

УДК 624.01

DOI <https://doi.org/10.32851/tnv-tech.2021.6.20>

ЗАЛІЗОБЕТОННІ БАЛКИ, ПІДСИЛЕНІ СТРИЖНЕВО-КОТКОВОЮ СИСТЕМОЮ

Чеканович М.Г. – кандидат технічних наук,
професор кафедри будівництва, архітектури та дизайну
Херсонського державного аграрно-економічного університету
ORCID ID: 0000-0002-9110-4109

Scopus-Author ID: 57192938389&

Журахієвський В.П. – асистент кафедри будівництва,
архітектури та дизайну
Херсонського державного аграрно-економічного університету
ORCID ID: 0000-0002-7746-6162

Розроблена система підсилення залізобетонних балок, що дозволяє підсилити не лише розтягнуту нижню її зону при навантаженні, але й верхню стиснену. При цьому досягається це дією лише одного гнучкого сталевого стрижневого елемента, що зв'язує стиснену і розтягнену зони балки.

Вперше вдалося підсилити стиснену зону балки не традиційними масивними стиснутими елементами, а гнучкими розтягнутими елементами мінімального поперечного перерізу. Для зміни напрямку дії сил на балку від стиску розтягнутої зони до розтягу стиснутої її зони застосована система котків. Корегування сил тертя кочення на котках дозволило автоматично регулювати співвідношення сил між стиском балки у відповідній зоні та її розтягом для досягнення максимального ефекту підсилення.

У статті викладена методика розрахунку напружено-деформованого стану залізобетонних балок, підсилених новою зовнішньою стрижнево-котковою системою, що дозволяє врахувати тертя системи підсилення, дійсні діаграми бетону й сталі, а також деформаційну модель роботи конструкції під навантаженням.

Представлено нову конструкцію для посилення однопрогонових залізобетонних балок прямокутного перерізу з використанням зовнішніх гнучких сталевих стрижнів. Схему посилення балок забезпечує система котків. У дослідженні пропонується метод розрахунку таких посилених балок. Спосіб розрахунку враховує втрату напруги через тертя при контакті зовнішнього дроту з роликами.

Процедура розглядає повну діаграму роботи бетону з низхідною гілкою та дискретно лінійну роботу сталі. Модель враховує деформації конструкції під навантаженням. Для армованих підсилених балок визначається розрахунковий згинальний момент.

Ключові слова: міцність, підсилення, зовнішня стрижнево-коткова система, деформаційна модель, тертя.

Chekanovych M.H., Zhurakhivskiy V.P. Reinforced concrete beams strengthened with a rod-roller system

A system of strengthening reinforced concrete beams has been developed, which allows us to strengthen not only the stretched lower zone under load, but also the upper compressed one. This is achieved by the action of only one flexible steel rod element that connects the compressed and stretched zones of the beam.

For the first time it became possible to strengthen the compressed zone of the beam not with traditional massive compressed elements, but with flexible stretched elements of minimal cross-section. For changing the direction of the action of forces on the beam from the compression of the stretched zone to the tension of the compressed zone a system of rollers is used. The adjustment of rolling friction forces on rollers allowed automatical regulation of the balance of forces between the compression of the beam in the corresponding zone and its tension to achieve the maximum effect of strengthening.

The article describes the method of calculating the stress-strain state of reinforced concrete beams reinforced with a new external rod-roller system, which allows taking into account the friction of the reinforcement system, actual concrete and steel diagrams, as well as the deformation model of the structure under load.

A new system for strengthening single-span reinforced concrete beams of rectangular cross-section using external flexible steel rods is presented. The procedure of strengthening of beams is provided by the system of rollers. The study proposes a method of calculating such reinforced beams. The calculation method considers the loss of tension due to the friction when the external wire is in contact with the rollers.

The procedure considers a complete diagram of the work of concrete with a descending branch and discrete linear behavior of steel. The model takes into account the deformation of the structure under load. The paper determines the estimated bending moment for reinforced concrete beams.

Key words: strength, reinforcement, external rod-roller system, deformation model, friction.

Вступ. На сучасному етапі економічного розвитку України важливим завданням будівельної галузі представляється не тільки нове будівництво, але й відновлення, реконструкція не тільки житлових будівників, а й виробничих будівель і інженерних споруд, де проблема підсилення залізобетонних балок за допомогою зовнішньої саморегульованої системи для забезпечення міцності є актуальною [1–3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відомі у будівельній практиці залізобетонні балки підсилені зтяжками різного типу. Традиційно зтяжка розташовується у нижній розтягнутій зоні балки і закріплена по кінцях біля опор балки на торцях. Робота зтяжки при навантаженні балки підсилює її нижню розтягнуту зону і не впливає на міцність стиснутої верхньої зони балки. З технологічної точки зору важко, а інколи і неможливо закріпити зтяжку на торцях балки через відсутність достатнього зазору [1–4].

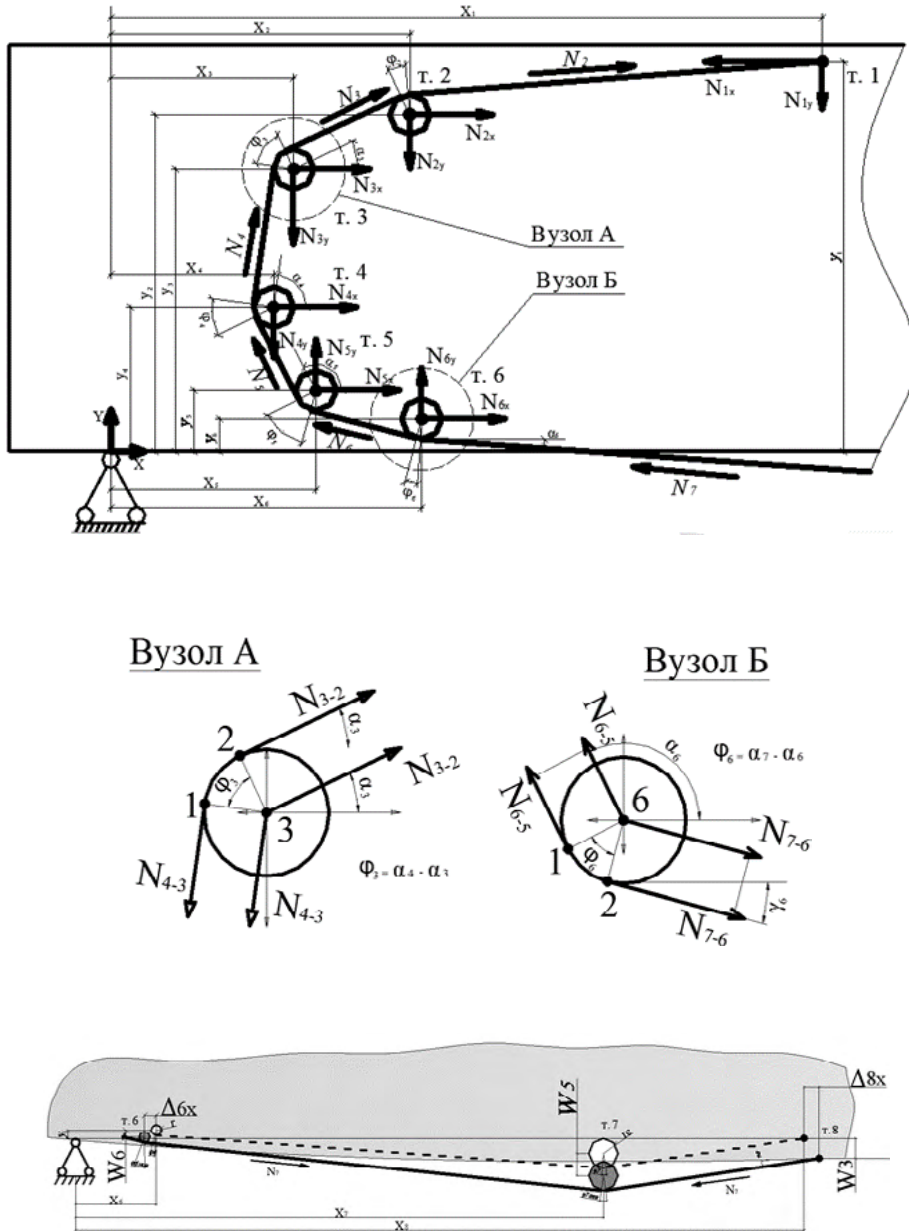
Більш сучасним удосконаленням зтяжки може вважатися шпренгельна зтяжка, де кінці останньої закріплюються у верхній зоні балки над її опорами. В цьому випадку при навантаженні балки остання прогинається, гнучка зтяжка напружується, і її кінці дотискають стиснену верхню зону балки. Це знижує міцність верхньої зони балки через додаткові напруги від шпренгеля і негативно впливає на її роботу [5].

Постановка проблеми. Для використання резерву міцності стиснутої зони балки, розвантаження її системою підсилення постала нагальна потреба розробки нової системи зовнішнього підсилення. Така система повинна забезпечити можливість підсилення як нових балок, так і тих, що вже тривалий час експлуатуються не тільки у нижній розтягнутій зоні, але й у верхній стиснутій зоні балки.

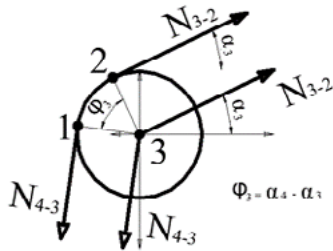
При проведенні підсилення залізобетонних балок зовнішньою сталевією системою постає проблема оцінки ефективності їх роботи. Для цього необхідно розробити спеціальний розрахунковий апарат, що дозволить визначити напружено-деформований стан підсиленої балки.

Метою дослідження є розробка стрижнево-коткової системи підсилення та розробка основ методики 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.

Виклад основного матеріалу дослідження. У рамках роботи запропоновано нову стрижнево-коткову систему підсилення і методику розрахунку підсиленних нею балок [6]. Розглянемо алгоритм розрахунку підсиленої балки. При розрахунку приймається однопрогонова шарнірно обперта балка, яка завантажена двома зосередженими зусиллями, прикладеними в третинах прольоту та зосередженим навантаженням у вигляді власної ваги балки та ваги конструкції підсилення.



Вузол А



Вузол Б

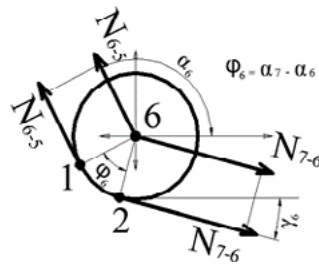


Рис. 1. Схема розподілу зусиль від дії конструкції підсилення:
 X_i , Y_i – координати розташування котків та точок закріплення зовнішньої арматури на балці, N_i – зусилля в гілці зовнішньої арматури системи підсилення на відповідній ділянці, φ – кут, за яким відбувається контакт гілки та котку, w_i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

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} , ϵ_{cl} , $\epsilon_{cl,ck}$, $\epsilon_{cuL,ck}$; параметри армування балки: f_{yk} , E_s , ϵ_{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 « σ_s - ϵ_s » роботи сталі зовнішньої арматури та її аналітичний опис, $f_{yk30\%}$, $E_{s30\%}$, 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, що можуть розташовуватися на напівкільцевій закладній деталі на бічній грані балки.

Методика враховує втрати напруження через тертя [7] 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.

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 проводиться в кожній нижній арматурній гілці системи підсилення балки. Зусилля в зовнішній арматурі на кожній ділянці, починаючи від т. 7 до т. 1, знаходиться за формулою Ейлера [7]:

$$N_{i-1} = \frac{N_i}{e^{f \cdot \varphi_{i-1}}}, \tag{1}$$

де N_i – зусилля у ведучій гілці; N_{i-1} – зусилля у гілці, що ведеться; f – коефіцієнт тертя сталі по сталі; φ – 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.

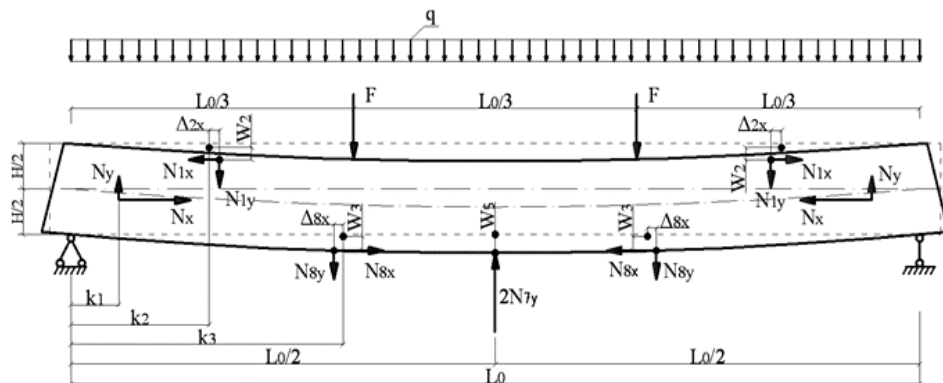


Рис. 2. Розрахункова схема балки, підсиленої зовнішньою арматурою, під дією двох зосереджених зусиль F та власної ваги q

Для розрахунку такої підсиленої балки було застосовано алгоритм визначення напружено-деформованого стану нормальних перерізів, наведений в діючих нормах [2; 3; 8] з урахуванням повної діаграми роботи бетону.

Осереднена кривизна вигнутої осі в перерізі визначається залежністю:

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

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

Відповідно до [8] можливі два розрахункові випадки:

- 1) поздовжня арматура працює пружно;
- 2) поздовжня арматура знаходиться у стані текучості, і напруження в ній σ_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:

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

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

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

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

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

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

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

де

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

Після знаходження моменту, що сприймає арматура каркасу та бетон балки, визначається додатковий момент від системи підсилення. Для цього був замінений вплив системи підсилення силами, що діють балку в місцях їх контакту. Сумарний, інтегральний момент опору залізобетонної балки і стрижнево-коткової системи підсилення визначає несучу здатність конструкції.

Висновки й пропозиції.

1. Розроблено нову стрижнево-коткову систему підсилення залізобетонних балок, яка включає гнучкі сталеві елементи, що охоплюють групу котків біля опор балки.

2. Запропоновано методику врахування дії зусиль стрижнево-коткової системи підсилення, що дозволяє оцінити зміцнення підсиленого зовнішньою сталевую арматурою згинаного залізобетонного елемента.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Бабич С.М., Бабич В.С. Розрахунок і конструювання залізобетонних балок : навчальний посібник. 2-ге видання, перероблене і доповнене. Рівне : НУВГП, 2017. С. 10–64.
2. ДБН В.2.6-98:2009. Бетонные и железобетонные конструкции из тяжелого бетона. Основные положения. [Действителен от 2011-06-01]. Киев, 2011. 71 с. (Государственные строительные нормы Украины).
3. ДСТУ Б В.2.6-156:2010. Бетонные и железобетонные конструкции из тяжелого бетона. Правила проектирования. [Действителен от 2011-06-01]. Киев, 2011. 166 с. (Национальный стандарт Украины).
4. Клименко С.В. Технічна експлуатація та реконструкція будівель і споруд : навчальний посібник. Київ : «Центр навчальної літератури», 2004. 171 с.
5. Онуфриев Н.М. Усиление железобетонных конструкций промышленных зданий и сооружений. Ленинград, 1965. 342 с.
6. Конструкція балкова : пат. України (UA) № 109379 С2, МПК 2006 E04C 3/20, E04G 23/02 / М.Г. Чеканович, В.П. Журахівський, О.М. Чеканович ; заявник : М.Г. Чеканович, В.П. Журахівський, О.М. Чеканович ; патентовласник : М.Г. Чеканович ; № 201410316 заявл. 22.09.2014 ; опубл. 10.08.2015. Бюл. № 15. 3 с.
7. Тарг С.М. Краткий курс теоретической механики. Москва, 1972. С. 94–103.
8. Чеканович М.Г., Янін О.С. Розрахунок будівельних конструкцій : навчальний посібник. Видання 2-ге, доповнене і перероблене. Херсон : ОЛДІ-ПЛЮС, 2021. С. 57–77.

REFERENCES:

1. Babich, Ye.M., Babich, V.Ye. (2017). Rozrakhunok i' konstruyuvannya zali'zobetonnikh balok: navchal'nij posi'bnik/ Ye.M. Babich, V.Ye. Babich. Ri'vne: NUVGP, 10–64 [in Ukrainian].
2. DBN V.2.6-98:2009. Betonnye i zhelezobetonnye konstruktsii iz tyazhelogo betona. Osnovnye polozheniya [Concrete and reinforced concrete structures made of heavy concrete. Basic Provisions]. Kyiv. 2011. 71 s. <http://www.dbn.at.ua> [in Russian].
3. DSTU B V.2.6-1568:2010. Betonnye i zhelezobetonnye konstruktsii iz tyazhelogo betona. Pravila proektirovaniya [Concrete and reinforced concrete structures made of heavy concrete. Design rules]. Kyiv. 2011. 166 s. <http://www.dbn.at.ua> [in Russian].

4. Klimenko, E.V. (2004). Tehnichna ekspluatatsiya ta rekonstruktsiya budivel i sporud: navchalniy posibnik / E.V. Klimenko. Kyiv: Tsentri navchalnoyi literaturi, 171 [in Ukrainian].
 5. Onufriev, N.M. (1965). Usilenie zhelezobetonnykh konstruktsiy promyshlennykh zdaniy i sooruzheniy [Reinforcement of reinforced concrete structures of industrial buildings and structures]. Leningrad. 342 s. [in Russian].
 6. Pat. №109379 Ukrayina, MPK E 04S 3/20. Konstruktsiya balkova / Chekanovich M.G., Zhurahivskiy V.P., Chekanovich O.M.; zayavnik i patentovlasnik: Chekanovich M.G. №a 201410316; zayavl. 22.09.2014; opubl. 25.02.2015, Byul. № 4. <http://uapatents.com/6-109379-konstrukciya-balkova.html>.
 7. Targ, S.M. (1972). Kratkiy kurs teoreticheskoy mehaniki [A short course of theoretical mechanics]. Moscow. 94–103 [in Russian].
 8. Rozrakhunok budivelnykh konstruktsii: navchalnyi posibnyk / M.H. Chekanovich, O.Ie. Yanin. Kherson: OLDI-PLIuS, 2021, 57–77 [in Ukrainian].
-