

## **РОЗРАХУНОК МІЦНОСТІ НОРМАЛЬНИХ ПЕРЕРІЗІВ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БАЛОК, ПІДСИЛЕНИХ ПРИ ДІЇ НАВАНТАЖЕННЯ, З ВРАХУВАННЯМ ВИМОГ НОВИХ НОРМ ПРОЕКТУВАННЯ**

Бліхарський З.Я., Хміль Р.Є., Дубіжанський Д.І., Васільєв І.В.

Національний університет “Львівська політехніка”  
Інститут будівництва та інженерії доквілля  
м. Львів, Україна

**АНОТАЦІЯ:** Запропоновано методику розрахунку залізобетонних конструкцій, підсилених залізобетонною обоймою при дії навантаження. Проведено апробацію методики експериментальними дослідженнями.

**АННОТАЦИЯ:** Предложена методика расчета железобетонных конструкций, усиленных железобетонной обоймой при действии нагрузки. Проведена апробация методики экспериментальными исследованиями.

**ABSTRACT:** The method of calculation of reinforced concrete bending construction strengthened with concrete ring under load is proposed. The approbation of the proposed technique was held on experimental dates.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** Згин, залізобетон, конструкції, підсилення, міцність.

### **ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ**

При тривалій експлуатації будівель і споруд під дією різних впливів в залізобетонних конструкціях накопичуються пошкодження, які знижують несучу здатність і призводять до необхідності відновлення та підсилення конструкції.

Відновлення залізобетонних конструкцій може бути викликано різними причинами, кожна з яких вимагає вибору відповідного способу, конструктивного рішення і матеріалу підсилення. Одним з найбільш часто

застосовуваних способів підсилення залізобетонних конструкцій є метод нарощування перерізів. Цей метод не вимагає влаштування складних і дорогих розвантажуючих систем з тяжів і шпренгелів, є технологічним і найменш трудомістким з відомих способів підсилення залізобетонних конструкцій при згині.

У сучасних нормативних документах відсутні єдині рекомендації з проектування підсилення та відновлення залізобетонних конструкцій з урахуванням передісторії їх навантаження. Ця особливість може значно впливати на НДС підсиленої конструкції, а нехтування нею не дозволяє повною мірою відобразити реальний стан залізобетонних елементів підсилених під навантаженням.

*Аналіз досліджень.* Роботу підсилених залізобетонних конструкцій вивчали в своїх роботах О.Б. Голишев, А.Я. Барашиков, З.Я. Бліхарський, Б.А. Боярчук, С.В. Бондаренко, А.І. Мальганов, Т.А. Мухамедієв, С.І. Меркулов та ін. [1, 2]. Це дало змогу розробити ефективні конструктивні рішення підсилення залізобетонних конструкцій і методи їх розрахунку. Проте аналіз виконаних досліджень показує, що більшість досліджень стосується підсилення без врахування дії навантаження та викликаного ним початкового напружено-деформованого стану.

На даний час в чинних нормах [4, 5] при проектуванні залізобетонних конструкцій застосовують метод, що базується на використанні реальної нелінійної діаграми « $\sigma$ - $\epsilon$ » для бетону та дволінійної для арматури. Однак на даний час в нормах [4, 5] відсутні положення і методики по розрахунку підсилених залізобетонних конструкцій, як і не має окремого НД щодо проектування таких конструкцій.

## ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Перед підсиленням під навантаженням залізобетонні конструкції мають напружено-деформований стан, який відрізняється від початкового при виготовленні конструкції. Це пов'язано з передісторією їх роботи за період експлуатації до моменту підсилення. Методика розрахунку на основі використання діаграм деформування бетону і арматури дозволяє отримати необхідні характеристики напружено-деформованого стану залізобетонного елементу з врахуванням його фактичного стану перед підсиленням.

Додаткові елементи, які включаються в сумісну роботу з конструкцією, що підсилюється, мають різний вік, різні фізико-механічні і реологічні характеристики, включаються в роботу в різний момент часу. Фактично підсилена під навантаженням конструкція перетворюється в комплексну, що складається з основної частини з певним напружено-деформованим станом, і додаткової частини з початковим станом [7].

За основу запропонованої методики розрахунку взято методику, що прийнята в [6]. Для вирішення даної задачі були використані наступні загальноприйняті положення:

- розподіл відносних деформацій бетону і арматури по висоті перерізу елемента приймають по лінійному закону та приймається гіпотеза плоских перетинів для відносних деформацій додаткової частини і приросту відносних деформацій основної частини перерізу конструкції після підсилення;

- зв'язок між напруженнями і деформаціями бетону і арматури приймають у вигляді діаграм;

- опір бетону розтягнутої зони не враховують.

Розрахунок міцності на згин залізобетонних елементів, підсилених під навантаженням залізобетонною обоймою, пропонується виконувати в два етапи.

На першому етапі визначають характеристики напружено-деформованого стану нормального перерізу основного конструктивного елемента від діючого при підсиленні навантаження. Алгоритм визначення параметрів напружено-деформованого стану нормального перерізу залізобетонного елемента розглянутий в [6, додаток А].

На другому етапі розрахунок проводять як для складеного залізобетонного перерізу. Переріз розглядався як такий, що складається з основного прямокутного перерізу з визначеним на першому етапі напружено-деформованим станом, і перерізу обойми коробчастого типу, який в розрахунку представляли у вигляді прямокутної частини на всю висоту, шириною, що дорівнює подвоєній товщині стінки обойми, та приєднаних до неї внизу і вверху полиць в межах ширини балки (рис. 1).

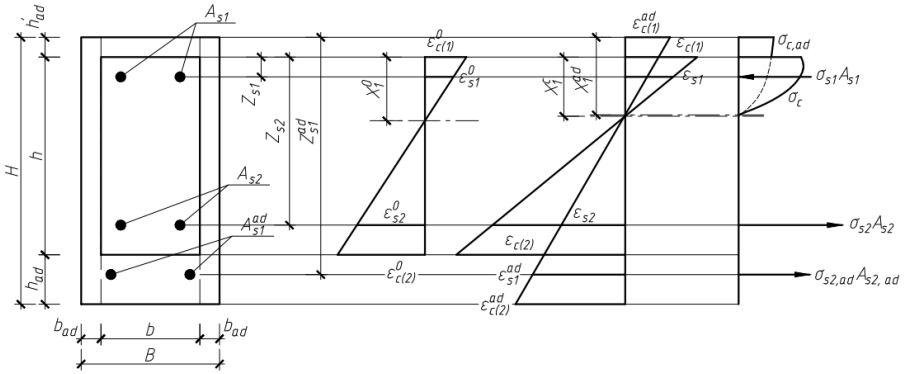
Враховуючи наявність основної і додаткової частини перерізу, умови рівноваги зусиль, а також сумісну роботу елементів, можна записати рівняння напружено-деформованого стану нормального перерізу згинального залізобетонного елемента, підсиленого залізобетонною обоймою, при дії навантаження:

$$\begin{aligned}
 & b \int_0^{x_1^c} \sigma_c x dx + 2b_{ad} \int_0^{x_1^{ad}} \sigma_c^{ad} x dx + \\
 + b \int_{x_1^{ad}-h'_{ad}}^{x_1^{ad}} \sigma_c^{ad} x dx + \int_0^{x_1^{ad}-(h'_{ad}+h)} \sigma_c^{ad} x dx + \sum_{i=1}^n \sigma_{s_i} A_{s_i} + & (1) \\
 & + \sum_{j=1}^m \sigma_{s_j}^{ad} A_{s_j}^{ad} = 0;
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & b \int_0^{x_1^c} \sigma_c x x dx + b_{ad} \int_0^{x_1^{ad}} \sigma_c^{ad} y y dy + \\
 + b \int_{x_1^{ad}-h'_{ad}}^{x_1^{ad}} \sigma_c^{ad} y y dy + \int_0^{x_1^{ad}-(h'_{ad}+h)} \sigma_c^{ad} y y dy + & (2) \\
 + \sum_{i=1}^n \sigma_{s_i} A_{s_i} (X_1^c - Z_{s_i}) + \sum_{j=1}^m \sigma_{s_j}^{ad} A_{s_j}^{ad} (X_1^{ad} - Z_{s_j}^{ad}) = M_0 + M_{ad},
 \end{aligned}$$

де  $M_{ad}$  – момент зовнішніх сил від додаткового навантаження після влаштування підсилення;

$M_0$  – згинальний момент від діючого під час підсилення навантаження.



а) поперечний переріз      б) епюра деформацій      в) епюра напружень

Рис. 1. Напружено-деформований стан згинального елемента прямокутного перерізу, підсиленого залізобетонною обоймою при дії навантаження

При розрахунку напружено-деформованого стану згинального елемента прямокутного перерізу, підсиленого залізобетонною обоймою під навантаженням можлива реалізація п'яти форм рівнянь рівноваги перерізу, в залежності від положення нейтральних осей основного і додаткового елемента після підсилення:

- перший випадок (перша форма рівноваги) – нейтральна вісь додаткового елемента знаходиться в межах нижньої полиці додаткового перерізу ( $H > X_1^{ad} > H - h_{ad}$ ), при цьому весь основний переріз стиснутий ( $X_1 > h$ );

- другий випадок (друга форма рівноваги) – нейтральна вісь додаткового елемента знаходиться в межах нижньої полиці додаткового перерізу ( $H > X_1^{ad} > H - h_{ad}$ ), при цьому в основному перерізі є зона розтягу ( $X_1 \leq h$ );

- третій випадок (третя форма рівноваги) – нейтральна вісь додаткового елемента знаходиться в межах висоти балки основного перерізу ( $H - h_{ad} > X_1^{ad} > h'_{ad}$ ) і в основному перерізі є зона розтягу ( $0 < X_1 < h$ );

- четвертий випадок (четверта форма рівноваги) – нейтральна вісь додаткового елементу знаходиться в межах верхньої полиці обійми ( $X_1^{ad} < h'_{ad}$ ), при цьому в основному перерізі є зона стиску ( $0 < X_1 < h$ );

- п'ятий випадок (п'ята форма рівноваги) – нейтральна вісь додаткового елементу знаходиться в межах верхньої полиці обійми ( $X_1^{ad} < h'_{ad}$ ), при цьому весь основний переріз розтягнутий ( $X_1 < 0$ ).

Розглянемо детальніше третю форму рівноваги складеного перерізу, яка мала місце при проведенні експериментальних досліджень. З врахуванням заміни змінних  $X_1^c = \frac{\varepsilon_{c(1)}}{\varkappa^c}$ ;  $X_1^{ad} = \frac{\varepsilon_{c1}^{ad}}{\varkappa^{ad}}$ ;  $x = \frac{\varepsilon_c}{\varkappa^c}$ ;  $y = \frac{\varepsilon_c^{ad}}{\varkappa^{ad}}$ ;  $dx = \frac{d\varepsilon_c}{\varkappa^c}$ ;  $dy = \frac{d\varepsilon_c^{ad}}{\varkappa^{ad}}$  та інтегрування рівняння рівноваги в цьому випадку запишуться:

$$\frac{f_{cd}^{ad} \varepsilon_{c1}^{ad}}{\varkappa^{ad}} 2b_{ad} \sum_{k=1}^5 \frac{a_k^{ad}}{k+1} \frac{\varepsilon_{c1}^{ad}}{\varepsilon_{c1}^{ad}} \frac{k+1}{\varepsilon_{c1}^{ad}} + b \sum_{k=1}^5 \frac{a_k^{ad}}{k+1} \frac{(\varepsilon_{c1}^{ad})^{k+1} - (\varepsilon_{top2}^{ad})^{k+1}}{(\varepsilon_{c1}^{ad})^{k+1}} + \quad (3)$$

$$+ \frac{bf_{cd} \varepsilon_{c1}}{\varkappa^c} \sum_{k=1}^5 \frac{a_k}{k+1} \frac{\varepsilon_{c1}}{\varepsilon_{c1}} \frac{k+1}{\varepsilon_{c1}} + \sum_{i=1}^n \sigma_{si} A_{si} + \sum_{j=1}^m \sigma_{sj}^{ad} A_{sj}^{ad} = 0,$$

$$\frac{f_{cd}^{ad} \varepsilon_{c1}^{ad}{}^2}{\varkappa^{ad}{}^2} 2b_{ad} \sum_{k=1}^5 \frac{a_k^{ad}}{k+2} \frac{\varepsilon_{c1}^{ad}}{\varepsilon_{c1}^{ad}} \frac{k+2}{\varepsilon_{c1}^{ad}} + b \sum_{k=1}^5 \frac{a_k^{ad}}{k+2} \frac{(\varepsilon_{c1}^{ad})^{k+2} - (\varepsilon_{top2}^{ad})^{k+2}}{(\varepsilon_{c1}^{ad})^{k+2}} + \quad (4)$$

$$+ \frac{bf_{cd} (\varepsilon_{c1})^2}{\varkappa^c{}^2} \sum_{k=1}^5 \frac{a_k}{k+2} \frac{\varepsilon_{c1}}{\varepsilon_{c1}} \frac{k+1}{\varepsilon_{c1}} + \sum_{i=1}^n \sigma_{si} A_{si} X_1^c - Z_{si} +$$

$$+ \sum_{j=1}^m \sigma_{sj}^{ad} A_{sj}^{ad} X_1^{ad} - Z_{sj}^{ad} - (M_0 + \Delta M) = 0.$$

де  $\varkappa^{ad} = (\varepsilon_{c1}^{ad} - \varepsilon_{c2}^{ad})/h$  – кривизна додаткового перерізу елемента від діючого після підсилення навантаження;

$\varkappa^c = \varkappa^{ad} + \varkappa^0$  – кривизна основного перерізу елемента від діючого після підсилення навантаження;

$\varkappa^0 = (\varepsilon_{c1}^0 - \varepsilon_{c2}^0)/h$  – кривизна основного перерізу елемента від діючого під час підсилення навантаження;

$\varepsilon_{c1} = \varepsilon_{c1}^0 + \varepsilon_{top(2)}^{ad}$  – повні деформації бетону стиснутої фібри основного перерізу;

$\varepsilon_{top(2)}^{ad} = \varkappa^{ad}(X_1^{ad} - h'_{ad})$  – деформації на нижній грані верхньої полиці додаткового перерізу – обійми;

$X_1^0 = \varepsilon_{c1}^0 / \varkappa^0$  – висота стиснутої зони основного перерізу елемента від діючого під час підсилення навантаження;

$X_1^{ad} = \varepsilon_{c1}^{ad} / \varkappa^{ad}$  – висота стиснутої зони додаткового перерізу елемента від діючого після підсилення навантаження;

$Z_{si}$  – відстань від  $i$ -го стержня основної арматури до верхньої грані балки основного перерізу;

$Z_{sj}^{ad}$  – відстань від  $j$ -го стержня додаткової арматури до верхньої грані обійми додаткового перерізу.

Задаючись величиною відносних деформацій бетону на верхній фібрі обійми, з першого рівняння рівноваги методом послідовних наближень знаходимо відповідні їм значення усереднених відносних деформацій на нижній фібрі, кривизну додаткового перерізу від додаткового навантаження, повні відносні деформації на верхній і нижній грані основного перерізу, деформації і напруження в шарах арматури основного і додаткового перерізів.

При досягненні заданої точності розрахунок припиняли і визначали з другого рівняння рівноваги відповідне їм значення згинального моменту від додаткового навантаження. Далі збільшували величину відносних деформацій на верхній фібрі бетону додаткового перерізу і розрахунок повторювали, допоки виконуються умови міцності.

Рівняння (3, 4) дають можливість дослідити напружено-деформований стан згинального елемента прямокутного перерізу, підсиленого залізобетонною обіймою при дії навантаження. Необхідно відмітити, що за допомогою даного підходу можна оцінити напружено-деформований стан згинального елемента прямокутного перерізу, підсиленого різними методами: нарощуванням перерізу бетону зверху, тоді  $b_{ad} = 0, h_{ad} = 0, A_{sj}^{ad} = 0$ , або нарощуванням перерізу розтягнутої арматури, тоді  $b_{ad} = h'_{ad} = 0$ , або бетонною обіймою при  $A_{sj}^{ad} = 0$ .

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Для аналізу запропонованої методики розрахунку використано залізобетонні балки підсилені обіймою, які досліджені експериментально авторами даної статті. Міцність нормальних перерізів балок визначали згідно запропонованої методики та за інженерною методикою норм [3] з врахуванням додаткових коефіцієнтів при підсиленні під навантаженням вищим  $0,65M_{u0}^{exp}$  на бетон  $\gamma_{br} = 0,8$  і на арматуру  $\gamma_{sr} = 0,8$  додаткового перерізу згідно вимог [4]. При цьому в формули підставляли дійсні характеристики міцності бетону  $f_{c,prism}$  та границю текучості арматури  $f_y$ . Результати теоретичних розрахунків порівнювали з експериментальними даними (табл. 1).

Таблиця 1

Міцність експериментальних балок, підсилених залізобетонною обоймою при дії навантаження

Серія	Шифр балки	Переріз підсилених балок $B \times H$ , мм	Площа перерізу арматури обойми $m^2 \times 10^{-4}$ ( $\varnothing$ мм)	Величина згинальних моментів, кН·м					$\frac{M_u^{norm1}}{M_u^{exp}}$	$\frac{M_u^{dm}}{M_u^{exp}}$	$\frac{M_{u,ad}^{dm}}{M_{u,ad}^{exp}}$
				Експеримент.		Розрахункові					
				Гранич. (текуч. осн. армат.) $M_u^{exp}$	Гранич. (текуч. додат. армат.) $M_{u,ad}^{exp}$	За ДБН В.3.1-1-2002 $M_u^{norm1}$	За методикою				
							Гранич. (текуч. осн. армат.) $M_u^{dm}$	Гранич. (текуч. додат. армат.) $M_{u,ad}^{dm}$			
II	Бп 2.1-0,7	142x274	1,01 (2 $\varnothing$ 8)	30.81	37.78	32.95	29.37	34.54	1.070	0.953	0.914
	Бп 2.2-0,7	142x278		30.23	37.66	33.48	29.66	34.55	1.108	0.981	0.917
III	Бп 3.1-0,3	146x275	1,57 (2 $\varnothing$ 10)	44.18	40.17	41.56	42.34	39.14	0.941	0.958	0.974
	Бп 3.2-0,3	145x276		43.11	40.08	41.37	42.37	39.09	0.960	0.983	0.975
	Бп 3.3-0,5	143x274		45.0	43.44	41.13	39.27	41.49	0.914	0.873	0.955
	Бп 3.4-0,5	144x273		43.83	43.11	40.78	39.58	41.79	0.930	0.903	0.969
	Бп 3.5-0,7	150x278		36.37	45.85	38.15	33.79	41.58	1.049	0.929	0.907
	Бп 3.6-0,7	142x273		35.62	44.26	38.11	32.93	41.59	1.070	0.924	0.940
	Бп 3.7-0,9	145x272		31.43	43.66	38.35	25.62	40.88	1.220	0.815	0.936
	Бп 3.8-0,9	145x277		31.45	45.71	38.52	25.47	41.10	1.225	0.810	0.899
IV	Бп 4.1-0,7	142x275	2,26 (2 $\varnothing$ 12)	40.32	49.53	43.42	36.89	48.78	1.077	0.915	0.985
	Бп 4.2-0,7	148x275		40.40	49.01	43.09	37.89	48.26	1.066	0.938	0.985
	Бп 4.3-0,9	142x272		32.56	49.20	43.64	26.27	48.13	1.340	0.807	0.978
	Бп 4.4-0,9	146x275		32.34	51.30	43.80	26.21	48.19	1.354	0.810	0.939

## ВИСНОВКИ

Виконані розрахунки показують, що теоретичні величини міцності нормальних перерізів підсилених балок, визначених по запропонованій методиці, задовільно узгоджуються з експериментальними даними. Розбіжність з експериментальними даними величини згинального моменту по текучості арматури основного перерізу складає -1,7...-12,7%. Лише для чотирьох балок, підсилених при  $0,9M_{u0}^{exp}$ , розбіжність була вищою -18,5...-19,3%. Точність визначення величини згинального моменту по текучості арматури додаткового перерізу склала -1,5...-10%. При цьому для всіх балок експериментальні величини міцності були вищими за теоретичні, отримані згідно запропонованої методики.

Пропонована методика розрахунку дозволяє при будь-якому значенні згинального моменту від додаткового навантаження визначити напружено-деформований стан згинального елемента, підсиленого під навантаженням з задовільною точністю.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Бліхарський З.Я. Реконструкція та підсилення будівель і споруд. / З.Я. Бліхарський. – Львів: НУ «Львівська політехніка», 2008. – 108 с.
2. Гольшев А.Б. Расчет и технические решения усиленных железобетонных конструкций производственных зданий и просадных оснований / А.Б. Гольшев и др. : под ред. А. Б. Гольшева. – К. : Логос, 2008. – 304 с.
3. Бетонные и железобетонные конструкции: СНиП 2.03.01-84\* / Госстрой СССР. - М.: ЦИТД, 1989. - 80 с.
4. Ремонт і підсилення несучих та огорожувальних будівельних конструкцій і основ промислових будинків та споруд: ДБН В.3.1-1-2002. – К.: Держбуд України, 2003. – 82 с.
5. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення: ДБН В.2.6-98:2009. – К. : Мінрегіонбуд України, 2011. – 70 с.
6. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування: ДСТУ Б В.2.6-156:2010. – К. : Мінрегіонбуд України, 2011. – 118 с.
7. Лазовский Д.Н. Метод расчета усиления железобетонных конструкций увеличением поперечного сечения / Д. Н. Лазовский // Вести Полоцкого госуниверситета. Серия В: Прикладные науки. – Наваполацк: ПДУ, 2000. – С.50-59.

Стаття надійшла до редакції 21.02.2013 р.