

УДК 624.01

**МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО  
СТАНУ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БАЛОК З ЗОВНІШНІМ ПІДСИЛЕННЯМ**

**A PROCEDURE FOR THE CALCULATION OF THE STRESS-STRAIN  
STATE OF REINFORCED CONCRETE BEAMS WITH EXTERNAL  
STRENGTHENING**

**Чеканович О.М., к.т.н., доц., ORSID ID 0000-0002-9110-4109,  
Журахівський В.П., асистент, ORCID ID: 0000-0002-7746-6162 (ДВНЗ  
«Херсонський державний аграрний університет», м. Херсон)**

**Chekanovych O.M., PhD in Engineering, associate professor, Zhurakhivskyi  
V.P., assistant lecturer, (Kherson State Agrarian University, Kherson)**

Стаття присвячена методиці розрахунку напружено-деформованого стану залізобетонних балок, підсилених новою зовнішньою стрижнево-котковою системою, що дозволяє врахувати тертя системи підсилення, дійсні діаграми бетону і сталі, а також деформаційну модель роботи конструкції під навантаженням. У дослідженні пропонується методика розрахунку таких підсилених балок на прикладі балки БП-VI (без жорстких важелів). Для серії підсилених балок БП-VI розрахунковий згинальний момент склав 15,508 кНм, а відповідний експериментальний момент становив 15,523 кНм. Для даної серії балок розбіжність – незначна, що підтверджує адекватність прийнятої моделі розрахунку.

The choice of an effective and convenient strengthening method is an important scientific and engineering problem. The paper presents a new structure for strengthening one-span reinforced concrete beams of rectangular cross-section. The new regulating system includes external flexible steel bars and rollers. The specific feature of the work of this system is the unloading of the beam's compressed zone, which results in efficient redistribution of stresses in the beam, significant increase in its carrying capacity and reduction in deformability, in contrast to a traditional strutted system that increases the negative impact of external load. In addition, the system effectively works under asymmetrical loads.

The article reveals a computation method based on the building codes in force, which takes into account the work of the external strengthening system. The computation method is realized using specially designed computer programs. The stress-strain state of the beam's cross-sections is determined considering the full « $\sigma$ - $\varepsilon$ » diagram and a specified discrete linear diagram of steel work. The study proposes a method of calculation of such strengthened beams by the example of strengthened beam БП-VI (without rigid levers). The technique takes into account the loss of tension because of friction under contact of external wire with rollers. The procedure considers the true

concrete and steel diagrams and the deformation model of the work of the structure under load. For the БП-VI series of reinforced beams the calculated bending moment was 15.508 kNm, and the corresponding experimental bending moment was 15.523 kNm. For this series of beams the discrepancy was insignificant, which confirms the adequacy of the calculation model БП-VI. The discrepancy is within permissible limits, indicating the reliability of experimental and theoretical studies, while a significant increase in carrying capacity and reduction in the beam's deformability confirms the expediency of the strengthening system proposed.

**Ключові слова:** напружено-деформований стан, підсилення, зовнішня стрижнево-коткова система, деформаційна модель.

**Вступ.** Залізобетонні згинані елементи є найбільш розповсюдженими несучими конструкціями будівель і споруд [1,6]. Для будівель, що перебувають у тривалій експлуатації, часто постає питання модернізації під сучасні вимоги або координальну зміну цільового призначення її приміщень. Такі зміни передбачають проведення реконструкції, а часто, і підсилення несучих конструкцій.

**Постановка проблеми.** При проведенні підсилення залізобетонних балок зовнішніми сталевими конструкціями, зокрема стрижнево-котковою системою [2,7], постає проблема оцінки ефективності їх роботи. Для цього необхідно розробити спеціальний розрахунковий апарат, що дозволить визначити напружено-деформований стан підсиленої балки.

**Метою роботи.** Метою роботи є запропонувати адекватну методику розрахунку напружено-деформованого стану залізобетонних балок, підсиленних новою зовнішньою стрижнево-котковою системою, що дозволяє врахувати дійсні діаграми бетону і сталі, а також деформаційну модель роботи конструкції під навантаженням.

**Теоретичні дослідження.** В рамках роботи запропоновано методику розрахунку підсиленних балок стрижнево-котковою системою. Розглянемо алгоритм розрахунку на прикладі підсиленої балки БП-VI (без жорстких важелів). При розрахунку приймається однопрольотна шарнірно обперта балка, яка завантажена двома зосередженими зусиллями, прикладеними в третинах прольоту та зосередженим навантаженням у вигляді власної ваги балки та ваги конструкції підсилення.

Для розв'язання задачі необхідно мати наступні вихідні дані: геометричні параметри перерізу балки:  $b, h$  та довжину  $l$ ; параметри діаграми деформування бетону:  $f_{cd}, f_{ck}, f_{ctk0.05}, E_{cd}, E_{ck}, \epsilon_{cL}, \epsilon_{cLck}, \epsilon_{cuLck}$ ; параметри армування балки:  $f_{yk}, E_s, \epsilon_{ud}, d_a$  – діаметр арматури,  $a_o$  – величину захисного шару бетону.

Розрахунковий блок «стрижнево-коткова система підсилення» включає наступні вихідні дані: параметри стрижнево-коткової системи підсилення:  $d_{азов}$  – діаметр зовнішньої арматури системи підсилення, параметри діаграми

« $\sigma_s$ - $\varepsilon_s$ » роботи сталі зовнішньої арматури та її аналітичний опис,  $f_{yk3OB}$ ,  $E_{s3OB}$ ,  $N_0$  – початкове зусилля в нижній частині гілки зовнішньої арматури,  $d$  – діаметр котка посередині прольоту,  $r$  – діаметр котків напівкільцевої закладної деталі на бічній грані балки,  $f$  - коефіцієнт тертя сталі по сталі,  $X_1, Y_1, X_2, Y_2 \dots X_8, Y_8$  - координати точок котків напівкільцевої закладної деталі на бічній грані балки.

Методика враховує втрати напруження через тертя на котках сегментної напівкільцевої закладної деталі в гілці зовнішньої арматури підсилення. Схема зусиль в гілці зовнішньої арматури підсилення і на котках представлена на рис. 1.

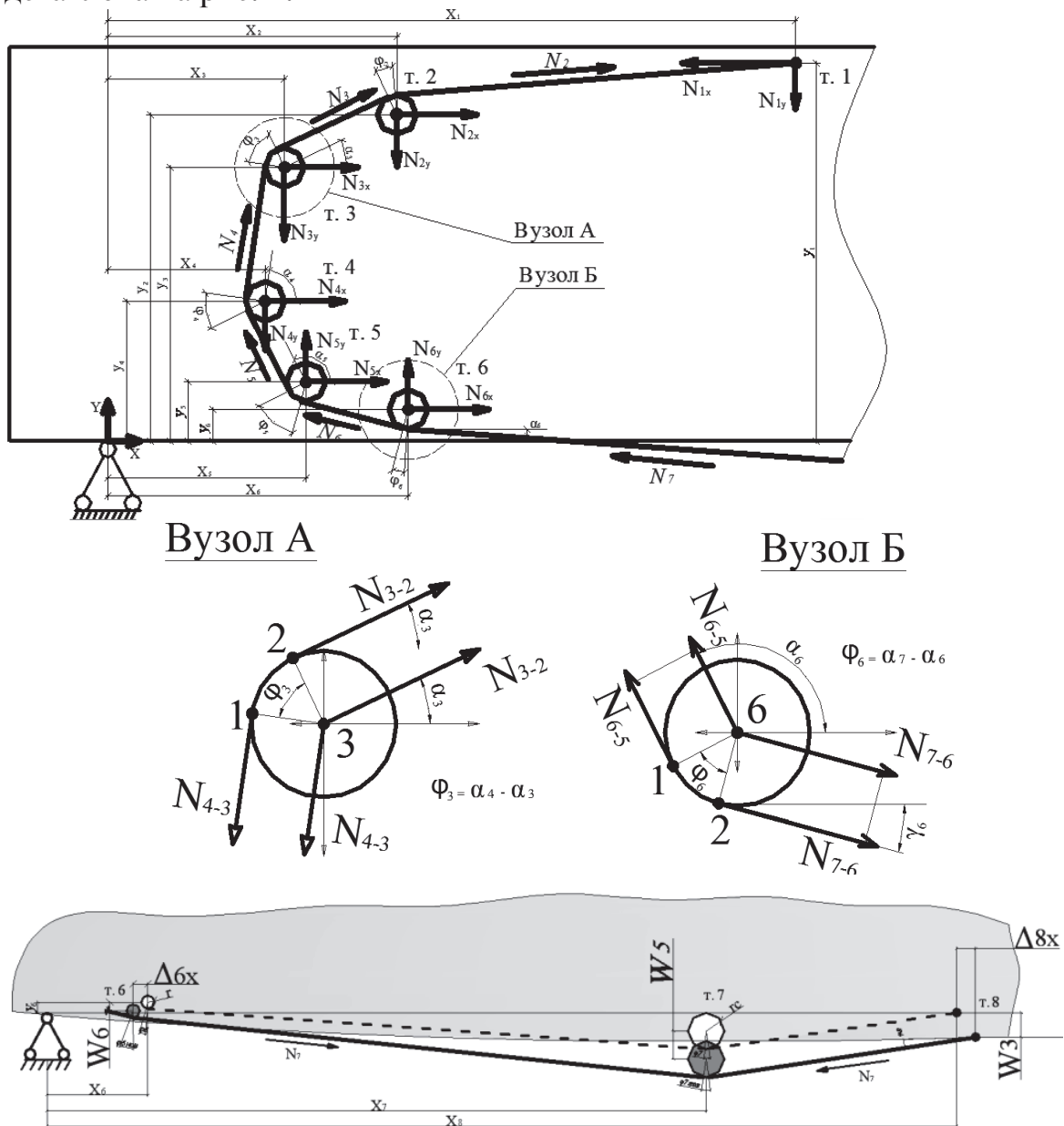


Рис. 1. Схема розподілу зусиль від дії конструкції підсилення  
де  $X_i, Y_i$  – координати котків та точок закріплення зовнішньої арматури на балці,  
 $N_i$  - зусилля в гілці зовнішньої арматури системи підсилення на відповідній ділянці,  $\varphi$   
– кут, за яким відбувається контакт гілки та котку,  $w_i$  - вертикальні переміщення  
(прогини),  $\Delta_i$  - горизонтальні переміщення

За наведеною вище схемою (рис. 1) було знайдене результуюче зусилля на боковій направляючій деталі від системи зовнішнього підсилення. Враховано втрати зусилля натягу в арматурі конструкції підсилення на котках через тертя. Розрахунок проведений зокрема, при зусиллі 2020 кг в кожній нижній арматурній гілці системи підсилення балки БП-VI під час експериментального випробування. Зусилля в зовнішній арматурі на кожній ділянці, починаючи від т.7 до т.1 знаходиться за формулою Ейлера:

$$N_{i-1} = \frac{N_i}{e^{f \cdot \phi_{i-1}}} \quad (1)$$

де  $N_i$  - зусилля у ведучій гілці;  $N_{i-1}$  - зусилля у ведомій гілці;  $f$  - коефіцієнт тертя сталі по сталі;  $\phi$  - кут, за яким відбувається контакт гілки та котку.

Після знаходження результуючого горизонтального і вертикального зусилля на сегментній закладній деталі основна розрахункова схема підсиленої балки має вигляд, представлений на рис. 2.

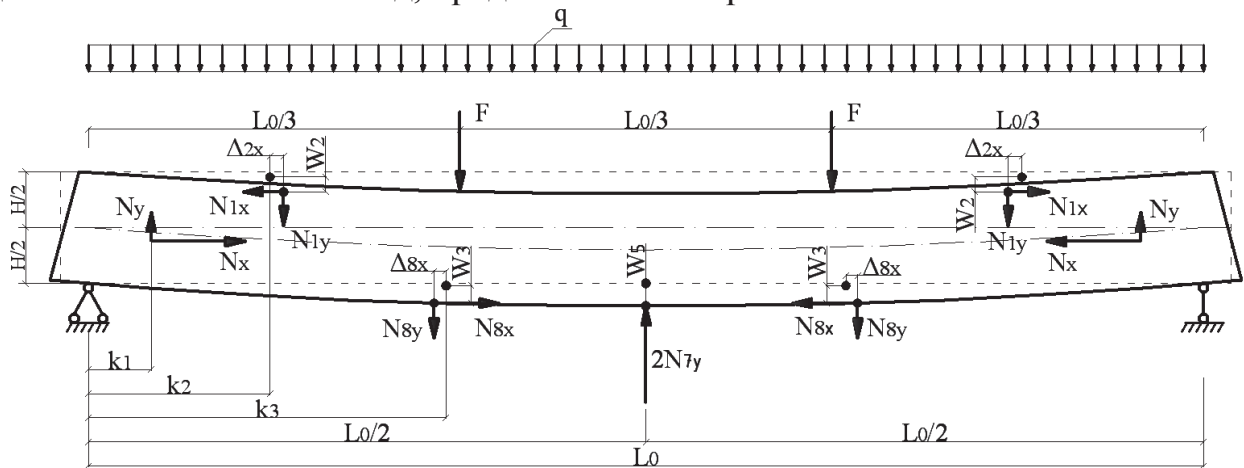


Рис. 2. Розрахункова схема балки, підсиленої зовнішньою арматурою, під дією двох зосереджених зусиль  $F$  та власної ваги  $q$

Для перевірного розрахунку такої підсиленої балки було застосовано алгоритм визначення напружено-деформованого стану нормальних перерізів, наведений в діючих нормах [1,2] з урахуванням повної діаграми роботи бетону.

Осереднена кривизна вигнутої осі в перерізі визначається залежністю:

$$\chi = \frac{1}{r} = \frac{\epsilon_{c(1)} - \epsilon_{c(2)}}{h} \quad (2)$$

де  $\epsilon_{c(1)}$  і  $\epsilon_{c(2)}$  – відносні фіброві деформації бетону.

У відповідності до [2] можливі два розрахункові випадки:

1) поздовжня арматура працює пружно;

2) поздовжня арматура знаходиться у стані текучості і напруження в ній  $\sigma_s$  дорівнює розрахунковому значенню міцності на границі текучості  $f_{yd}$ .

З урахуванням залежностей, наведених у п.4.2 [2] отримаємо:

$$\chi = \frac{A_s E_s \varepsilon_{c(1)} - N}{2 A_s E_s z_s} + \frac{\sqrt{(A_s E_s \varepsilon_{c(1)} - N)^2 + 4 A_s E_s z_s b f_{cd} \varepsilon_{c1} \Sigma}}{2 A_s E_s z_s}, \quad (3)$$

де

$$\Sigma = \sum_{k=1}^5 \frac{a_k}{k+1} \gamma^{k+1}$$

У другому випадку, коли  $\sigma_s = f_{yd}$  вираз для кривизни має вигляд

$$\chi = \frac{b f_{cd} \varepsilon_{c1} \Sigma}{f_{yd} A_s + N} \quad (4)$$

Висота стиснутої зони бетону:

$$x_1 = \frac{\varepsilon_{c(1)}}{\chi}; \quad (5)$$

Відносна кривизна:

$$\bar{\chi} = \frac{\chi}{\varepsilon_{c1}} \quad (6)$$

Відносна деформація арматури:

$$\varepsilon_s = \chi (x_1 - z_s) \quad (7)$$

де  $z_s$  - відстань від розтягнутої нижньої арматури до найбільш стиснутої грані перерізу;

Напруження в арматурі визначається за формулою:

$$\sigma_s = \varepsilon_s E_s \quad (8)$$

Згинальний момент, що сприймається перерізом:

- для першого випадку розрахунку, коли арматура працює пружно, і весь переріз стиснутий:

$$M_{Rd} = \frac{b f_{cd}}{\chi^2} \sum_{k=1}^5 \frac{a_k}{k+2} \left( \frac{\varepsilon_{c(1)}^{k+2} - \varepsilon_{c(2)}^{k+2}}{\varepsilon_{c1}^{k+2}} \right) + \sigma_s A_s (x_1 - z_s) \quad (9)$$

- для першого випадку розрахунку, коли арматура перебуває у стадії текучості, і весь переріз стиснутий:

$$M_{Rd} = \frac{bf_{cd}}{\chi^2} \sum_{k=1}^5 \frac{a_k}{k+2} \left( \frac{\varepsilon_{c(1)}^{k+2} - \varepsilon_{c(2)}^{k+2}}{\varepsilon_{c1}^{k+2}} \right) + \sigma_s A_s (x_1 - z_s) \quad (10)$$

- для другого випадку розрахунку, коли арматура працює пружно і в перерізі є зона розтягу :

$$M_{Rd} = \frac{bf_{cd}}{\chi^2} \sum_{k=1}^5 \frac{a_k}{k+2} \gamma^{k+2} + \sigma_s A_s (x_1 - z_s) \quad ; \quad (11)$$

- для другого випадку розрахунку, коли арматура перебуває у стадії текучості, і в перерізі є зона розтягу:

$$M_{Rd} = \frac{bf_{cd}}{\chi^2} \sum_{k=1}^5 \frac{a_k}{k+2} \gamma^{k+2} - f_{yd} A_s (x_1 - z_s) \quad ; \quad (12)$$

де

$$\gamma = \frac{\varepsilon_{c(1)}}{\varepsilon_{c1}}.$$

Після знаходження сумарного моменту, що сприймає арматура каркасу та бетон балки, визначається додатковий момент від системи підсилення. Для цього замінимо систему підсилення силами, що діють в місцях впливу конструкції підсилення на балку (рис. 2).

Для серії підсиленних балок БП-VI розрахунковий згинальний момент склав 15,508 кНм, а відповідний експериментальний момент становив 15,523 кНм [8]. Для даної серії балок розбіжність – незначна, що підтверджує адекватність прийнятої моделі розрахунку.

**Висновки.** Таким чином, запропоновано методику врахування дії зусиль стрижнево-коткової системи підсилення, що дозволяє достовірно оцінити роботу підсиленого зовнішньою сталевую арматурою згинаного залізобетонного елемента, що підтверджується результатами співставлення даних теоретичних досліджень з даними випробувань.

1. Бабич Є.М., Бабич В.Є. Розрахунок і конструювання залізобетонних балок: навчальний посібник/ Є.М. Бабич, В.Є. Бабич. – 2-ге видання, перероблене і доповнене.-Рівне: НУВГП, 2017.- С. 10-64.

Babich Ye.M., Babich V.Ye. Rozrakhunok i` konstruyuvannya zali`zobetonnikh balok: navchal`nij posi`bnik/ Ye.M. Babich, V.Ye. Babich. – 2-ge vidannya, pereroblene i` dopovnene.-Ri`vne: NUVGP, 2017.- S. 10-64.

2. Бетонные и железобетонные конструкции из тяжелого бетона. Основные положения: ДБН В.2.6-98:2009.- [Действ. от 2011-06-01]. - К., 2011.- 71 с. – (Государственные строительные нормы Украины).

Betonnye i zhelezobetonnye konstruksii iz tyazhelogo betona. Osnovnye polozheniya: DBN V.2.6-98:2009 [Deystv. ot 2011-06-01]. – K., 2011. – 71 s. – (Gosudarstvennye stroitelnye normy Ukrainy). <http://www.dbn.at.ua>.

3. Бетонные и железобетонные конструкции из тяжелого бетона. Правила проектирования: ДСТУ Б В.2.6-156:2010.- [Действ. от 2011-06-01]. - К., 2011.- 166 с. – (Национальный стандарт Украины).

Betonnye i zhelezobetonnye konstruksii iz tyazhelogo betona. Pravila proektirovaniya: DSTU B V.2.6-1568:2010 [Deystv. ot 2011-06-01]. – K., 2011. – 166 s. – (Gosudarstvennyi standart Ukrainy). <http://www.dbn.at.ua>.

4. Клименко Є.В. Технічна експлуатація та реконструкція будівель і споруд: навчальний посібник/ Є.В. Клименко. – К.: «Центр навчальної літератури», 2004. – С.171.

4. Klimenko E.V. Tehnichna ekspluatatsiya ta rekonstruktsiya budivel i sporud: navchalniy posibnik / E.V. Klimenko. – K.: Tsentr navchalnoyi literaturi, 2004. – S. 171. ISBN 966-8253-90-9.

5. Онуфриев Н.М. Усиление железобетонных конструкций промышленных зданий и сооружений/ Н.М. Онуфриев. – Л., 1965. -342 с.

Onufriev N.M. Usilenie zhelezobetonnykh konstruksiy promyshlennykh zdaniy i sooruzheniy. – Leningrad, 1965. - 342 s.

6.Тарг С.М. Краткий курс теоретической механики/ С.М. Тарг.–М.,1972.–С.94-103. Targ S.M. Kratkiy kurs teoreticheskoy mehaniki / S.M. Targ. – M., 1972. – S. 94 – 103.

7. Патент України (UA) № 109379 С2, МПК 2006 E04C 3/20, E04G 23/02. Конструкція балкова/ Чеканович М.Г., Журахівський В.П., Чеканович О.М.; заявник: Чеканович М.Г., Журахівський В.П., Чеканович О.М.; патентовласник: Чеканович М.Г.- №201410316 заявл. 22.09.2014; опубл. 10.08.2015. Бюл. № 15. – 3 с.

Pat. №109379 Ukrayina, MPK E 04S 3/20. Konstruktsiya balkova/ Chekanovich M.G., Zhurakhivskiy V.P., Chekanovich O.M.; zayavnik i patentovlasnik: Chekanovich M.G. - №a 201410316; zayavl. 22.09.2014; opubl. 25.02.2015, Vyul. № 4. <http://uapatents.com/6-109379-konstrukciya-balkova.html>.

8. Чеканович М.Г. Підсилення залізобетонних балок зовнішньою стрижнево-котковою системою/ М.Г. Чеканович, В.П. Журахівський, О.М. Чеканович//Ресурсоекономні матеріали, конструкції та споруди: зб. Наук. Праць, вип. 36. - Рівне, 2018.- С. 413-420.

Chekanovych M.H. Pidsylennia zalizobetonnykh balok zovnishnoiu stryzhnevo-kotkovoju systemoju/ M.H. Chekanovych, V.P. Zhurakhivskiy, O.M. Chekanovych//Resursoekonomni materialy, konstruksii ta sporudy: zb. Nauk. Prats, vyp. 36. - Rivne, 2018.- S. 413-420.