

**РОЗРАХУНОК НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ НОРМАЛЬНИХ
ПЕРЕРІЗІВ ПІДСИЛЕНИХ ЗГИНАЛЬНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ
ЕЛЕМЕНТІВ ПРИ ДІЇ НА НИХ МАЛОЦИКЛОВИХ
НАВАНТАЖЕНЬ**

Конончук О.П., аспірант

*Національний університет водного господарства та
природокористування, Рівне, Україна*

Вступ. Проблема підсилення несучих конструкцій будівель та споруд, які потребують ремонту, реконструкції та переобладнання, на сьогоднішній день є актуальною. Практично всі конструктивні елементи будівель працюють в умовах малоциклових навантажень. Тому, дослідження роботи підсилених конструкцій за дії повторних навантажень є важливим напрямком наукової діяльності.

Для вивчення даного питання, в лабораторії кафедри інженерних конструкцій НУВГП виконані дослідження залізобетонних балок підсилених в розтягнутій зоні бетону композитними матеріалами на основі вуглецевих волокон.

Огляд останніх джерел досліджень і публікацій. На сьогоднішній день в Україні питанням розрахунку міцності нормальних перерізів згинальних залізобетонних елементів, підсилених в розтягнутій зоні композитними матеріалами, у вигляді стрічок за дії однократних навантажень займалися В.Г. Кваша, І.В. Мельник, А.Я. Мурин, М.Д. Климуш [1, 2] та ін. Проте їх дослідження не змогли охопити всю область застосування даного матеріалу та вивчити всі фактори, що на нього впливають.

Несуча здатність підсилених композитами згинальних залізобетонних елементів із врахуванням дії малоциклових навантажень. Розрахунок проводиться за чинними нормами проектування залізобетонних конструкцій [3, 4], виходячи з наступних передумов [5]:

- за розрахунковий приймається усереднений переріз (рис. 1), що відповідає середнім деформаціям бетону і арматурі по довжині ділянки між тріщинами, якщо такі є;
- деформації у звичайній арматурі однакові з оточуючим її бетоном, як при розтязі, так і при стиску;

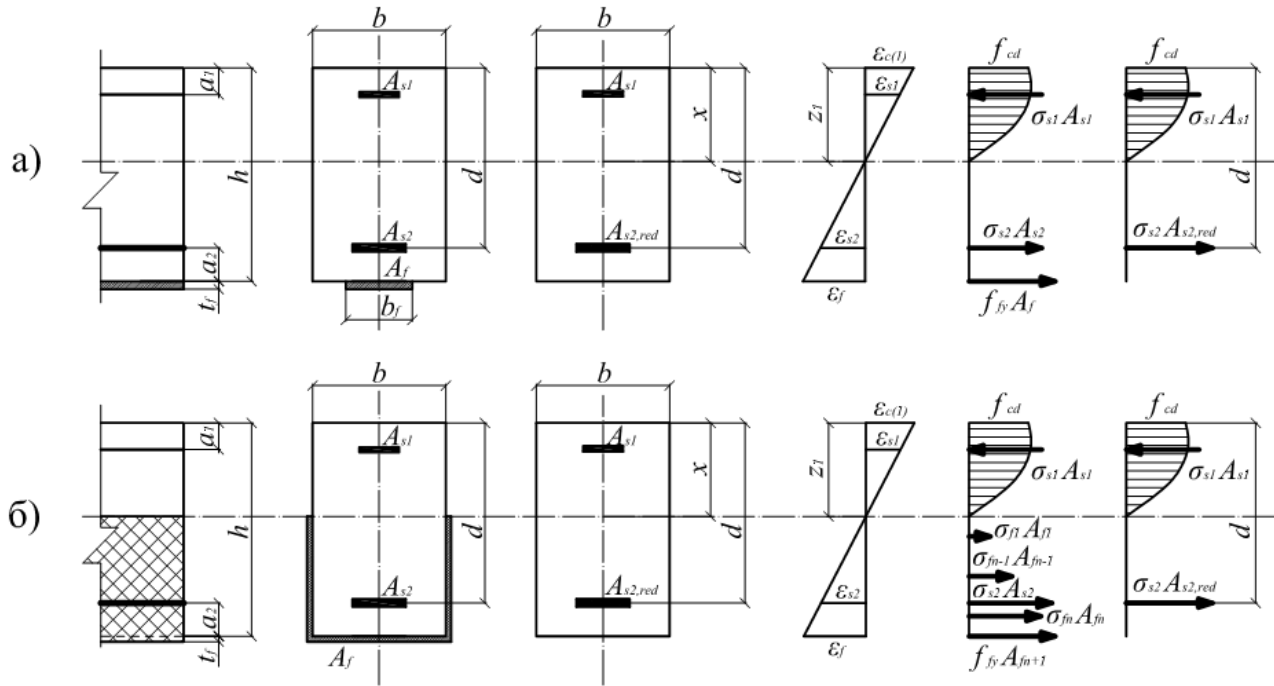


Рис. 1. Розрахункова схема нормального перерізу залізобетонної балки підсиленої:
 а) – композитною стрічкою; б) – композитним полотном

- для розрахункового перерізу вважається справедливою гіпотеза про лінійний розподіл деформацій по його висоті (гіпотеза плоских перерізів);
- зв'язок між напруженнями і деформаціями у стиснутому бетоні приймається криволінійним у вигляді діаграми, яка показана на рис. 2(а);
- зв'язок між напруженнями і деформаціями у арматурі приймається у вигляді діаграми, яка наведена на рис. 2(б);
- роботу бетону в розтягнутій зоні допускається не враховувати.

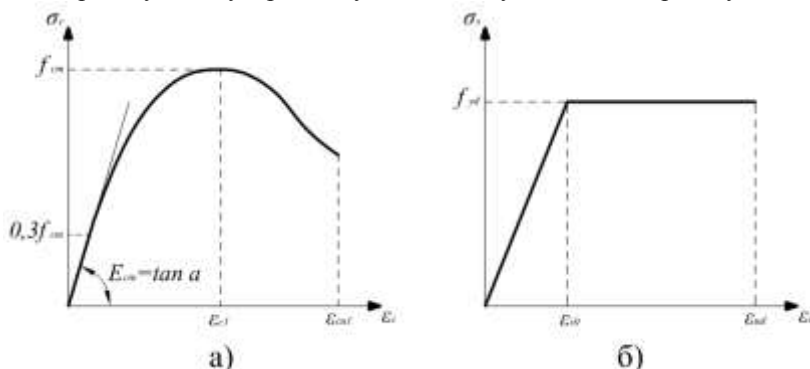


Рис. 2. Діаграми: а) – "напруження - деформації" бетону;
 б) – "напруження - деформації" арматури

За критерій вичерпання несучої здатності перерізу приймається:

- врата рівноваги між внутрішніми та зовнішніми зусиллями (досягнення максимуму на діаграмах "момент – кривизна (прогин)" або "стискаюча сила – деформація бетону найбільш стиснутої фібри") – екстремальний критерій;
- руйнування стиснутого бетону при досягненні фібровими деформаціями граничних значень (ϵ_{cul} , ϵ_{cu3} , див 3.1.5 та 3.1.7 ДБН В.2.6 - 98) або розрив усіх розтягнутих стержнів арматури внаслідок досягнення в них граничних деформацій ϵ_{ud} ;
- досягнення зовнішньою композитною стрічкою граничних відносних деформацій 500×10^{-5} , або зовнішнім композитним полотном – 600×10^{-5} .

В результаті дії малоциклових навантажень, рівень яких не перевищує експлуатаційний, відбувається зміна діаграми деформування бетону, і її можна описати залежністю [5]:

$$\sigma_{c,cyc} = f_{cd,cyc} \sum_{k=1}^5 a_{k,cyc} \eta_{cyc}^k, \quad (1)$$

де $\sigma_{c,cyc}$ – напруження в бетоні в циклах навантаження;

$f_{cd,cyc}$ – розрахункове значення міцності бетону на стиск після повторних навантажень;

$a_{k,cyc}$ – коефіцієнти поліноміальної залежності;

$\eta_{cyc} = \varepsilon_{c,cyc} / \varepsilon_{c1,cyc}$ – рівень повторних навантажень у циклах;

$\varepsilon_{c,cyc}$ – деформації у бетоні, які відповідають напруженням $\sigma_{c,cyc}$;

$\varepsilon_{c1,cyc}$ – максимальні деформації бетону, які відповідають $f_{cd,cyc}$.

Параметри діаграми деформування бетону $\sigma_{c,cyc} - \varepsilon_{c,cyc}$ пропонуємо визначати за формулами [6]:

$$\varepsilon_{c1,cyc} = [235 - 81 / (1 + 7,75 \cdot 10^{-4} f_{cd,cyc}^2)] \cdot 10^{-5}; \quad (2)$$

$$\varepsilon_{cu1,cyc} = [235 + 320 / (1 + f_{cd,cyc}^3 \cdot 6 \cdot 10^{-5})] \cdot 10^{-5}; \quad (3)$$

$$\sigma_{cu,cyc} / f_{cd,cyc} = 1,333 - \varepsilon_{cu1,cyc} / (3 \cdot \varepsilon_{c1,cyc}). \quad (4)$$

Згідно з даними наведеними в роботі [7], $f_{cd,cyc}$ можна визначити за формулою:

$$f_{cd,cyc} = f_{cd} (1 + 0,483 \eta_{cyc} - 0,556 \eta_{cyc}^2). \quad (5)$$

У процесі малоциклових навантажень, в залежності від рівня повторного навантаження у циклах, модуль пружнопластичності можна визначити за формулою:

$$E_{c,cyc} = E_{c0,cyc} (1 - \lambda_{c1,cyc} \sigma_{c,cyc} / f_{cd,cyc}), \quad (6)$$

де $E_{c,cyc}$ – модуль пружнопластичності бетону при заданому $\sigma_{c,cyc}$;

$E_{c0,cyc}$ – модуль пружності бетону, що відповідає напруженню $\sigma_{c,cyc} = 0$, який визначається за формулою:

$$E_{c0,cyc} = 31403 + 160,15 \eta_{cyc} - 1600 \eta_{cyc}^2, \quad (7)$$

$\lambda_{c1,cyc}$ – граничний коефіцієнт пластичності бетону з урахуванням повторних навантажень, який визначається згідно таблиць наведених в роботі [7].

Значення коефіцієнтів полінома (1) знаходяться з таких виразів [6]:

$$\left. \begin{aligned}
 a_{1\text{cyc}} &= 1,1E_{c,\text{cyc}}\varepsilon_{c1,\text{cyc}} / f_{cd,\text{cyc}}; \\
 a_{2\text{cyc}} &= 1 - a_{1\text{cyc}} - a_{3\text{cyc}} - a_{4\text{cyc}} - a_{5\text{cyc}}; \\
 a_{3\text{cyc}} &= a_{1\text{cyc}} - 2a_{4\text{cyc}} - 3a_{5\text{cyc}} - 2; \\
 a_{4\text{cyc}} &= \{[k - 2a_{1\text{cyc}}(3\gamma - 2) + 12\gamma - 6] - 2a_{5\text{cyc}}(10\gamma^3 - \\
 &\quad - 9\gamma + 2)\} / [2(6\gamma^2 - 6\gamma + 1)]; \\
 a_{5\text{cyc}} &= \{[k + 2a_{1\text{cyc}}(2 - 3\gamma) + 12\gamma - 6](\gamma - 1)^2\gamma^2 - [\beta + \\
 &\quad + a_{1\text{cyc}}\gamma(2\gamma - \gamma^2 - 1) + \gamma^2(2\gamma - 3)](6\gamma^2 - 6\gamma + 1)2\} / \\
 &\quad / \{2\gamma^2[(10\gamma^3 - 9\gamma + 2)(\gamma - 1)^2 - (\gamma^3 - 3\gamma + 2)(6\gamma^2 - 6\gamma + 1)]\},
 \end{aligned} \right\} (8)$$

де $\gamma = \varepsilon_{cu,\text{cyc}} / \varepsilon_{c1,\text{cyc}}$; $\beta = 1,1\varepsilon_{c1,\text{cyc}} / \varepsilon_{cu,\text{cyc}}$;

$$k = 2,7 \cdot \left(\frac{\varepsilon_{cu1,\text{cyc}}}{\varepsilon_{c1,\text{cyc}}} \right) - 6,1 - \frac{0,005}{\left(\frac{\varepsilon_{cu1,\text{cyc}}}{\varepsilon_{c1,\text{cyc}}} - 1 \right)^2}.$$

Величина внутрішніх зусиль у стиснутому бетоні із врахуванням впливу малоциклових навантажень, буде обчислюватись за формулою:

$$S_{c,\text{cyc}(1)} = f_{cd,\text{cyc}} b z_{\text{cyc}(1)} \sum_{k=1}^5 \frac{a_{k,\text{cyc}}}{k+1} \left(\frac{\varepsilon_{c,\text{cyc}(1)}}{\varepsilon_{c1,\text{cyc}}} \right)^k. \quad (9)$$

Значення згинального моменту внутрішнього зусилля в стиснутому бетоні відносно нейтральної лінії визначається аналогічно:

$$M_{c,\text{cyc}(1)} = f_{cd,\text{cyc}} b z_{\text{cyc}(1)}^2 \sum_{k=1}^5 \frac{a_{k,\text{cyc}}}{k+2} \left(\frac{\varepsilon_{c,\text{cyc}(1)}}{\varepsilon_{c1,\text{cyc}}} \right)^k. \quad (10)$$

Після кінцевого знаходження цих значень, сумарний момент внутрішніх зусиль відносно нейтральної лінії знаходиться за формулою:

$$M_{S,\text{cyc}(1)} = f_{cd,\text{cyc}} b z_{\text{cyc}(1)}^2 \sum_{k=1}^5 \frac{a_{k,\text{cyc}}}{k+2} \left(\frac{\varepsilon_{c,\text{cyc}(1)}}{\varepsilon_{c1,\text{cyc}}} \right)^k + A_{s1} E_s \frac{\varepsilon_{c,\text{cyc}(1)}}{z_{\text{cyc}(1)}} (z_{\text{cyc}(1)} - a_1)^2 +$$

$$+ A_{s2,red} \alpha_f E_s \frac{\varepsilon_{c,cyc(1)}}{z_{cyc(1)}} (d - z_{cyc(1)})^2, \quad (11)$$

при цьому повинна виконуватися умова:

$$f_{cd,cyc} b z_{cyc(1)} \sum_{k=1}^5 \frac{a_{k,cyc}}{k+1} \left(\frac{\varepsilon_{c,cyc(1)}}{\varepsilon_{c1,cyc}} \right)^k = A_{s2,red} \alpha_f E_s \frac{\varepsilon_{c,cyc(1)}}{z_{cyc(1)}} (d - z_{cyc(1)}) - A_{s1} E_s \frac{\varepsilon_{c,cyc(1)}}{z_{cyc(1)}} (z_{cyc(1)} - a_1), \quad (12)$$

де $A_{s2,red}$ – приведена площа поперечного перерізу робочої арматури;

α_f – коефіцієнт, який приводить модуль пружності внутрішньої сталеві арматури до зовнішньої композитної арматури [8].

Збіжність між теоретичними та експериментальними даними.

Для перевірки запропонованого розрахункового апарату, проведено розрахунок експериментальних зразків згідно із наведеною методикою і порівняно з експериментальними даними (див. табл. 1).

Як видно із таблиці, запропонований розрахунковий апарат дає задовільну збіжність між теоретично обчисленими максимальними згинальними моментами, що може нести нормальний переріз підсиленних залізобетонних балок, та тими, що були встановлені експериментальним шляхом.

Висновок

Запропонований розрахунковий апарат дозволяє з задовільною точністю визначити несучу здатність підсиленних зовнішньою композитною арматурою згинальних залізобетонних елементів при дії на них малоциклових навантажень різних рівнів. Відносна похибка обчислень несучої здатності дослідних зразків лежить в межах -3,72...5,79 %. Це свідчить про можливість застосування такої методики для розрахунку реальних конструкцій, що піддаються дії повторних навантажень.

Summary

The article gives the calculations of bearing capacity of normal cross sections strengthened by composite materials of bending reinforced elements under the action of small cyclic loads of different levels. The results of proposed calculations have been compared to experimental data.

Таблиця 1

Експериментальна та теоретична несуча здатність дослідних зразків випробуваних малоцикловим навантаженням

№ п/ п	Назва балки	Вид підсилення	Рівень навантаження	Експери- менталь- ний зги- нальний момент	Теоретич- ний зги- нальний момент	Віднос- на похи- бка об- числень
				M_{ULS}^{exp} , кН×м	M_{ULS}^{teor} , кН×м	δ , %
1	БЦ1- 2(П1)	Стріч- ка	0,73	18,81	19,45	3,4
2	БЦ2- 2(П1)		0,73	18,81	18,72	-0,48
3	БЦ3- 1(П1)		0,81	19,87	19,13	-3,72
4	П1-Ц4		0,82	19,75	19,23	-2,63
5	БЦ1- 1(П2)	Поло- тно	0,74	16,16	17,02	5,32
6	БЦ2- 1(П2)		0,78	15,37	16,26	5,79
7	БЦ3- 2(П2)		0,85	16,16	15,88	-1,73
8	П2-Ц4		0,9	15,6	15,72	0,77

Література

1. Кваша В.Г. Розрахунок міцності нормальних перерізів залізобетонних балок, підсилених зовнішнім наклеєним композитним армуванням, на основі деформаційної моделі / Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. – Рівне, 2008. – Вип. 16. Ч.1. – С. 363 – 371.
2. Мурин А.Я. Міцність, жорсткість і тріщиностійкість залізобетонних балок, підсилених зовнішньою композитною арматурою: дис. канд. техн. наук: 05.23.01 / А.Я. Мурин. – Львів, 2011. – 163 с.
3. ДБН В.2.6-98:2009 Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення. – Київ: Мінрегіонбуд України, 2011. – 71 с.
4. ДСТУ Б В.2.6-156:2010. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування. – Київ: Міністерство регіонального розвитку та будівництва України, 2010. – 166 с.
5. Бабич Є.М. Розрахунок несучої здатності поперечних перерізів згинальних залізобетонних елементів / Бабич Є.М., Бабич В.Є., Савицький В.В. // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. – Рівне, 2012. – Вип. 23. – С. 94 – 103.
6. Бамбура А.М. До аналітичного описання діаграми механічного стану бетону при одноразовому короткочасному деформуванню // Будівельні конструкції: Збірник наукових праць. – Київ: НДІБК, 2002. – Вип. 57. – С. 31 – 34.
7. Бабич Є.М. Міцність і деформативність важкого бетону при малоцикловому стисненні / Є.М. Бабич, Н.І. Ільчук // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Збірник наукових праць. – Рівне: УДУВГП, 2003. – Вип. 9. – С. 116 – 123.
8. Борисюк О.П. Міцність, жорсткість та тріщиностійкість нормальних перерізів залізобетонних балок, підсилених композитними матеріалами / Борисюк О.П., Конончук О.П. // Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво). – Полтава: НТУ, 2012. – Випуск 2 (32), Т.2. – С. 3 – 10.