

П.М. Фірсов, С.М. Золотов, С.О. Надточій

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Україна

АНАЛІЗ ТРІЩИНОУТВОРЕННЯ ТА ДЕФОРМАТИВНОСТІ ЗГІНАЛЬНИХ БЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ АРМОВАНИХ КОМПОЗИТНОЮ АРМАТУРОЮ

В науковій роботі проведений аналіз існуючих методик розрахунку згинальних конструкцій, армованих композитною арматурою, за деформаціями та за утворенням тріщин. Проведено порівняння результатів натурних випробувань з результатами теоретичних розрахунків по прогнозуванню тріщиноутворення відповідно до рекомендацій стандартів Eurocode 2 та ACI 440.1R-15. Розраховане співвідношення між експериментальними та прогнозованими величинами прогинів.

Ключові слова: розрахунок, навантаження, тріщиноутворення, композитна арматура, бетон, балка.

Постановка проблеми

Бетон – це найбільш поширений будівельний матеріал у світі. Для того щоб подолати його низьку міцність на розтяг, бетонні конструкції зазвичай армують сталевими арматурними стрижнями. Застосування арматури неметалевої композитної (АНК) у бетонних конструкціях стало альтернативою класичній сталевій арматурі, насамперед через корозію сталі в агресивних середовищах. Основою АНК є матеріал, який утворений з композитного волокна (базальт, скло, арамід) і сполучного – термореактивної синтетичної смоли (пластик). В країнах ЄС та Північної Америки АНК широко використовується вже понад 30 років для армування різних видів конструкцій [1–3].

Відомо, що композитна арматура не поводить себе так само, як сталева арматура, оскільки в багатьох випадках їх механічні властивості суттєво відрізняються. Композитні вироби мають вищу міцність, але менший модуль пружності, тому безпосередня заміна сталі на дану арматуру не завжди можлива відповідно до багатьох конструкційних вимог [4]. Одним із найважливіших параметрів, який слід враховувати при проєктуванні конструкцій армованих АНК, є придатність до експлуатації (другий граничний стан). Це пов'язано із загальним низьким модулем пружності композитної арматури, який дорівнює приблизно $0,25E_s$ сталі [5]. Двома основними критеріями при розрахунках за другою групою граничних станів є прогин (перевірка деформацій) і тріщиноутворення. При цьому важливо, щоб прогин конструкції залишався у нормованих межах, для того щоб будівля залишалася функціональною. Розмір і розширення тріщин пов'язані з прогином, але ширина розкриття обмежена через вплив навколишнього середовища і, головним чином, через руйнування сталевих арматур. Так само загальновідомо, що композитна арматура не піддається впливу зовнішнього середовища, на відміну від сталі.

Розрахунок прогину, спричиненого короткочасним навантаженням, можна виконати за допомогою досить простого рівняння, обчисливши ефективний момент інерції, який враховує жорсткість перерізу в поєднанні з модулем пружності бетону. При розрахунку прогину від тривалого навантаження вже необхідно враховувати більшу кількість параметрів, що робить його достатньо складним процесом. Основні розрахункові параметри – це величина і тривалість навантаження, а також характеристики матеріалу: повзучість і усадка бетону, утворення нових тріщин і розширення існуючих. При порівнянні залежності прогину від часу внаслідок усадки та повзучості конструкції армованої композитною арматурою з конструкцією армованою сталлю криві залежності часу від прогину подібні [6]. Це означає, що в подібних розрахунках можна використовувати однаковий фундаментальний підхід, тому при коректному підборі мінімальної товщини перерізу та адаптації рівня напружень в арматурних стрижнях під час експлуатації переріз із армуванням композитною арматурою може мати таке ж саме співвідношення прольоту до прогину, як і переріз конструкції армований сталлю [7].

Отже, відсутність вичерпної інформації про експлуатаційні характеристики, а також недосконалість чинних будівельних норм в Україні обумовлюють необхідність проведення теоретично-прикладних досліджень різних типів бетонних конструкцій з армуванням композитними виробами.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Для розрахунку конструкцій армованих композитною арматурою протягом багатьох років у закордонних країнах розвивалися відповідні нормативні стандарти. Перші проєкти стандартів щодо армування бетонних конструкцій АНК були опубліковані в Японії на початку 1990-их років. Після цього в 1996 році комісією Eurocrete були опубліковані

перші рекомендації для країн ЄС – Eurocode, в 1996 році в Канаді – CSA/ISIS, в 1998 році в Сполучених Штатах Америки – ACI. Рекомендації American Concrete Institute, розроблені комітетом 440 ACI, кілька разів оновлювалися і надалі багато інших країн при впровадженні власних норм посилались саме на даний документ.

Варто зазначити, що існуючі норми та рекомендації щодо розрахунку конструкцій з АНК здебільшого є модифікацією норм з розрахунку залізобетонних конструкцій зі сталеву арматурою. Зміни в основному пов'язані з нормуванням фізико-механічних властивостей арматури та ряду емпіричних співвідношень, які базуються на результатах експериментальних досліджень [8].

В Україні з 2013 року введена в дію “Настанова з проектування та виготовлення бетонних конструкцій з неметалевою композитною арматурою на основі базальто- і склоровінгу”. Цей нормативний документ розроблений на основі теоретичних і експериментальних досліджень, виконаних під керівництвом проф. Клімова Ю. А. [9, 10]. У даній Настанові розрахунок конструкцій з АНК регламентовано виконувати згідно діючих в Україні норм розрахунку залізобетонних конструкцій, замінюючи розтягнуту сталеву арматуру на композитну з врахуванням лінійної діаграми роботи АНК та її розрахункової міцності. При цьому в розрахунок за другою групою граничних станів конструкцій з АНК гранична ширина розкриття тріщин не повинна перевищувати 0,4 мм, якщо встановлюються вимоги прийнятного зовнішнього вигляду, і 0,8 мм – в інших випадках. У зарубіжних нормах також гранична ширина розкриття тріщин у конструкціях з АНК приймається більшою, ніж у залізобетонних.

Формулювання мети дослідження

Метою дослідження є аналіз існуючих методик розрахунку згинальних конструкцій, армованих АНК, за деформаціями та за утворенням тріщин з подальшим порівнянням результатів натурних випробувань експериментальної конструкції з результатами теоретичних розрахунків по прогнозуванню тріщиноутворення відповідно до рекомендацій чинних стандартів.

Виклад основного матеріалу

Розрахунки за другою групою граничних станів в зарубіжних нормах включають розрахунки за деформаціями та за утворенням і розкриттям тріщин, які виконуються при дії нормативних навантажень. Також у них додатково виконується перевірка міцності з врахуванням дії тривалих і багатоциклових навантажень за методом допустимих напружень.

Розрахунковий прогин визначається за загальною методикою розрахунку залізобетонних елементів з врахуванням особливостей роботи конструкцій з АНК. У розрахунках за другою групою граничних станів припускається, що бетон армований сталеву арматурою має умовну лінійну пружність, таке ж припущення використовується і для бетону армованого композитними стрижнями.

На рис. 1 приведена спрощена версія досліджуваного перерізу. Момент інерції площі перерізу в пружній стадії без тріщин дорівнює повному моменту інерції I_g . Тріщини в перерізі починають утворюватись, коли прикладений момент перевищує момент тріщиноутворення M_{cr} . В подальшому це зменшує жорсткість елемента через зусилля розтягу, яке сприймає тільки арматура [11].

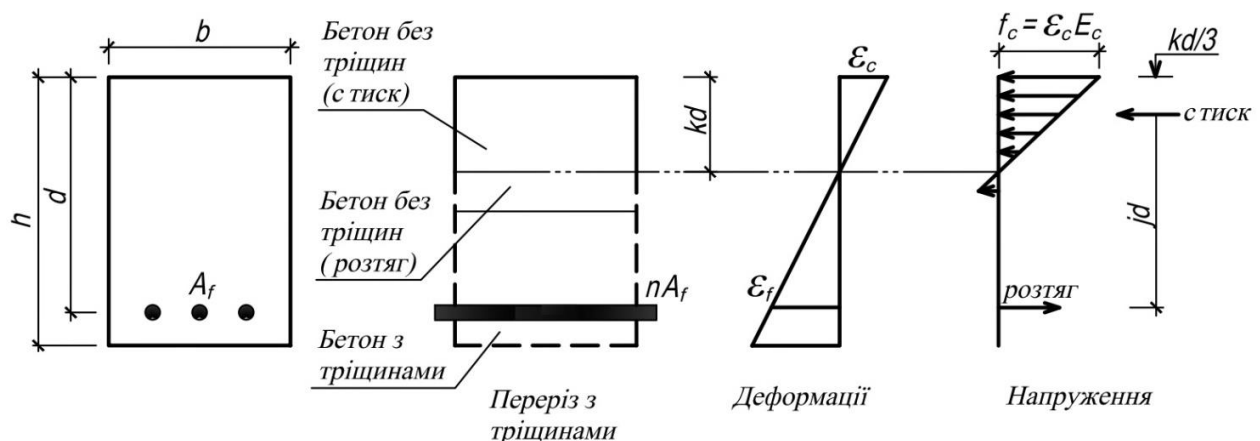


Рис. 1. Переріз з тріщинами навантаженої балки

1. У будівельних нормах США ACI 440.1R-15 розглядається прямокутний переріз з одним рядом армування композитною арматурою. Проте представлена концепція також можна застосовувати до еле-

ментів з різною геометрією та кількома рядами армування. Для армованого прямокутного перерізу, момент інерції перерізу з тріщинами розраховується за допомогою аналізу еластичності (жорсткість арматур-

них стрижнів до бетону).

$$I_{cr} = \frac{bd^3}{12} k^3 + n_f A_f d^2 (1-k)^2, \quad (1)$$

де n_f – це співвідношення між модулями пружності бетону та композитної арматури.

$$k = \sqrt{2\rho_f n_f + (\rho_f n_f)^2} - \rho_f n_f. \quad (2)$$

Момент тріщиноутворення оцінюється як:

$$M_{cr} = \frac{0,62\lambda\sqrt{f_c}I_g}{\gamma_t}, \quad (3)$$

де λ – коефіцієнт, який враховує щільність бетону (для нормального бетону $\lambda = 1$).

Для визначення жорсткості момент інерції з'являється з модулем пружності бетону. Оскільки жорсткість змінюється між $E_c I_g$ та $E_c I_{cr}$, в розрахунок вводиться ефективний момент інерції. Тому перехід від I_g до I_{cr} має бути поступовим. Вираз для обчислення I_e приведений нижче:

$$I_e = \frac{I_{cr}}{1 - \gamma \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^2 \left[1 - \frac{I_{cr}}{I_g} \right]} \leq I_g, \quad (4)$$

де $M_a \geq M_{cr}$.

Коефіцієнт інтеграції γ залежить від співвідношення між моментом тріщиноутворення та прикладеним моментом, для балки з простим обпиранням на дві опори і двома рівними точковими навантаженнями:

$$\gamma = \frac{3(a/L) - 4\xi(a/L)}{3(a/L) - 4(a/L)}, \quad (5)$$

$$\xi = 4 \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right) - 3. \quad (6)$$

Для балки з простим обпиранням на дві опори і одним точковим навантаженням:

$$\gamma = 3 - 2 \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right). \quad (7)$$

Коефіцієнт армування становить:

$$\rho_f = \frac{A_f}{b \times d}. \quad (8)$$

Якщо $M_a < M_{cr}$ (але з невеликою різницею), прогин буде значно занижено з використанням загальних властивостей перерізу. Це відбувається через утворення тріщин в бетоні від усадки і міцність бетону на розтяг може змінюватися в елементі.

Остаточний прогин розраховується за допомогою наступного рівняння:

$$\Delta = \frac{P \times a(3L^2 - 4a^2)}{48E_c I_e}. \quad (9)$$

2. У стандарті ЄС Eurocode 2 перший крок для розрахунку прогинів полягає у визначенні жорсткості перерізу без тріщин, тобто для випадку коли бетон сприймає всі прикладені навантаження.

$$E_c = 22000 \left(\frac{f_c + 8}{10} \right)^{0,3}, \quad (10)$$

$$EI_I = E_c \frac{b \times h^3}{12}. \quad (11)$$

Для розрахунку жорсткості перерізу з тріщинами вводиться коефіцієнт розподілу, який враховує напруження розтягу:

$$\zeta_f = n_f \times \rho_f \times \left(\sqrt{1 + \frac{2}{n_f \times \rho_f}} - 1 \right). \quad (12)$$

Жорсткість перерізу з тріщинами:

$$EI_{II} = 0,5 \times b \times d^3 \times \zeta_f \times E_c \times \left(1 - \frac{\zeta_f}{3} \right). \quad (13)$$

Прогин в обох станах тепер можна розрахувати за формулами:

$$\Delta_I = \frac{P \times a(3L^2 - 4a^2)}{48EI_I}, \quad (14)$$

$$\Delta_{II} = \frac{P \times a(3L^2 - 4a^2)}{48EI_{II}}. \quad (15)$$

Розташування нейтральної вісі зверху:

$$y_t = \frac{bh \times \frac{h}{2} + (n_f - 1) \times A_f d}{bh + (n_f - 1) \times A_f}. \quad (16)$$

Момент тріщиноутворення:

$$M_{cr} = \frac{f_{ctm} \times \frac{bh^3}{12}}{y_t} \quad (17)$$

Коефіцієнт розподілу ζ (з урахуванням жорсткості розтягу в перерізі):

$$\zeta = 1 - \beta \left(\frac{M_{cr}}{M_{Ed}} \right)^2 \quad (18)$$

У цьому випадку для короткочасних навантажень $\beta = 1$.

Остаточний прогин перерізу оцінюється як:

$$\Delta = \zeta \Delta_{II} + (1 - \zeta) \Delta_I \quad (19)$$

3. Станом на теперішній час в Україні діє Настанова ДСТУ-Н Б В.2.6-185:2012, яка регламентує розрахунок елементів з АНК за граничними станами першої та другої груп. Розрахунок за утворенням нормальних тріщин виконується на основі діаграми стану відповідної композитної арматури, величин розрахункових опорів розтягнутого і стиснутого бетону, а також гіпотези плоских перерізів. Критерієм утворення тріщин є досягнення граничних відносних деформацій у розтягнутому бетоні на рівні нижнього шару робочої арматури.

Розрахунок прогинів елементів з АНК необхідно виконувати з урахуванням можливого утворення тріщин. Для елементів, які переважно зазнають дію згину, остаточний прогин визначається з урахуванням деформаційної характеристики a за формулою:

$$a = \zeta a_{II} + (1 - \zeta) a_I \quad (20)$$

де a – деформаційна характеристика, що розглядається (жорсткість або кривина);

a_I, a_{II} – параметри, обчислені для стану без тріщин та з тріщинами;

ζ – коефіцієнт розподілу, який враховує зниження жорсткості у перерізі розтягу.

Коефіцієнт розподілу визначається у відповідності до рекомендацій Eurocode 2 через величини напружень у розтягнутій АНК:

$$\zeta = 1 - \beta \left(\frac{\sigma_{f,r}}{\sigma_f} \right)^2 \quad (21)$$

де β – коефіцієнт, що враховує вплив тривалості навантаження на середню деформацію, $\beta = 1,0$ для короткочасних навантажень;

σ_f – напруження у розтягнутій АНК;

$\sigma_{f,r}$ – напруження у розтягнутій АНК за умови навантаження, що викликає появу першої тріщини.

Вираз (21) також може бути представлений через співвідношення моменту тріщиноутворення M_{cr} до розрахункового зовнішнього згинального моменту M_{Ed} відповідно до (18), тому можна вважати, що методика ДСТУ в цілому корелює з рекомендаціями Eurocode 2.

При цьому необхідно пам'ятати, що вертикальні прогини елементів конструкцій не мають перевищувати значення наведені у відповідних нормативних стандартах. Наприклад, відповідно до п. 7.4.1 Eurocode 2 прогин не має перевищувати $L/250$, щоб зберегти функціональність конструкції та її естетичний вид.

Для проведення розрахунків по прогнозуванню тріщиноутворення, згідно рекомендацій вищевказаних стандартів, розглянемо модель балки з комбінованим армуванням (сталь + АНК) з наступною геометрією. Досліджувана модель має ширину 150 мм, висоту 200 мм і загальну довжину 2100 мм. Відстань між опорами становить 1800 мм, “чистий проліт” в центрі перерізу балки – 600 мм. Балка складається з двох половинок (в кожній з яких встановлений просторовий каркас), з'єднаних між собою в розтягнутій зоні двома наскрізними поздовжніми стрижнями модифікованої скло-пластикової арматури, із зовнішнім піщаним покриттям [12–15], діаметром 10 мм (рис. 2).



Рис. 2. Композитна склопластикові арматура з навивкою та зовнішнім піщаним покриттям

Балка запроєктована з двома плоскими каркасами, для того щоб уникнути руйнування через зсув, тоді як у зоні постійного моменту – КП відсутні (рис. 3).

Характеристики матеріалів. Бетон класу С32/40: міцність бетону на стиск $f_c = 40$ МПа, міцність бетону на розтяг $f_{ctk} = 2,1$ МПа, модуль пружності $E_c = 32$ ГПа.

Сталева арматура класу А400С (низьколегована сталь 35ГС) діаметром 14 мм: площа поперечного перерізу $A_s = 308$ мм², модуль пружності $E_s = 200$ ГПа, міцність арматури на межі текучості $f_y = 390$ МПа, тимчасовий опір розтягу $f_u = 590$ МПа.

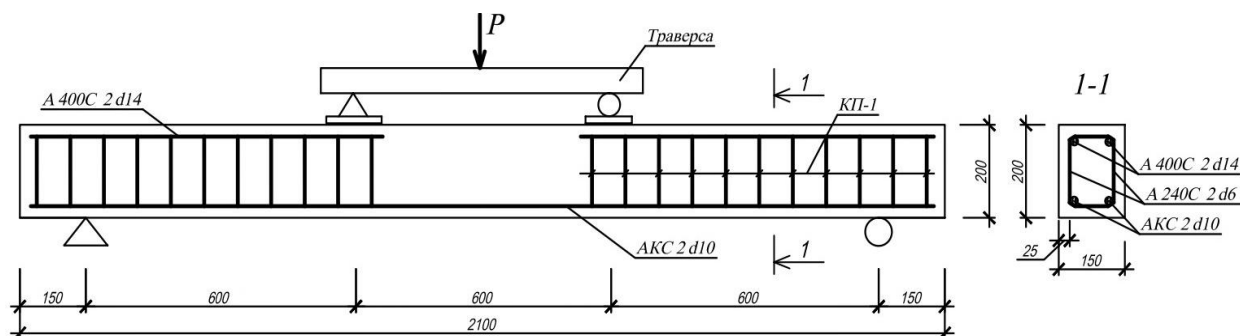


Рис. 3. Схема та переріз експериментальної балки

Модифікована арматура неметалева композитна склопластикова (АКС-1000/50-10) діаметром 10 мм: площа поперечного перерізу $A_f = 157 \text{ мм}^2$, модуль пружності $E_f \approx 50 \text{ ГПа}$, тимчасовий опір розтягу $f_{tu} = 1000 \text{ МПа}$. Основні механічні характеристики модифікованої АКС були встановлені під час попередніх наукових досліджень даного виду арматури [16, 17].

Випробування проводились в лабораторних умовах на гідравлічному пресі марки ПСУ-250. В середині перерізу балки був розташований прогиномір 6ПАО з точністю 0,001 мм для визначення лінійного вертикального переміщення під час прикладання відповідних навантажень. Під час проведення випробувань фіксувалась поява першої тріщини в середині зони дії постійного моменту разом з відповідним навантаженням тріщиноутворення (рис. 4).



Рис. 4. Випробування балки на згин

Для досліджуваного зразка фактичне навантаження появи першої тріщини становить $P_{cr} = 11,4 \text{ кН}$. Прогнозовані величини навантаження тріщиноутворення визначалась за формулами (3) та (17) та були зведені в табл. 1.

При порівнянні результатів можна побачити, що Eurocode 2 забезпечує більш наближені прогнози навантаження тріщиноутворення ніж ACI 440.1R-15.

Таблиця 1

Експериментальні та прогнозовані значення навантаження тріщиноутворення

Експериментальне значення	Співвідношення експериментальних і прогнозованих значень	
	EC2 $P_{cr'}$ (P_{exp} / P_{pred})	ACI $P_{cr'}$ (P_{exp} / P_{pred})
11,4	0,89	0,85

Також за результатами експериментальних випробувань була побудована крива «навантаження–прогин» в середині прольоту балки, яка представляє собою типове білінійне співвідношення (рис. 5).

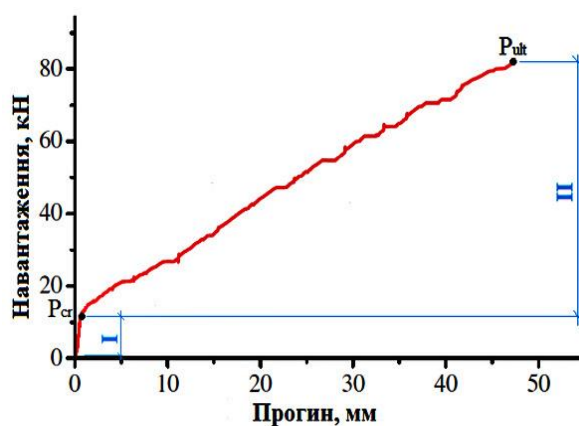


Рис. 5. Графік залежності «навантаження–прогин»

Перший етап (I) характеризує поведінку балки без тріщин. На цьому етапі поведінка балки контролюється загальним моментом інерції перерізу (I_g). Другий етап (II) характеризує поведінку балки із тріщинами від моменту тріщиноутворення до моменту повного руйнування, тобто жорсткість перерізу зменшується коли $M_a > M_{cr}$ і відбувається поширення тріщин, а ефективний момент інерції I_e розраховується за формулою (4). При цьому ACI 440.1R-15 також пропонує введення коефіцієнта інтеграції у (5) для урахування зміни жорсткості по довжині елемента. Граничне руйнівне навантаження стано-

вить $P_{ult} = 81,8$ кН. Далі, відповідно до розрахункових методик аналізованих стандартів, був розроблений графік порівняння між експериментальними та прогнозованими прогинами в середині прольоту балки (рис. 6). В табл. 2 приведено співвідношення між експериментальними та прогнозованими величинами прогинів, при $0,3P_{ult}$, $0,67P_{ult}$ та P_{ult} , розрахованими на основі EC2 та ACI.

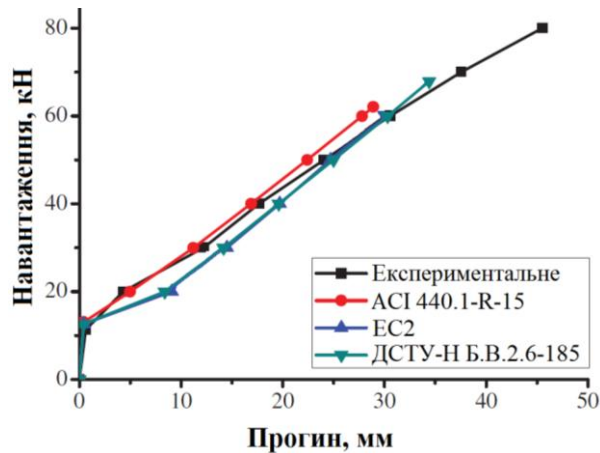


Рис. 6. Порівняння прогнозованих прогинів з експериментальним значенням

Таблиця 2

Експериментальні та прогнозовані значення прогинів

Експериментальні значення, мм		
$0,3P_{ult}$	$0,67P_{ult}$	P_{ult}
8,1	26,6	47,2
EC2, $\Delta_{exp} / \Delta_{pred}$		
$0,3P_{ult}$	$0,67P_{ult}$	P_{ult}
0,87	1,18	1,40
ACI, $\Delta_{exp} / \Delta_{pred}$		
$0,3P_{ult}$	$0,67P_{ult}$	P_{ult}
0,93	1,38	1,63

Відповідно до розрахункових даних можна зробити висновок, що обидва нормативи забезпечують достатньо наближений прогноз при $0,3P_{ult}$.

Висновки

1. Проведено детальний аналіз існуючих нормативних методик розрахунку згинальних конструкцій, армованих арматурою неметалевою композитною (АНК), за деформаціями та за утворенням тріщин. Існуючі закордонні та вітчизняні норми та рекомендації щодо розрахунку конструкцій з АНК є переважно модифікацією норм з розрахунку залізобетонних конструкцій зі сталеву арматурою. Зміни в основному пов'язані з нормуванням фізико-механічних властивостей композитної арматури та ряду емпіричних співвідношень.

2. Проведено порівняння результатів натурних

випробувань експериментальної балки з армуванням АНК з результатами теоретичних розрахунків по прогнозуванню тріщиноутворення відповідно до рекомендацій чинних закордонних стандартів Eurocode 2 та ACI 440.1R-15. При порівнянні результатів можна побачити, що EC2 забезпечує більш наближені прогнози навантаження тріщиноутворення, ніж ACI 440.1R-15.

3. Визначені прогини в середині прольоту балки від моменту тріщиноутворення до моменту повного руйнування. Побудована експериментальна крива «навантаження–прогин». Розраховане співвідношення між експериментальними та прогнозованими величинами прогинів за методиками EC2 та ACI. Відповідно до розрахункових даних обидва нормативи забезпечують достатньо наближений прогноз при $0,3P_{ult}$.

4. Результати даної роботи можуть бути використані для проектування бетонних конструкцій, армованих неметалевими композитними стрижнями (на основі волокон зі скла, базальту, вуглецю, арамиду тощо), проте необхідні подальші дослідження конструктивних елементів, що працюють на згин при різних умовах навантажень, та статистично обґрунтоване підтвердження.

Література

1. Kinjawadekar T. A. Critical Review on Glass Fiber-Reinforced Polymer Bars as Reinforcement in Flexural Members / T. Kinjawadekar, S. Patil, G. Nayak // *Journal of The Institution of Engineers (India): Series A.* – 2023. – Vol. 104. – P. 501–516. – DOI: [10.1007/s40030-023-00729-6](https://doi.org/10.1007/s40030-023-00729-6).
2. FRP reinforcement for concrete structures: state-of-the-art review of application and design / E. Gudonis, E. Timinskas, V. Gribniak, G. Kaklauskas, A. K. Arnautov, V. Tamulėnas // *Engineering Structures and Technologies.* – 2013. – Vol. 5 (4). – P. 147–158. – DOI: [10.3846/2029882X.2014.889274](https://doi.org/10.3846/2029882X.2014.889274).
3. Sonnenschein R. FRP Composites and their Using in the Construction of Bridges / R. Sonnenschein, K. Gajdosova, I. Holly // *Procedia Engineering.* – 2016. – Vol. 161. – P. 477–482. – DOI: [10.1016/j.proeng.2016.08.665](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.665).
4. Durability issues of FRP rebars in reinforced concrete members / F. Ceroni, E. Cosenza, M. Gaetano, M. Pecce // *Cement and Concrete Composites.* – 2006. – Vol. 28 (10). – P. 857–868. – DOI: [10.1016/j.cemconcomp.2006.07.004](https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.07.004).
5. Enhancement in Elastic Modulus of GFRP Bars by Material Hybridization / D.-W. Seo, K.-T. Park, Y.-J. You, H.-Y. Kim // *Engineering.* – 2013. – Vol. 5 (11). – P. 865–869. – DOI: [10.4236/eng.2013.511105](https://doi.org/10.4236/eng.2013.511105).
6. Kara I. F. Deflection of concrete structures reinforced with FRP bars / I. F. Kara, A. F. Ashour, C. Dundar // *Composites Part B: Engineering.* – 2013. – Vol. 44 (1). – P. 375–384. – DOI: [10.1016/j.compositesb.2012.04.061](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.04.061).
7. Xu X. S. Characteristics and Influencing Factors of Deflection in Concrete Beams Reinforced with FRP Bars / X. S. Xu, H. D. Zhang, X. D. Xu // *Applied Mechanics and Materials.* – 2012. – Vol. 166–169. – P. 1818–1823. – DOI: [10.4028/www.scientific.net/AMM.166-169.1818](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.166-169.1818).
8. Experimental Study on Mechanical Properties of Novel FRP Bars with Hoop Winding Layer / Y. Liu, H.-T. Zhang, H.-H. Zhao, L. Lu, M.-Y. Han, J.-C. Wang, S. Guan // *Advances in Materials Science and Engineering.* – 2021. – Vol. 2021. – Article 9554687. – DOI: [10.1155/2021/9554687](https://doi.org/10.1155/2021/9554687).

9. Климів Ю. А. Експериментальні дослідження зчеплення композитної неметалевої арматури з бетоном / Ю. А. Климів, О. С. Солдатченко, Д. О. Орешкин // Вісник Національного університету "Львівська Політехніка". – Львів : НУЛПІ, 2010. – Вип. 662. – С. 207–214.
10. Климів Ю. А. Дослідження зчеплення арматури з підвищеною корозійною стійкістю з бетоном / Ю. А. Климів, П. С. Боденчук, О. С. Солдатченко // Містобудування та територіальне планування : наук.-техн. зб. / Київ. нац. ун-т буд-ва і архіт. – Київ : КНУБА, 2011. – Вип. 40 (1). – С. 454–460. – Режим доступу: <http://repository.knuba.edu.ua/handle/987654321/10328>, вільний (дата звернення: 20.10.2023).
11. Масюк Г. Х. Аналіз тріщиноутворення в згинальних залізобетонних елементах за дії знакозмінних малоциклових навантажень на основі розрахункової моделі опору залізобетону / Г. Х. Масюк, О. І. Корнійчук, І. І. Алексієвцев // Ресурсоєкономічні матеріали, конструкції, будівлі та споруди : зб. наук. праць / Нац. ун-т вод. госп-ва та природокористування. – Рівне : НУВГП, 2016. – Вип. 32. – С. 213–219. – Режим доступу: <http://ep3.nuwm.edu.ua/id/eprint/5685>, вільний (дата звернення: 20.10.2023).
12. Research of the adhesion level of fiberglass composite reinforcement HARD+ with concrete / V. Shmukler, P. Firsov, A. Naboka, O. Akimenko // Proceedings of the 9th International Scientific Conference "Reliability and Durability of Railway Transport Engineering Structures and Buildings" (TransBud 2021), Kharkiv (Ukraine), November 17–19, 2021 yr. – AIP Conference Proceedings, 2023. – Vol. 2684 (1). – Article 030040. – DOI: [10.1063/5.0120012](https://doi.org/10.1063/5.0120012).
13. Arias J. Use of sand coating to improve bonding between GFRP bars and concrete / J. Arias, A. Vazquez, M. Escobar // Journal of Composite Materials. – 2012. – Vol. 46 (18). – P. 2271–2278. – DOI: [10.1177/0021998311431994](https://doi.org/10.1177/0021998311431994).
14. The effect of various test configurations on the bond strength of sand-coated GFRP bars / O. Janus, F. Girgle, L. Bodnarova, V. Kostih, P. Stepanek // Proceedings of the 16th International Conference "Special Concrete and Composites 2019", Lisek (Czech Republic), October 16–17, 2019 yr. – AIP Conference Proceedings, 2020. – Vol. 2210 (1). – Article 020002. – DOI: [10.1063/5.0000386](https://doi.org/10.1063/5.0000386).
15. Bond performance of sand-coated and ribbed-surface glass fiber reinforced polymer bars in high-performance concrete / J. Lu, H. M. Afefy, H. Azimi, K. Sennah, M. Sayed-Ahmed // Structures. – 2021. – Vol. 34. – P. 10–19. – DOI: [10.1016/j.istruc.2021.07.060](https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.07.060).
16. Фірсов П. М. Розробка епоксиполімерних матриць для композитної арматури з підвищеним модулем пружності / П. М. Фірсов, П. А. Білим, Б. А. Каафарані // Комунальне господарство міст : наук.-техн. зб. / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2022. – № 4 (171). – С. 53–57. – (Серія: Технічні науки та архітектура). – DOI: [10.33042/2522-1809-2022-4-171-53-57](https://doi.org/10.33042/2522-1809-2022-4-171-53-57).
17. Фірсов П. М. Підвищення корозійної стійкості склопластикової арматури шляхом модифікації полімерного сполучного / П. М. Фірсов, П. А. Білим, С. О. Надточій // Комунальне господарство міст : наук.-техн. зб. / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2023. – № 1 (175). – С. 47–51. – (Серія: Технічні науки та архітектура). – DOI: [10.33042/2522-1809-2023-1-175-47-51](https://doi.org/10.33042/2522-1809-2023-1-175-47-51).

References

1. Kinjawadekar, T. A., Patil, S., & Nayak, G. (2023). A Critical Review on Glass Fiber-Reinforced Polymer Bars as Reinforcement in Flexural Members. *Journal of The*

- Institution of Engineers (India): Series A*, 104, 501–516. DOI: [10.1007/s40030-023-00729-6](https://doi.org/10.1007/s40030-023-00729-6)
2. Gudonis, E., Timinskas, E., Gribniak, V., Kaklauskas, G., Arnautov, A. K., & Tamulėnas, V. (2013). FRP reinforcement for concrete structures: state-of-the-art review of application and design. *Engineering Structures and Technologies*, 5(4), 147–158. DOI: [10.3846/2029882X.2014.889274](https://doi.org/10.3846/2029882X.2014.889274)
3. Sonnenschein, R., Gajdosova, K., & Holly, I. (2016). FRP Composites and their Using in the Construction of Bridges. *Procedia Engineering*, 161, 477–482. DOI: [10.1016/j.proeng.2016.08.665](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.665)
4. Ceroni, F., Cosenza, E., Gaetano, M., & Pecce, M. (2006). Durability issues of FRP rebars in reinforced concrete members. *Cement and Concrete Composites*, 28(10), 857–868. DOI: [10.1016/j.cemconcomp.2006.07.004](https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.07.004)
5. Seo, D.-W., Park, K.-T., You, Y.-J., & Kim, H.-Y. (2013). Enhancement in Elastic Modulus of GFRP Bars by Material Hybridization. *Engineering*, 5(11), 865–869. DOI: [10.4236/eng.2013.511105](https://doi.org/10.4236/eng.2013.511105)
6. Kara, I. F., Ashour, A. F., & Dundar, C. (2013). Deflection of concrete structures reinforced with FRP bars. *Composites Part B: Engineering*, 44(1), 375–384. DOI: [10.1016/j.compositesb.2012.04.061](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.04.061)
7. Xu, X. S., Zhang, H. D., & Xu, X. D. (2012). Characteristics and Influencing Factors of Deflection in Concrete Beams Reinforced with FRP Bars. *Applied Mechanics and Materials*, 166–169, 1818–1823. DOI: [10.4028/www.scientific.net/AMM.166-169.1818](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.166-169.1818)
8. Liu, Y., Zhang, H.-T., Zhao, H.-H., Lu, L., Han, M.-Y., Wang, J.-C., & Guan, S. (2021). Experimental Study on Mechanical Properties of Novel FRP Bars with Hoop Winding. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2021, 9554687. DOI: [10.1155/2021/9554687](https://doi.org/10.1155/2021/9554687)
9. Klymov, Yu. A., Soldatchenko, O. S., & Orieshkyn, D. O. (2010). Experimental study of the adhesion of composite non-metallic reinforcement to concrete. *Bulletin of Lviv Polytechnic National University*, 662, 207–214 [in Ukrainian]
10. Klymov, Yu. A., Bodenchuk, P. S., & Soldatchenko, O. S. (2011). Study of adhesion of reinforcement with increased corrosion resistance to concrete. *Urban Development and Spatial Planning*, 40(1), 454–460. Retrieved from <http://repository.knuba.edu.ua/handle/987654321/10328> [in Ukrainian]
11. Masiuk, H. Kh., Kornichuk, O. I., & Aleksiievets, I. I. (2016). Analysis of cracking in bending reinforced concrete elements under of the alternating low-cycle loading on basis of calculation model resistance concrete. *Resursoekonomni materialy, konstruksii, budivli ta sporudy*, 32, 213–219. Retrieved from <http://ep3.nuwm.edu.ua/id/eprint/5685> [in Ukrainian]
12. Shmukler, V., Firsov, P., Naboka, A., & Akimenko, O. (2023). Research of the adhesion level of fiberglass composite reinforcement HARD+ with concrete. *Proceedings of the 9th International Scientific Conference "Reliability and Durability of Railway Transport Engineering Structures and Buildings" (TransBud 2021): Vol. 2684 (030040)*. AIP Conference Proceedings. DOI: [10.1063/5.0120012](https://doi.org/10.1063/5.0120012)
13. Arias, J., Vazquez, A., & Escobar, M. (2012). Use of sand coating to improve bonding between GFRP bars and concrete. *Journal of Composite Materials*, 46(18), 2271–2278. DOI: [10.1177/0021998311431994](https://doi.org/10.1177/0021998311431994)
14. Janus, O., Girgle, F., Bodnarova, L., Kostih, P., & Stepanek, P. (2020). The effect of various test configurations on the bond strength of sand-coated GFRP bars. *Proceedings of the 16th International Conference "Special Concrete and Composites 2019": Vol. 2210 (020002)*. AIP Conference Proceedings. DOI: [10.1063/5.0000386](https://doi.org/10.1063/5.0000386)
15. Lu, J., Afefy, H. M., Azimi, H., Sennah, K., & Sayed-Ahmed, M. (2021). Bond performance of sand-coated

and ribbed-surface glass fiber reinforced polymer bars in high-performance concrete. *Structures*, 34, 10–19. DOI: [10.1016/j.istruc.2021.07.060](https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.07.060)

16. Firsov, P. M., Bilym, P. A., & Kaafarani, B. A. (2022). Development of epoxy polymer matrices for composite reinforcement with increased modulus of elasticity. *Municipal Economy of Cities. Series: Engineering science and architecture*, 4(171), 53–57. DOI: [10.33042/2522-1809-2022-4-171-53-57](https://doi.org/10.33042/2522-1809-2022-4-171-53-57) [in Ukrainian]

17. Firsov, P. M., Bilym, P. A., & Nadtochii, S. O. (2023). Increasing of the corrosion resistance of fiberglass plastic reinforcement through modification of the polymer binder. *Municipal Economy of Cities. Series: Engineering science and architecture*, 1(175), 47–51. DOI: [10.33042/2522-1809-2023-1-175-47-51](https://doi.org/10.33042/2522-1809-2023-1-175-47-51) [in Ukrainian]

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С.О. Бугаєвський, завідувач кафедри мостів, конструкцій та будівельної механіки імені В.О. Російського Харківського національного автомобільно-дорожнього університету, Україна.

Автор: ФІРСОВ Павло Михайлович

кандидат технічних наук, доцент

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова

E-mail – pavelfirsov1991@gmail.com

ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9119-3968>

Автор: ЗОЛОТОВ Сергій Михайлович

кандидат технічних наук, доцент

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова

E-mail – zolotovsergej963@gmail.com

ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3649-1871>

Автор: НАДТОЧІЙ Сергій Олександрович

аспірант

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова

E-mail – Snadtochiy0730@gmail.com

ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7741-1551>

ANALYSIS OF CRACK FORMATION AND DEFORMABILITY OF BENT CONCRETE STRUCTURES REINFORCED WITH COMPOSITE REINFORCEMENT

P. Firsov, S. Zolotov, S. Nadtochii

O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Ukraine

The scientific article is devoted to analysing the existing regulatory methods for calculating bending concrete structures reinforced with non-metallic composite reinforcement (FRP) according to deformations and crack formation (second group of limit states). It is known that FRP composite reinforcement does not behave in the same way as steel reinforcement, since, in many cases, their mechanical properties differ significantly. The existing foreign and Ukrainian norms and recommendations for calculating constructions with FRP reinforcement are mostly modifications of the norms for calculating reinforced concrete structures with steel reinforcement. The changes are mainly related to the rationing of the physical and mechanical properties of composite reinforcement and several empirical ratios. According to the recommendations of foreign standards, we considered the model of a beam with combined reinforcement (steel + GFRP) to carry out calculations for predicting the formation of cracks. The results of laboratory tests of an experimental beam with FRP reinforcement were compared with the results of theoretical calculations for predicting crack formation following the recommendations of the current foreign standards Eurocode 2 and ACI 440.1R-15. When comparing the results, it is clear that EC2 provides more approximate predictions of the cracking load than ACI. Deflections in the middle of the beam span from the moment of crack formation to the moment of destruction were determined. An experimental 'load-deflection' curve was constructed. The ratio between the experimental and predicted values of deflections using the EC2 and ACI methods was determined. According to the calculated data, both standards provide a sufficiently approximate forecast at $0,3P_{ult}$. The results of the research can be used in the future for the design of concrete structures reinforced with non-metallic composite reinforcement (based on glass fibres, basalt, carbon, aramid, etc.), however, further studies of structural elements working in bending under different load conditions and statistically justified confirmation are required.

Keywords: calculation, load, crack formation, composite reinforcement, concrete, beam.