрічками: дис. канд. техн. наук: 05.23.01 / М.Д. Климпуш // Київ, 2010. – 259 с.
7. Мельник І.В. Експериментальні дослідження міцності, жорсткості і тріщиностійкості залізобетонних балок, підсилених вуглепластиками при різних рівнях попереднього навантаження / І.В. Мельник, Р.З. Добрянський, Н.Б. Давидовський // *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. – Рівне: НУВГП, 2011. – Вип. 22. – С. 814 – 821.
8. ISO 14130:1997 Fibre-reinforced plastic composites - Determination of apparent interlaminar shear strength by short-beam method.
9. CNR-DT 200/2004. Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures. – Rome, 2004. – 144 p.
10. Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures. ACI 440.2R-08. American Concrete Institute.
11. СП 164.1325800.2014 Усиление железобетонных конструкций композитными материалами. Правила проектирования. – М. : Минстрой России, 2015. – 52 с.
12. Смердов М. Н. Исследование несущей способности железобетонных конструкций горнотехнических зданий и сооружений, усиленных композиционными материалами, с учетом температурных факторов: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 25.00.22 / Смердов Михаил Николаевич. – Екатеринбург, 2016. – 16 с.
13. 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.