

technological cracks occurring simultaneously with the processes of transformation of the material from the raw material into the final product are analyzed. The author claims that the occurrence of technological cracks is a necessary act of the formation of composite materials. And the process of occurrence and development of cracks in the hardening material differs somewhat from the classical processes adopted in the theory of strength.

**Key words:** reinforced concrete; deformation; constructions; cracks; classification; exploitation.

**Дорофеев В., Зинченко А., Целикова А. Влияние технологической поврежденности материала на напряженно-деформированное состояние изгибаемых железобетонных элементов**

Поданы результаты исследования напряженно-деформированного состояния в трещинах изгибаемых железобетонных элементов с учетом технологической поврежденности. Представлена классификация трещин для разработки и систематизации способов учета трещин в расчетных моделях железобетонных конструкций. Вид трещин по данной классификации может зависеть и от вида напряженного состояния конструкции, а также предложена классификация трещин, в соответствии с которой образование трещин в железобетонных изгибаемых элементах зависит от внешних силовых воздействий. Проанализированы зарождение и развитие технологических трещин, происходящих одновременно с процессами превращения материала из исходного сырья в конечный продукт. Автор утверждает, что возникновение технологических трещин является необходимым актом становления композиционных материалов. А сам процесс возникновения и развития трещин в твердеющем материале несколько отличается от классических процессов, принятых в теории прочности.

**Ключевые слова:** железобетон, деформации, конструкции, трещины, классификация, эксплуатация.

*Стаття надійшла 04.05.2017.*

УДК 624.012. 035

**АНАЛІЗ ПІДСИЛЕНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ  
ЗА НЕСУЧОЮ ЗДАТНІСТЮ ПОХИЛИХ ПЕРЕРІЗІВ  
ЗА РІЗНИМИ МЕТОДИКАМИ**

*А. Мазурак, к. т. н., І. Ковалик, асистент, В. Михайлечко, старший викладач,  
О. Андрушків, аспірант  
Львівський національний аграрний університет*

**Постановка проблеми.** Проблема оцінки залізобетонних елементів за несучою здатністю похилих перерізів і сьогодні залишається актуальною, незважаючи на велику кількість як наявних методик, так і нормативних пропозицій щодо розрахунку. Це призводить до використання різних методів розрахунку, що в одних

випадках спричинює перевитрату матеріалів і ускладнення армування, а в інших – не забезпечує надійності експлуатації проєктованих конструкцій [1; 3; 4].

**Постановка завдання.** Наше завдання – визначення експериментальним і теоретичним шляхом параметрів підсилених залізобетонних елементів за несучою здатністю похилих перерізів.

**Виклад основного матеріалу.** Для теоретико-експериментальних досліджень використано методики оцінки підсилених залізобетонних елементів за несучою здатністю похилих перерізів, які стосувалися вітчизняних, закордонних норм та дослідників, які вивчали таку проблему.

Для залізобетонних балочних конструкцій, які не вимагають поперечного армування, міцності на зсув та зріз, головним критерієм є проєктування. Основні причини руйнування, які важно оцінити за проєктування, – це крихка поведінка конструкцій у припорній зоні з частковим або повним деформуванням матеріалу. Незважаючи на численні дослідження в цій галузі, оцінка похилих перерізів армованих і попередньо напружених залізобетонних конструкцій залишається складним явищем настільки, що розрахункові підходи часто проводять в емпіричних або спрощених виглядах.

Основне наше завдання – проаналізувати поведінку підсилених перерізів, похилих до поздовжньої осі, з використанням поперечної арматури, а також виокремити оптимальні рекомендації та розрахункові моделі, адаптовані для фахівців-практиків у реальному будівництві. Аналіз результатів проводили за реальними моделями залізобетонних балок, виготовлених на важкому бетоні з поперечним перерізом 240 x 80 мм довжиною 2300 мм до та 240 x 120(160) мм після підсилення. Загальна кількість балок становила 11 штук. Балки об'єднували в серії залежно від кількості поперечної арматури та плеча прикладання сили.

У європейських нормативних документах EN 1992-1-1(Єврокод 2) для оцінки конструкцій за несучою здатністю похилих перерізів для елементів без поперечної арматури  $V_{Rd,c}$ , використовують за формулою:

$$V_{Rd,c} = \left[ \frac{0,18}{\gamma_c} \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck})^{\frac{1}{3}} + 0,15 \cdot \sigma_{cp} \right] \cdot b_w \cdot d \quad (1)$$

Ця залежність повністю емпірична.

Коефіцієнт  $k$  враховує ефект розміру:

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2,0 \quad (d \text{ в [мм]}), \quad (2)$$

де  $\rho_l$  – це коефіцієнт армування в розтягнутій зоні, які закріплюють за межами цієї ділянки:

$$\rho_l = \frac{A_{sl}}{b_w \cdot d} \leq 2,0 \leq 0,02, \quad (3)$$

$\sigma_{cp}$  – напруження стиску в центрі ваги поперечного перерізу від попереднього навантаження чи попереднього напруження.

$$\sigma_{cp} = N_{Ed}/A_c \leq 0,2 \cdot f_{cd} \quad (4)$$

$v_{\min}$  – мінімальна міцність на зсув, яка визначається за формулою:

$$v_{\min} = 0,035 \cdot k^{3/2} \cdot f_{ck}^{1/2} \quad (5)$$

Поперечна сила, котру може сприйняти поперечна арматура за умови, що напруження в ній досягають межі текучості:

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} z f_{ywd} \cot \theta \quad (6)$$

Міжнародна федерація залізобетону FIB2010b пропонує введення чотирьох рівнів наближення (LoA – рівень апроксимації) для оцінки перерізів, похилих до поздовжньої осі для звичайних і попередньо напружених залізобетонних конструкцій. У використанні LoA зростає якість прогнозування роботи конструкції, але необхідні складніші обчислення. Рівень I забезпечує найпростіший метод аналізу, а також є найконсервативнішим. Рівень II є проміжним за складністю і точністю. Рівень III забезпечує найточніші і найзагальніші прогнози. Рівень IV допускає використання нелінійного методу скінченних елементів.

Для оцінки несучої здатності перерізів залізобетонних елементів похилих до поздовжньої осі, в обчислення приймається дві складові бетону, нахил поля напружень бетону з кутом  $\theta$  і коефіцієнт оцінки роботи бетону. Пропозиція розрахунку – це здебільшого визначення  $V_{Rd}$ , яка є сумою бетонної частини  $V_{Rd,c}$  і стрижневої частини  $V_{Rd,s}$ .

$$V_{Rd} = V_{Rd,c} + V_{Rd,s} \leq V_{Rd,max} \quad (7)$$

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s_w} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot (\cot \theta + \cot \alpha) \cdot \sin \alpha \quad (8)$$

$$V_{Rd,max} = k_c \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \cdot b_w \cdot z \cdot \frac{\cot \theta + \cot \alpha}{1 + \cot^2 \theta} \quad (9)$$

Визначення несучої здатності балок з поперечними стрижнями через розрахункові залежності були основою розрахунку за похилими перетинами нормативних документів у СНиП 2.03.01.-84\*. Така методика розрахунку була прийнята для оцінки несучої здатності перерізів залізобетонних елементів, похилих до поздовжньої осі.

Практично несучу здатність похилого перерізу залізобетонного елемента визначали за поперечною силою в нормальному перерізі залізобетонної конструкції залежно від плеча прикладання сили, що перебуває над початком тріщин, і зусилля, які діють в арматурі у межах довжини похилого перерізу. Зазвичай розрахункове зусилля несучої здатності похилих перетинів записували:

$$Q \leq Q_b + Q_s, \quad (10)$$

де  $Q_b$  – граничне зусилля, що сприймається бетоном;  $Q_s$  – зусилля, що сприймається поперечною арматурою і відігнутими стрижнями.

У межах похилого перерізу, який розглядається, поперечну силу, що сприймається бетоном, записували в такому вигляді:

$$Q_b = \frac{2R_{bt} b h_0^2}{c} \quad (11)$$

Для елементів із поперечним армуванням у вигляді хомутів, розміщених нормально до поздовжньої осі, зусилля в хомутах, які перетинаються похилим перерізом, подається:

$$Q_{sw} = q_{sw}c, \quad (12)$$

де  $q_{sw}$  – граничне зусилля в хомутах на одиницю довжини елемента в межах похилого перетину;  $C$  – критична довжина горизонтальної проекції похилого перерізу.

У рекомендаціях міжнародного європейського будівельного журналу RILEM TC межа міцності перерізів, похилих до поздовжньої осі, подана у вигляді суми складових бетону  $V_c$ , поперечного армування  $V_w$  і розтягнутих волокон  $V_f$ . Терміни  $V_c$ ,  $V_{RC}$  і  $V_w$  мають такі самі форми, що і в Єврокод 2.

$$V_R = V_c \cdot V_f \cdot V_w \leq V_{RC} \quad (13)$$

Внесок волокон складається з інтеграції міцності на зсув, зріз за рахунок волокон на критичному зсуві тріщини, який визначається так:

$$V_f = k_f \cdot k \cdot \cos\theta \cdot \tau_{fd} \cdot b_w \cdot d \cdot \cot\theta \quad (14)$$

$$k_f = 1 + n \cdot \left(\frac{h_f}{b_w}\right) \cdot \left(\frac{h_f}{d}\right) \quad (15)$$

де  $\theta$  – нахил стійки стиснення;  $k_f$  – фактор і, відповідно, інші елементи

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2.0 \quad (d \text{ в [мм]}) \quad (16)$$

$$\tau_{fd} = \frac{0.18}{\gamma_c} \cdot f_{R,4} \quad (17)$$

Складові бетону  $V_c$  міцність на зріз визначають так:

$$V_c = \frac{0.21}{\gamma_c} \cdot k \cdot \sqrt{f_{ck}} \cdot b_w \cdot d \quad \text{— для залізобетонних елементів} \quad (18)$$

$$V_c = \frac{0.24}{\gamma_c} \cdot \sqrt{f_{ck}} \cdot b_w \cdot d \quad \text{— для попередньо напружених,} \quad (19)$$

де  $\gamma_c$  – коефіцієнт надійності бетону, що, як правило, становить  $\gamma_c = 1,5$ .

Внесок поперечної арматури  $V_w$  визначається:

$$V_w = \frac{A_{sw}}{s} \cdot z \cdot \frac{f_{yw}d}{\gamma_s} \cdot \frac{\sin(\alpha+\beta_u)}{\sin(\beta_u)}, \quad (20)$$

де  $z$  – плече робочого перерізу ( $z = 0,9d$ );  $A_{sw}$  – площа поперечної арматури, відстань між поперечними арматурними стрижнями;  $f_{swk}$  – межа текучості сталі;  $\alpha$  – нахил поперечних арматурних стрижнів.

На основі запропонованої моделі частина розтягнутих волокон  $V_f$  визначається так:

$$V_f = \frac{\sigma_p}{\gamma_f} \cdot z \cdot b_w \cdot \frac{1}{\tan(\beta_u)} \quad (21)$$

де  $\sigma_p$  – середнє напруження залишкового розтягу, що передається тріщинами, визначається як:

$$\sigma_p = \frac{1}{K} \cdot \frac{1}{w_u} \cdot \int_0^{w_u} \sigma(w) \cdot dw \quad (22)$$

$$w_u = \max\left(\frac{2}{3} \cdot h \cdot \varepsilon_u, 0.3\right) \varepsilon_u \in \text{ліміт } 3\% \quad (23)$$

Проведений аналіз результатів теоретичних та експериментальних досліджень підсиленних залізобетонних балок, значення яких подані в таблиці.

Різниця між теоретичними значеннями несучої здатності похилих перерізів за EN 1992-1-1 та експериментальними даними досліджень коливається в межах 27-67%. Причиною такої високої різниці є підбір значень опору зсуву, який приймають меншим із величин між сприйняттям поперечною арматурою стиснутими розкосами у вигляді бетонної частини. Складова частка бетону у свою чергу не входить в отримання загальної несучої здатності похилих перерізів.

Таблиця

Експериментальні та розрахункові значення несучої здатності похилих перерізів підсиленних залізобетонних елементів

Шифр Балок	Експериментальні значення балок, $V_{Rd}$ , кН	Розрахункові величини $V_{Rd}$ , кН визначені за різними нормами				Розбіжність між експериментальними та розрахунковими значеннями, %			
		EN 1992-1-1	СНиП 2.03.01-84*	FIB 2010b	RILEM TC 162	EN 1992-1	FIB 2010	П2.0 3.01-	RILEM TC 162
<b>I серія</b>									
Б-1-1	45,0	17,25	39,81	37,75	37,80	62	16	11	16
Б-1-2	52,5	17,25	39,81	37,75	37,80	67	28	24	28
Б-1 3ПБ	68,0	49,6	64,3	66,72	66,77	27	2	5	2
Б-1-4ПБ	68,5	49,6	64,3	66,72	66,77	28	3	6	2
<b>II серія</b>									
Б-2-1	62,5	27,66	58,9	56,86	56,95	56	9	6	9
Б-2-2ПБ	107,9	55,32	98,2	94,52	94,63	49	12	9	12
Б-2-3ПБ	107,4	55,32	98,2	94,52	94,63	48	12	9	12
Б-2-4ПТ	109,0	55,32	102,4	99,05	99,22	49	9	6	9
Б-2-5ПТ	109,9	55,32	102,4	99,05	99,22	50	10	7	10
Б-2-6ПТ	109,5	55,32	102,4	99,05	99,22	49	9	6	9
Б-2-7ПТ	111,1	55,32	102,4	99,05	99,22	50	11	8	11

Б-1,2 – балки без підсилення; Б-1ПБ-балки, підсилені бетоном; Б-1ПТ – балки, підсилені торкретбетоном.

Розрахункові значення отриманих за методиками СНиП 2.03.01-84\*, FIB 2010b та RILEM TC 162 для невідсилених і відсилених балкових зразків показує задовільну збіжність з експериментальними даними в межах 2-28%. На нашу думку, використання принципів граничної рівноваги та деформаційної моделі у дослідженнях похилих перерізів, хоча і містять емпіричні залежності на основі великого статистичного аналізу, проте забезпечують високу збіжність у зв'язку з урахуванням у роботі елементів багатьох складових.

**Висновки.** Здійснивши аналіз досліджень відсилених залізобетонних елементів за несучою здатністю похилих перерізів відповідним методикам Eurocode 2 [5-6], FIB 2010b [9], норм СНиП 2.03.01-84\* [7] та RILEM TC 162-TDF [10], можна дійти висновку, що підходи до визначення несучої здатності істотно відрізняються один від одного та мають принципові розбіжності в алгоритмі розрахунку, результатом чого стала розбіжність їхніх значень. На нашу думку, доцільним є продовження теоретико-експериментальних досліджень з метою отримання результатів розрахунку, близьких до експериментальних значень.

#### **Бібліографічний список**

1. Бабич Є. М. Методика випробування відсилених за похилими перерізами згинальних залізобетонних елементів при малоциклових навантаженнях високого рівня / Є. М. Бабич, С. В. Мельник // Науково-технічні проблеми сучасного залізобетону : Міжвід. наук.-техн. зб. – К. : ДП НДІБК, 2011. – Вип. 74, кн. 1. – С. 172–179.
2. Барашиков А. Я. Експериментальні дослідження згинаних залізобетонних елементів, відсилених різними способами / А. Я. Барашиков, О. П. Сумак, Б. А. Боярчук // Ресурсоекономічні матеріали, конструкції будівель і споруд : зб. наук. пр. – Рівне : РДТУ, 2000. – №5. – С. 294–297.
3. Міцність та деформативність залізобетонних балок, відсилених після впливу агресивного середовища / З. Я. Бліхарський, Р. В. Вашкевич, Р. Є. Хміль та ін. // Науково-технічні проблеми сучасного залізобетону: Міжвід. наук.-техн. зб. К. : ДП НДІБК, 2011. – Вип. 74, кн. 2. – С. 28-35.
4. Гольшев А. Б. Проектирование усиленных железобетонных конструкций производственных зданий и сооружений / А. Б. Гольшев, И. Н. Ткаченко. – К. : Логос, 2001. – 172 с.
5. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування : ДСТУ Б В.2.6-156:2010. – [Чинний від 2011-06-01]. – К. : Мінрегіонбуд України, 2011. – 116 с. – (Національний стандарт України).
6. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення : ДБН В.2.6-98:2009. – [Чинний від 2011-07-01]. – К. : Мінрегіонбуд України, 2011. – 71 с. – (Державні будівельні норми України).
7. СНиП 2.03.01-84\* Бетонные железобетонные конструкции / Госстрой СССР. – М. : ЦИТП Госстроя СССР, 1989. – 77 с.
8. Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules for buildings: EN 1992-1-1:2004 (E). – [approved 2004-04-16]. – В. : GEN National Members, 2004. – 225 p.
9. Externally bonded FRP reinforcement for RC structures. Technical report / [T. Triantafillou, S. Matthys, K. Audenaert, G. Balázs, and oth]. – St. : International Federation for Structural Concrete (fib), 2001. – 130 p.
10. RILEM TC 162-TDF, Test and design methods for steel fibre reinforced concrete : bending test. Bagnoux : RILEM, 2002.

11. RILEM TC 162-TDF, Testanddesignmethodsforsteel fibrereinforcedconcrete: sigma-epsilon-design method. Bagnoux: RILEM, 2003.

**Мазурак А., Ковалик І., Михайлечко В., Андрушків О. Аналіз підсилених залізобетонних елементів за несучою здатністю похилих перерізів за різними методиками**

Описані теоретико-експериментальні дослідження та здійснено аналіз оцінки різних методик розрахунку залізобетонних елементів за несучою здатністю похилих перерізів.

**Ключові слова:** несуча здатність, похилий переріз, підсилена залізобетонна балка.

**Mazurak A., Kovalik J., Myhaylechko V., Andrushkiv O. Analysis of reinforced concrete elements for the bearing capacity of sloping sections by different method**

Described theoretical and experimental research and analysis of different assessment methods of reinforced concrete elements for the bearing capacity of sloping sections.

**Key words:** bearing capacity, advanced-section reinforced concrete beam.

**Мазурак А., Ковалык І., Михайлечко В., Андрушків О. Анализ усиленных железобетонных элементов за несущей способностью наклонных сечений за разными методиками**

Описаны теоретико-экспериментальные исследования и сделан анализ оценки разных методик расчета железобетонных элементов за несущей способностью наклонных сечений.

**Ключевые слова:** несущая способность, наклонное сечение, усиленная железобетонная балка.

*Стаття надійшла 02.06.2017.*

УДК 620.172.24

### **ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЛОКАЛЬНОГО ОХОЛОДЖЕННЯ НА РОБОТУ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ**

*І. Добрянський, д. т. н., Л. Добрянська, к. е. н., А. Грищевич,  
старший викладач, В. Мацук, магістр  
Львівський національний аграрний університет*

**Постановка проблеми.** У проектуванні зварних конструкцій і розробці технології їх виготовлення треба приділяти значну увагу способам запобігання або усунення зварювальних деформацій і напружень. Одним із важливих напрямків розвитку зварного виробництва є підвищення надійності зварних конструкцій, але під час виготовлення зварних з'єднань виникають концентратори напружень, які