

РУЙНУВАННЯ СТАЛЕБЕТОННОЇ БАЛКИ ПО КОНТАКТУ СТАЛІ Й БЕТОНУ ТА ПО ПОХИЛІЙ ТРІЩИНІ

Петров А. М.¹, Синьковська О. В.², Шептун С. Ю.¹, Марченко М. В.¹,
Ігнатенко А. В.³, Грецький Д. В.³, Пряник С. П.³

¹Державний біотехнологічний університет

²Харківський національний автомобільно-дорожній університет

³Черкаський державний технологічний університет

Анотація. Об'єктом дослідження є сталобетонна балка. У статті продовжено випробування, внаслідок яких уточнено алгоритм підбору кількості жорстких упорів для балки із сталобетону, навантаженої поперечною зосередженою силою посередині прогону. Роботу присвячено вдосконаленню конструкції сталобетонних балок. Раціональна кількість і розташування жорстких опор дасть змогу заощадити, зокрема зменшити необхідну кількість будівельних матеріалів, і знизити їх вартість унаслідок скорочення витрат праці, пов'язаних з їх виготовленням та експлуатацією.

Ключові слова: сталобетонна балка, жорстка опора, крок упора, сили в упорі, контакт сталі й бетону, похила тріщина.

Вступ

Однією з найважливіших індустріальних галузей у світі є будівництво – промислове й цивільне. Спостерігається постійне збільшення кількості будівельних об'єктів. Крім їх кількості, зростає і складність зведення, пов'язана як зі збільшенням розмірів споруд, так і з труднощами реалізації необхідних проектних рішень. Це і обмежені площі, і прогони, що збільшуються, і особливі умови зведення та експлуатації будівельних об'єктів. З огляду на це необхідне постійне поліпшення міцнісних і деформаційних властивостей будівельних конструкцій. Відповідно, виникає потреба вдосконалення наявних і створення нових будівельних конструкцій та проектних рішень. Одним із таких рішень є використання конструкцій зі сталобетону.

Аналіз публікацій

У роботі [1] досліджено сталобетонні балки, виготовлені з бетонної суміші з додаванням гуми. У праці [2] подано результати вивчення балок, для виготовлення яких до складу суміші додають металеву фібру. У роботі [3] сталева фібра додавалася не хаотично, а в певному порядку. Фібра була покладена вздовж усієї балки. У дослідженні [4] описано виготовлення бетонної суміші з використанням базальтової фібри. Крім того, для поліпшення зчеплення базальтових волокон із цементною матрицею застосовувалося вакуумування. Автори роботи [5] розглядали покращення властивостей бетону внаслідок

додавання до складу комплексних домішок. У наведених студіях продемонстровано способи підвищення механічних властивостей бетону. Однак це було досягнуто завдяки більш раціональному використанню матеріалу, а не вдосконаленню конструкції балки.

У роботі [6] досліджено сталобетонні конструкції в особливих умовах, зокрема в сейсмонезбезпечних районах, що передбачає підвищені вимоги до будівельних споруд. Продemonстровано, що розглянуті конструкції цілком надійні й можуть бути застосовані в районах зі складними умовами роботи. Це доводить, що сталобетонні конструкції мають переваги, якщо порівнювати з іншими видами споруд. Однак питання вдосконалення конструкції в цій статті не розглядалися, оскільки робота має дослідницький характер.

Останнім часом значна кількість розвідок присвячена вдосконаленню сталобетонних конструкцій. Одним із важливих способів їх міцності є з'єднання сталі з бетоном, зокрема застосування жорстких упор або гнучких анкерів. У роботах [7, 8] проведено чисельні дослідження сталобетонних конструкцій. Показано, що конструктивні зміни сталобетонних конструкцій можуть сприяти підвищенню міцності й деформативних властивостей. Для з'єднання сталі з бетоном використовували анкери. Питання раціонального розміщення анкерів не розглядалося.

У роботі [9] подано результати досліджень сталобетонних балок. Випробування було присвячено знаходженню оптимального

співвідношення арматури у вигляді сталевих листів і традиційної у вигляді стрижнів. Показано, що комбіноване використання в балках різних видів арматури сприяє покращенню функціонування балки. Отже, питання вдосконалення сталобетонних конструкцій має безліч різних напрямів. Їх властивості можна поліпшувати різними способами, кожен з яких, безумовно, вартий уваги та має практичну цінність. Однак необхідно зауважити, що хоча в роботі й були використані анкери, питання їх раціонального розставлення не розглядалося.

У праці [10] досліджено комбіновані сталезалізобетонні балки. Такий вид балок містить залізобетонні полиці, арматурний каркас і сталевий елемент з тавровим профілем. Доведено їх ефективність, проте дослідження спрямовано на способи з'єднання частин конструкції, а не на визначення оптимальної кількості сполучених елементів.

У праці [11] регламентовано конструкції сталобетонних балок. Для поєднання сталевих листів з бетоном автори застосовували не жорсткі упори, а гнучкі анкери. Такий спосіб об'єднання не можна вважати абсолютно жорстким. Анкерам властива податливість, що призводить до зсуву сталевих листів. Це необхідно брати до уваги в процесі розрахунку.

Існує чимало видів гнучких анкерів, податливість яких не однакова. Отже, методика розрахунку ускладнюється. У роботі [12] подано результати експериментальних досліджень сталезалізобетонних балок складеного композитного перерізу. Для їх посилення використовувалися сталеві листи, об'єднувальними елементами застосовано систему болтових плит прямого зсуву. Така система довела доцільність сполучення компонентів балки. Крім того, перевагою є простота такого з'єднання. Дослідження демонструють, що жорсткі упори або гнучкі анкери можуть бути найрізноманітнішими видами сполучених елементів. Такі конструкції продемонстрували високу ефективність, але питання їх раціональної кількості в роботах не розглядалося.

Необхідно зазначити, що спосіб об'єднання елементів сталобетонної балки за допомогою жорстких упорів або гнучких анкерів застосовується не завжди. У роботі [13] запропоновано результати експериментальних досліджень сталобетонних балок. Об'єднання сталевих листів з бетоном проведено за допомогою склеювання. У роботах [14, 15] сталь і бетон з'єднували також за допомогою

склеювання. Використано різні види клею, як правило, на акриловій основі. Метод склеювання, безумовно, має переваги. Однак, оскільки така методика впроваджується відносно нещодавно, вона вивчена недостатньо. Зокрема не можна говорити про надійність і довговічність таких конструкцій, оскільки поки експериментально не доведено тривалість їх роботи.

Відомі дослідження, спрямовані на вдосконалення конструкції балок унаслідок зміни форми перерізу. У роботі [16] досліджено таврові балки, посилені на сприйняття сил зсуву пластинами з армованого полімерволокна. У праці [17] описано випробування, спрямовані на мінімізацію ваги й вартості таврових балок. Значну увагу приділено роботі балок на зсув. Однак удосконалення балок за допомогою кращого сприйняття сил зсуву досягається не внаслідок раціонального розміщення упорів, а завдяки посиленню балки додатковими компонентами.

У роботі [18] розглянуто питання опору балок зсувним силам. Варіювалися види та кількість поздовжньої арматури. Автор дослідження [19] запропонував методику оцінювання міцності бетону на зсув. Базова міцність на зсув визначалася перетином кривих навантаження й опору. Експериментальні й теоретичні дослідження в роботі [20] спрямовані на збільшення опору зсуву за допомогою застосування в бетоні коротких волокон. Отже, можна стверджувати, що питанням опору зсуву в балках приділяється велика увага. Поліпшення роботи балки на зсув може досягатися багатьма способами, кожен із яких має право на існування.

У попередніх наших дослідженнях [21–23] розроблено алгоритм підбору жорстких упорів у сталобетонних балках. Крок жорстких упорів прийнятий однаковим, крім нульового прогону, з метою отримати однакові сили в упорах. За умови неоднакового кроку упорів поздовжня сила в сталевому листі, як і в разі однакового кроку, зменшуватиметься від середини прогону до упорів, проте сили в упорах будуть різними, що вимагатиме використання жорстких упорів різного перерізу. Доведено, що висота стиснутої зони бетону вздовж балки змінюється. Проте зміна висоти стиснутої зони не значна, тому що висота перерізу балки не велика. Зазвичай у балках використовуються упори однакової висоти. Такий самий підхід рекомендований і в роботі [24]. Однаковий крок і висота упорів спрощують процес виготовлення сталобетонних балок, що робить їх більш технологі-

чними й простими у виготовленні. Висоту упорів бажано приймати рівною висотою стиснутої зони бетону, тобто руйнування бетону може відбуватися по похилій тріщині, що було розглянуто. Крім цього, такий підхід допоможе уніфікувати конструкцію балок, що дасть змогу виготовляти їх за типовими проектами і з можливістю використання потокових технологічних ліній. Все це сприятиме зменшенню собівартості конструкцій [25].

Аналіз літературних джерел демонструє, що сталобетонні конструкції загалом і сталобетонні балки зокрема, набули значного поширення. Дослідження проводяться в різних напрямках: пошук нових чи вдосконалення відомих матеріалів, випробовування сучасних конструктивних рішень. Конструктивні рішення пов'язані насамперед на створення нових і вдосконалення наявних конструкцій. Конструкція сталобетонних балок широко застосовується в будівництві, однак матеріали в них використовуються не раціонально. Сучасні дослідження присвячено більш ефективному застосуванню матеріалів, що має сприяти збільшенню несної здатності конструкції за умови меншої її ваги.

Мета й постановка завдання

1. Довести, що попередньо розроблений алгоритм дає змогу в процесі проектування сталобетонних балок перевіряти бетон на зминання під упорами й на відрив по похилій тріщині, а також на зріз сталевих упорів.

2. Продемонструвати, що попередньо розроблений алгоритм допомагає здійснювати діагностику сталобетонних балок у процесі експлуатації, особливо після тривалого терміну експлуатації та змінних навантажень, оскільки в цьому разі змінюються розрахункові опори бетону й сталі.

Визначення нормальної та контактної руйнівної сили, а також руйнування бетону по похилій тріщині та зрізу упорів за похилою тріщиною сталобетонної балки

У проектуванні сталобетонних балок необхідно розробити методику їх розрахунку. Насамперед ідеться про вибір оптимальних розмірів поперечного перерізу балки для заданого навантаження, вибір конструкції жорстких упорів, кількості, кроку й сил, що виникають в них.

Розрахунок сталобетонних балок із силою, прикладеної посередині балки, було запропоновано в [26], зокрема подано вирази для визначення максимального напруження в

сталевій смузі та в стиснутій зоні бетону, які не мають перевищувати розрахункових опорів сталі R_s та бетону R_b .

Визначення сил, що діють на жорсткі упори, їх крок і кількість було розглянуто в студіях [21–23].

Крім цього, необхідно перевіряти міцність контакту листа й бетону, коли зсувні сили по сталевому листу можуть бути більшими за розрахункову силу, що діє на стислу зону бетону, а також перевіряти руйнування в балці бетону по похилій тріщині та зрізу упорів по похилій тріщині.

Усі розрахунки будуть важливі для проведення діагностики в процесі експлуатації.

Необхідно визначити руйнівну силу за нормальним перерізом. Для знаходження нормальної сили, що діє посередині балки, за відомих розмірів поперечного перерізу й властивостей бетону й сталі виконаємо розрахунки. З [26] відомо, що напруження в бетоні та сталевому листі визначаються за формулами: $\sigma_b = \frac{N_b}{z \cdot b} \leq R_b$ і $\sigma_s = \frac{N_s}{\delta \cdot b} \leq R_s$.

Звідси

$$N_b = R_b \cdot z \cdot b, N_s = R_s \cdot \delta \cdot b. \quad (1)$$

Розрахунковий згинальний момент дорівнює

$$M^p = \frac{F_H \cdot l_p}{4}, \quad (2)$$

звідси

$$F_H = \frac{4 \cdot M_p}{l_p}. \quad (3)$$

Внутрішній згинальний момент визначається як добуток моментів щодо центра ваги перерізу сталевієї смуги (рис. 1)

$$M_e = N_b \cdot a_1 = N_b \left(h - \frac{z}{2} + \frac{\delta}{2} \right). \quad (4)$$

Внутрішній згинальний момент дорівнює розрахунковому згинальному моменту $M_e = M_p$. Прирівняємо (2) до (4) і отримаємо

$$\frac{F_H \cdot l_p}{4} = N_b \left(h - \frac{z}{2} + \frac{\delta}{2} \right). \quad (5)$$

З $\sum X = 0$; $N_b - N_s = R_b \cdot b \cdot z - R_s \cdot b \cdot \delta = 0$ визначаємо

$$z = \frac{R_s \cdot \delta}{R_b}. \quad (6)$$

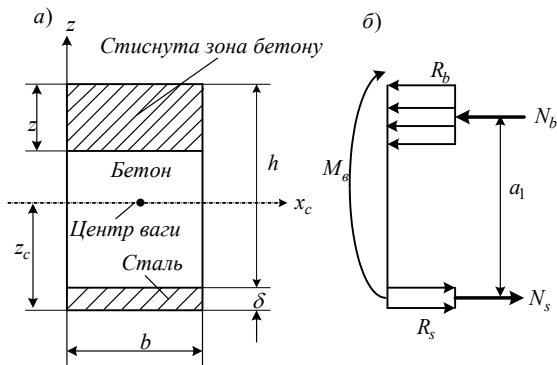


Рис. 1. Переріз сталобетонної балки

Підставивши в (5) значення (6) і (1), отримаємо

$$\frac{F_H \cdot l_p}{4} = R_b z b \left(h - \frac{z}{2} + \frac{\delta}{2} \right), \quad \frac{F_H \cdot l_p}{4} = R_b \frac{R_s \delta}{R_b} b \left(h - \frac{R_s \delta}{2 R_b} + \frac{\delta}{2} \right),$$

звідси

$$F_H = \frac{4 R_s \cdot b \cdot \delta}{l_p} \left(h - \frac{R_s \delta}{2 R_b} + \frac{\delta}{2} \right). \quad (7)$$

Руйнівна сила по нормальному перерізу для балки на двох опорах, завантаженої посередині силою, з відомими розмірами поперечного перерізу та властивостями бетону й сталі визначається за формулою (7).

У наведених формулах:

σ_b – максимальне напруження в стиснутій зоні бетону;

σ_s – максимальне значення напружень в розтягнутій сталевій смугі;

N_b – стискальна сила, що діє на бетон;

N_s – розтяжна сила, що діє на сталеву смугу;

δ – товщина сталевих смуг;

b – ширина балки;

l_p – розрахунковий прогін балки;

R_s – розрахунковий опір сталі;

R_b – розрахунковий опір бетону.

Крім руйнування по нормальному перерізу, упори можуть руйнуватися, як було зазначено раніше, по контакту бетону й сталі. Для визначення міцності контакту листа й сталі розглянемо деформовану сталобетонну балку (рис. 2).

Упроваджено декілька передумов.

1. Всі проміжні жорсткі упори сприймають однакові сили.

2. Жорсткі упори зазнають зрізання, зминання.

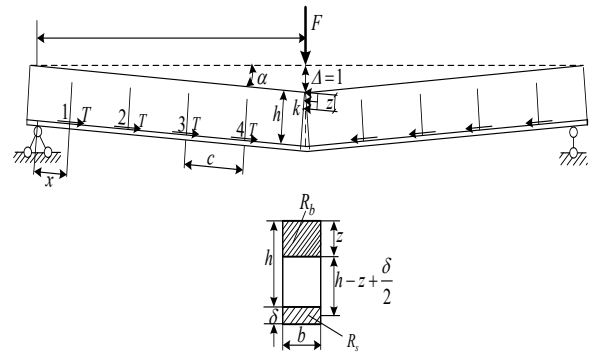
3. Крок проміжних жорстких упорів приймається постійний.

4. Бетон під жорсткими упорами зазнає деформації зрізання та зминання.

5. Бетон між упорами зазнає деформації зрізання й розтягання.

6. Прогини малі порівняно з розмірами поперечних перерізів.

Приймаємо передумову, коли прогини малі. Визначаємо кут повороту дисків за одиничного переміщення (рис. 2).



1, 2, 3, 4 – диски балки; T – сила зсуву або зминання одного упора; M'_k – момент сили T щодо точки k ; $\alpha = \frac{\Delta}{l/2} = \frac{2\Delta}{l}$ – кут повороту диска

Рис. 2. Деформована сталобетонна балка

Робота внутрішніх сил передбачає роботу зсуву жорстких упорів A_y й роботу сил стиснутої зони бетону A_b .

Робота зсуву жорстких упорів виражається залежністю

$$A_y = 2 \cdot M'_k \cdot \alpha = 2 \cdot T \cdot n \cdot (h - z) \alpha = 2 T n (h - z) \frac{2\Delta}{l}. \quad (8)$$

Можна вважати граничне напруження в бетоні постійним по ширині балки b і рівним міцності бетону за умови одноосового стискування (спрощення без суттєвої похибки).

Якщо визначати величину стиснутої зони бетону z з умови суми проєкцій сил на вісь X , тобто $Tn = R_{bn} \cdot z \cdot b \cdot n$, то це значення відрізнятиметься від значення, отриманого під час підбору розмірів поперечного перерізу балки й визначення кількості упорів. Кількість упорів може виходити не цілим числом. Цього не має бути, отже, це значення округлялося до цілого числа. Водночас змінювалися й величини z і T . Тому величину стиснутої зони бетону визначаємо за формулою (6).

Робота сил стисненої зони бетону виражається залежністю:

$$A_b = 2 \cdot M_{b(k)} \cdot \alpha = 2 \cdot R_b \cdot b \cdot \frac{z^2}{2} \alpha = 2 \cdot R_b \cdot b \cdot \frac{z^2}{2} \cdot \frac{2\Delta}{l},$$

де $M_{b(k)} = R_b b \frac{z^2}{2}$ – момент стисненої зони бетону щодо точки k .

$$A_b = 2 \cdot R_b \cdot b \cdot \frac{z^2 \Delta}{l}. \quad (9)$$

Повна робота внутрішніх сил

$$A = A_y + A_b = \frac{2\Delta}{l} [2Tn(h-z) + R_b b z^2]. \quad (10)$$

Робота зовнішніх сил

$$A_g = F_k \cdot \Delta. \quad (11)$$

Робота зовнішніх сил має дорівнювати роботі внутрішніх сил

$$F_k \cdot \Delta = \frac{2\Delta}{l} [2Tn(h-z) + R_b b z^2].$$

Звідси руйнівне значення контактної навантаження від зсуву бетону по сталевій смугі

$$F_k = \frac{2}{l} [2Tn(h-z) + R_b b z^2]. \quad (12)$$

За формулою (12) визначаємо руйнівну контактну силу, якщо вона прикладена посередині балки. Порівнюємо величину контактної сили F_k з руйнівною силою за нормальним перерізом F_n . Ці сили, а також розрахункова сила F_p можуть незначно розрізнятися, а можуть бути рівними між собою. Якщо одна із сил менша від розрахункової сили понад 5%, то розрахунковою необхідно приймати цю силу.

Відповідно до [24] елементи із зовнішнім листовим армуванням в зоні дії поперечних сил необхідно перевіряти з умови руйнування в балці бетону по похилій тріщині поверх упора й зрізу упорів за похилою тріщиною.

Тут важливо зважати на два випадки. Декілька упорів можуть розташовуватися в межах похилої тріщини.

Другий випадок, коли в межах похилої тріщини упори відсутні.

Розглянемо перший випадок. Припустимо, що в межах похилої тріщини розташований упор. Відрив нижнього блоку від верхнього утримує кілька сил. Це сила зрізу бетону посередині балки Q_b , сила розтягування упора N_y (передбачається, що сила тертя між упором і бетоном більша, ніж ця сила) і роз-

тяжна сила Q_c . Відривною силою верхнього від нижнього блоку є сила N_b (рис. 3, б).

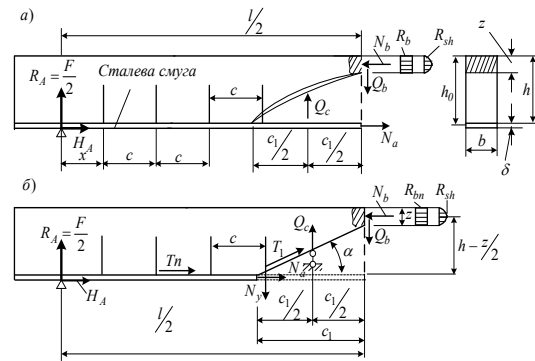


Рис. 3. Руйнування сталобетонної балки по похилій тріщині

Руйнування бетону по похилій тріщині згідно з [24] відбувається від дії розтяжного напруження в ньому. Щоб визначити розтяжне напруження спочатку необхідно визначити розтяжну силу Q_c . Для цього розглянемо рівновагу відірваного бетонного блоку поверх похилої тріщини (рис. 3, б). Бетонний блок спирається на сталеву смугу і відірваний блок всією площиною. Тому точна розрахункова схема є балкою на суцільній пружній основі (на сталевому листі і відірваному бетонному блоці).

Спрощену розрахункову схему подаємо у вигляді балки на двох опорах, які спираються на сталеву смугу й відірваний бетонний блок. Запишемо рівняння статки.

$$\Sigma M_a = 0; -Q_c \cdot \left(\frac{l}{2} - \frac{c_1}{2}\right) + Q_b \left(\frac{l}{2}\right) - N_b \left(h - \frac{z}{2}\right) + N_y \cdot \left(\frac{l}{2} - c_1 + b_1\right) = 0,$$

звідси

$$Q_c = \frac{-N_b(2h-z) + Q_b \cdot l + N_y(l-2c_1+2b_1)}{l-c_1}. \quad (13)$$

Проекція похилої тріщини c_1 взята відповідно до [26]. Вона визначається з умови зсуву бетону поверх упора:

$$\frac{h_{ym}}{c_1} = \frac{1}{2}; \quad c_1 = 2h_{ym} = 2(h-z) = 2(0,162 - 0,045675) = 0,233 \text{ м}, \quad (14)$$

де Q_b – стискальна сила верхнього блоку на нижній блок по похилій тріщині бетону. Ця сила визначається за формулою

$$Q_b = \frac{2}{3} b \cdot z \cdot R_{bh}. \quad (15)$$

Якщо внаслідок розрахунку стискальна сила виявиться від'ємною, то по похилій тріщині відбудеться відрив нижнього блоку.

Сила розтягання упора визначається за формулою $N_y = A_{sh} \cdot R_s$. Величина N_b відома. У разі додатної реакції опори Q_c , тобто буде тиск верхнього блоку на нижній блок, і відрив по похилій тріщині не відбудеться.

За загальною площею перерізу упорів визначаємо напруження під час їх зрізання від дії сили N_b . Отриманий результат має бути меншим (або дорівнювати) за розрахункову опору сталі в процесі зрізання.

$$\sigma_{sh} = \frac{N_b}{nA_{sh}} \leq R_{sh}. \quad (16)$$

Розглянемо другий випадок, коли в межах похилої тріщини упори відсутні. І тут сила N_y немає. З формули (13) визначаємо значення Q_c . За умови додатної реакції опори Q_c відрив по похилій тріщині не відбудеться. Напруження в упорах перевіряють за формулою (16).

Але може бути такий випадок, що реакція опори буде від'ємною й упор у межах похилої тріщини відсутній. Відбудеться відрив нижнього блоку від верхнього. У цьому разі може статися руйнування балки внаслідок зрізання упорів за похилою тріщиною між опорою й похилою тріщиною, тобто $T_1 = 0$. Перевіряємо умову зрізання балки по зрізу упорів за похилим перерізом (рис. 3, б).

З рівняння статички

$$\Sigma X = 0; Tn - N_b + T_1 \cos \alpha = \\ = Tn - N_b + 0 = 0.$$

Якщо $Tn \geq N_b$, то зрізання упорів не відбудеться. В іншому разі необхідно збільшити кількість упорів.

Результати проведених випробувань є продовженням досліджень, проведених і опублікованих у розвідках [21–23]. У цих роботах запропоновано алгоритм розрахунку сталобетонної балки. Недоліком цього алгоритму є складність визначення коефіцієнта $\phi b2$.

Дослідження дають змогу покращити конструкцію сталобетонної балки й спростити розрахунок. Удосконалення конструкції балки, що розглядається, досягається завдяки тому, що максимальна поздовжня сила в сталевій смузі має одне й те саме значення, як під час дії розрахункового, так і дії нормативного навантаження. За цим алгоритмом простіше визначаються пов'язані між собою

коефіцієнти $A1$ і $\phi b2$. Немає потреби кілька разів змінювати коефіцієнт $\phi b2$, щоб досягти необхідних результатів.

У підборі властивостей сталобетонної балки отримано максимальну поздовжню силу смуги [26]. Таку саму силу отримано й по епюрі поздовжніх сил після встановлення упорів.

Удосконалений алгоритм дає змогу поширити його на різні випадки роботи сталобетонних балок. Це стосується й інших способів завантаження балки, та різних матеріалів, що набувають значної популярності. До таких матеріалів належать фібробетон, полімери тощо.

Але необхідно мати на увазі, що руйнування сталобетонної балки може відбуватися унаслідок руйнування бетону по похилій тріщині та зрізу упорів по похилій тріщині. Це необхідно брати до уваги в процесі проектування й обчислення на міцність сталобетонних балок. Нині актуальним залишається питання зміцнення бетонних конструкцій [27]. Важливим напрямом дослідження напружено-деформованого стану сталобетонних балок є температурний вплив [28]. Крім того, якість бетонних покриттів впливає на фізичний стан людини під час контакту з ним [29].

Висновки

1. Запропонований алгоритм дає змогу в процесі проектування сталобетонних балок перевіряти бетон на зминання під упорами й на відрив по похилій тріщині, а також на зріз сталевих упорів.

2. Алгоритм дає змогу в процесі експлуатації здійснювати діагностику сталобетонних балок, особливо після тривалого терміну експлуатації та змінних навантажень, оскільки в цьому разі змінюються розрахункові опори бетону й сталі.

Література

1. Ying X., Qinghua H., Jie X., Qi G., Yihong W. (2016). Experimental and numerical study on static behavior of elastic concrete-steel composite beams. *Journal of Constructional Steel Research*, 123, 79–92.
2. Sudhir, P. P., Keshav, K. S. (2016). Tests of steel fibre reinforced concrete beams under predominant torsion. *Journal of Building Engineering*, 6, 157–162.
3. Вандоловський С. С., Костюк Т. О., Рачковський О. В., Плахотнікова І. А. Технологія створення сталеві фібробетону з підвищеною міцністю на розтяг. *Зб. наук. праць ХНУПС*, Харків, 2018. 2(56), 126–131.

4. Wandolowsky A. G., Younis B. N., AL-hawari Y. R. (2017). Effect vibr-vacuumizing on bonding strength of basalt fibers to cementitious matrix. *International Journal of Engineering Science and Innovative Technology (IJESIT)*, 6, 1–8.
5. Shkromada O., Paliy A., Nechyporenko O., Naumenko O., Nechyporenko V., Burlaka O., Reshetnichenko A., Tsereniuk O., Shvets O., Paliy A. (2019). Improvement of functional performance of concrete in livestock buildings through the use of complex admixtures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5/6(101), 14–23. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.179177>
6. Hsiao P. C., Lehman D. E., Roeder C. W. (2012). Improved analytical model for special concentrically braced frames. *Journal of Constructional Steel Research*, 73, 80–94.
7. Ashraf M. M. (2016). Finite element modeling of steel concrete beam considering double composite action. *Ain Shams Engineering Journal*, 7(1), 73–88.
8. Luan N. K., Bakhshi H., Ronagh H. R., Barkhordari M. A. (2011). Analytical solutions for the in-plane behavior of composite steel/concrete beams with partial shear interaction. *Asian Journal of Civil Engineering*, 12(6), 751–771.
9. Бобало Т. В., Бліхарський З. Я., Ільницький Б. М., Крамарчук А. П. Особливості роботи сталобетонних балок армованих стержневою високоміцною арматурою різних класів. *Вісник НУ «Львівська політехніка»*, Львів, 2011. Вип. 697, 35–48.
10. Стороженко Л. І., Крупченко О. А. Сталезалізобетонні балки із залізобетонним верхнім поясом. *Вісник НУ «Львівська політехніка»*, Львів, 2010. Вип. 662, 354–360.
11. ДСТУ Б В.2.6-216:2016. Розрахунок і конструювання з'єднувальних елементів сталезалізобетонних конструкцій. Київ, 2016.
12. Hu Ying, Pang Huawei, Quan Xueyou, Pang Jun, Luo Xiancun, Pang Qiyun, Liu Bao. Performance of Reinforced Concrete Beams Retrofitted by a DirectShear Anchorage Retrofitting System. *6th International Workshop on Performance, Protection & Strengthening of Structures under Extreme Loading*, PROTECT 2017, Guangzhou (Canton), China.
13. John A., Nwankwo E., Orumu S., Osuji S. (2019). Structural performance of externally strengthened rectangular reinforced concrete beams by glued steel plate. *European Journal of Engineering Research and Science*, 4(9), 101–106. <https://doi.org/10.24018/ejers.2019.4.9.1480>
14. Стороженко Л. І., Лапенко О. І., Горб О. Г. Конструкції залізобетонних перекриттів по профільному настилу із забезпеченням сумісної роботи бетону і сталі за допомогою склеювання. *Вісник НУ «Львівська політехніка»*, Львів, 2010. Вип. 662, 360–365.
15. Золотова Н. М. Скларов В. О., Супрун О. Ю. Переваги використання хімічних анкерів на акрилових композиціях для кріплення технологічного устаткування. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*, Харків, 2019. Вип. 183. С. 87–95.
16. Mofidi A., Chaallal O., Shao Y. (2014). Analytical design model for reinforced-concrete beams strengthened in shear using l-shaped cfrp plates. *Journal of Composites for Construction*, 18(1).
17. Fedghouche F., Karam Y. (2018). Design optimization of reinforced ordinary and high-strength concrete beams with eurocode2 (EC-2). *Optimum Composite Structures*.
18. Wongmatar P., Hansapinyo C., Vimonsatit V., Chen W. (2018). Recommendations for designing reinforced concrete beams against low velocity impact loads. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 2018. <https://doi.org/10.1142/S0219455418501043>
19. Shuraim A. B. (2014). A novel approach for evaluating the concrete shear strength in reinforced concrete beams. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 11(1). <https://doi.org/10.1590/S1679-78252014000100006>
20. Hajime I., Mitsuyasu I., Hiroshi Y., Ema K. (2014). Analytical study on shear capacity evaluation of rc beams with pva short fiber. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 12(6), 187–199. <https://doi.org/10.3151/jact.12.187>
21. Petrov, A., Pavliuchenkov, M., Nanka, A., Paliy, A. (2019). Construction of an algorithm for the selection of rigid stops in steel concrete beams. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1/7(97), 41–49. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.155469>
22. Petrov A., Paliy A., Pavliuchenkov M., Tsyhanenko H., Khobot N., Vysochin I., Yurchenko O., Ovcharenko O., Sopov D., Paliy A. (2020). Construction of an algorithm for the selection of rigid stops in steel concrete beams under the action of a distributed load. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3/7(105), 27–35. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.204251>
23. Petrov A., Paliy A., Naumenko A., Sheptun S., Ihnatenko M., Vysochin I., Kononenko Y., Yurchenko O., Dedilova T., Paliy A. (2021). Improving the algorithm of choosing spacing and number of stiff supports against a concentrated force in steel-concrete beams. *Estern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(7(110)), 40–47. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.228862>
24. ДБН В.2.6-160:2010. Сталезалізобетонні конструкції. Київ, 2011.
25. Петров А. М. Руйнування бетону по похилій тріщині в сталобетонних балках. *Вісник ХНТУСГ ім. Петра Василенка*, Харків, 2019. Вип. 205, С. 289–295.
26. Вандоловський О. Г., Петров А. М., Науменко А. О., Шептун С. Ю. Підбір поперечного перерізу сталобетонних балок з урахуванням роботи бетону в розтягнутій зоні балках. *Технічний сервіс агропромислового лісового та*

транспортного комплексів. Харків, 2020. № 21. С. 118–125.

27. Shkromada O., Paliy A., Yurchenko O., Khotob N., Pikhtirova A., Vysochin I., Fedorenko G., Paliy A. (2020). Influence of fine additives and surfactants on the strength and permeability degree of concrete. *EUREKA: Physics and Engineering*, 2, 19–29. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2020.001178>.
28. Ігнатенко А. В. Синьковська О. В. Аналіз роботи сталобетонних балок при температурному впливі. *Вісник ХНАДУ*. Харків, 2021. Вип. 93. С. 98–104.
29. Aliiev E. B., Paliy A. P., Korkh O. V., Mykutyuk V. V., Petrov R. V., Stockiy O. G., Levchenko I. V., Rudnytskyi E. V. (2024). Assessing cows' mobility to determine their comfort state. *Regulatory Mechanisms in Biosystems*, 15(2), 259–266. <https://doi.org/10.15421/022438>.

References

1. Ying X., Qinghua H., Jie X., Qi G., Yihong W. (2016). Experimental and numerical study on static behavior of elastic concrete-steel composite beams. *Journal of Constructional Steel Research*, 123, 79–92.
2. Sudhir P. P., Keshav K. S. (2016). Tests of steel fibre reinforced concrete beams under predominant torsion. *Journal of Building Engineering*, 6, 157–162.
3. Vandolovs'kyj S. S., Kostjuk T. O., Rachkovs'kyj O. V., Plahotnikova I. A. (2018). Tehnologija stvorennja stalefibrobetonu z pidvyshhenomu micnistju na roztyag [Technology for creating steel fiber concrete with increased tensile strength]. *Zh. nauk. prac' HNUPS, Harkiv*, 2(56), 126–131 [in Ukrainian].
4. Wandolowsky A. G., Basheer N. Younis & AL-hawari Yousef, Riyed. (2017). Effect vibravacuumizing on bonding strength of basalt fibers to cementitious matrix. *International Journal of Engineering Science and Innovative Technology (IJESIT)*, 6, 1–8.
5. Shkromada O., Paliy A., Nechyporenko O., Naumenko O., Nechyporenko V., Burlaka O., Reshetnichenko A., Tsereniuk O., Shvets O., & Paliy A. (2019). Improvement of functional performance of concrete in livestock buildings through the use of complex admixtures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5/6(101), 14–23. DOI:<https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.179177>.
6. Hsiao P.C., Lehman D.E., & Roeder C.W. (2012). Improved Analytical Model for Special Concentrically Braced Frames. *Journal of Constructional Steel Research*, 73, 80–94.
7. Ashraf M. M. (2016). Finite element modeling of steel concrete beam considering double composite action. *Ain Shams Engineering Journal*, 7(1), 73–88.
8. Luan N. K., Bakhshi H., Ronagh H. R., & Barkhordari M. A. (2011). Analytical solutions for the in-plane behavior of composite steel/concrete beams with partial shear interaction. *Asian Journal of Civil Engineering*, 12(6), 751–771.
9. Bobalo T. V., Bliars'kyj Z. Ja., Il'nyč'kyj B. M., & Kramarchuk A. P. (2011). Osoblyvosti roboty stalebetonnyh balok armovanyh sterzhnevoju vysokomicnoju armaturoju riznyh klasiv [Features of the operation of reinforced concrete beams reinforced with high-strength bar reinforcement of various classes]. *Visnyk NU «L'vivs'ka politehnika»*, 697: *Teorija i praktyka budivnytva*, 35–48 [in Ukrainian].
10. Storozhenko L. I., & Krupchenko O. A. (2010). Stalezalizobetonni balky iz zalizobetonnym verhnim pojansom [Steel-reinforced concrete beams with reinforced concrete upper belt]. *Visnyk NU «L'vivs'ka politehnika»*, 662: *Teorija i praktyka budivnytva*, 354–360 [in Ukrainian].
11. DSTU B V.2.6-216:2016.(2016) Rozrakhunok i konstruiuvannja ziednuvalnykh elementiv stalezalizobetonnykh konstruksii. [Calculation and design of connecting elements of steel-reinforced concrete structures]. Kyiv. [in Ukrainian].
12. Hu Y., Pang H., Quan X., Pang J., Luo X, Pang Q., & Liu B. (2017). Performance of Reinforced Concrete Beams Retrofitted by a DirectShear Anchorage Retrofitting System. 6th International Workshop on Performance, *Protection & Strengthening of Structures under Extreme Loading*, PROTECT 2017, Guangzhou (Canton), China.
13. John A., Nwankwo E., Orumu S., & Osuji S. (2019). Structural Performance of Externally Strengthened Rectangular Reinforced Concrete Beams by Glued Steel Plate. *European Journal of Engineering Research and Science*, 4(9), 101–106. <https://doi.org/10.24018/ejers.2019.4.9.1480>.
14. Storozhenko L. I., Lapenko O. I., & Gorb O. G. (2010). Konstrukcii' zalizobetonnyh perekryttiv po profil'nomu nastylu iz zabezpechennjam sumisnoi' roboty betonu i stali za dopomogou sklejuvannja [Reinforced concrete floor structures on profiled decking with ensuring the interoperability of concrete and steel by means of bonding]. *Visnyk NU «L'vivs'ka politehnika»*, 662: *Teorija i praktyka budivnytva*, 360–365 [in Ukrainian].
15. Zolotova N. M. Skliarov V. O., Suprun O. Iu. (2019). Perevahy vykorystannia khimichnykh ankeriv na akrylovykh kompozytsiakh dlja kriplenja tekhnolohichnoho ustatkuvannia [Advantages of using chemical anchors on acrylic compositions for fastening process equipment]. *Zbirnyk naukovykh prats UkrDUZT, Kharkiv*, 183. 87-95 [in Ukrainian].
16. Mofidi A., Chaallal O., & Shao Y. (2014). Analytical Design Model for Reinforced-Concrete Beams Strengthened in Shear Using L-Shaped CFRP Plates. *Journal of Composites for Construction*, 18(1).
17. Fedghouche F., Karam Y. (2018). Design optimization of reinforced ordinary and high-strength concrete beams with eurocode2 (EC-2). *Optimum Composite Structures*.

18. Wongmatar P., Hansapinyo C., Vimonsatit V., & Chen W. (2018). Recommendations for Designing Reinforced Concrete Beams Against Low Velocity Impact Loads. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*. <https://doi.org/10.1142/S0219455418501043>.
19. Shuraim A. B. (2014). A novel approach for evaluating the concrete shear strength in reinforced concrete beams. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 11(1). <https://doi.org/10.1590/S1679-78252014000100006>.
20. Hajime I., Mitsuyasu I., Hiroshi Y., & Ema K. (2014). Analytical Study on Shear Capacity Evaluation of RC Beams with PVA Short Fiber. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 12(6), 187–199. DOI: [10.3151/jact.12.187](https://doi.org/10.3151/jact.12.187).
21. Petrov A., Pavliuchenkov M., Nanka A., & Paliy A. (2019). Construction of an algorithm for the selection of rigid stops in steel concrete beams. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1/7(97), 41–49. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.155469>.
22. Petrov A., Paliy A., Pavliuchenkov M., Tsyhanenko H., Khobot N., Vysochin I., Yurchenko O., Ovcharenko O., Sopov D., & Paliy A. (2020). Construction of an algorithm for the selection of rigid stops in steel concrete beams under the action of a distributed load. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3/7(105), 27–35. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.204251>.
23. Petrov A., Paliy A., Naumenko A., Sheptun S., Ihnatenko M., Vysochin I., Kononenko Y., Yurchenko O., Dedilova T., Paliy A. (2021). Improving the algorithm of choosing spacing and number of stiff supports against a concentrated force in steel-concrete beams. *Estern-european journal of enterprise technologies*. 7(110). 40–47.
24. DBN V.2.6-160:2010. (2011). Stalezalizobetonni konstrukcii [Steel-reinforced concrete structures]. Kyi'v [in Ukrainian].
25. Petrov A. M. (2019). Rujnuvannja betonu po pohylji trishhyni v stalebetonnyh balkah. *Visnyk HNTUSG im. Petra Vasylenka*, 205, 289–295 [in Ukrainian].
26. Vandolovskyi O. H., Petrov A. M., Naumenko A. O., Sheptun S. Iu. (2020) Pidbir poperechnoho pererizu stalebetonnykh balok z urakhuvanniam roboty betonu v roztiahnutii zoni balkakh [Selection of the cross-section of reinforced concrete beams taking into account the work of concrete in the tension zone of the beams]. *Tekhnichniy servis ahropromyslovoho lisovoho ta transportnoho kompleksiv*. Kharkiv, 21. 118–125 [in Ukrainian].
27. Shkromada O., Paliy A., Yurchenko O., Khobot N., Pikhtirova A., Vysochin I., Fedorenko G., Paliy A. (2020). Influence of fine additives and surfactants on the strength and permeability degree of concrete. *EUREKA: Physics and Engineering*, 2, 19–29. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2020.001178>.
28. Ihnatenko A. V. Synkovska O. V. (2021). Analiz roboty stalebetonnykh balok pry temperaturnomu vplyvi [Analysis of operation of reinforced concrete beam under thermal exposure]. *Visnyk KhNADU*. Kharkiv, 93. 98–104 [in Ukrainian].
29. Aliiev E. B., Paliy A. P., Korkh O. V., Mykytiuk V. V., Petrov R. V., Stockiy O. G., Levchenko I. V., Rudnytskyi E. V. (2024). Assessing cows' mobility to determine their comfort state. *Regulatory Mechanisms in Biosystems*, 15(2), 259–266. <https://doi.org/10.15421/022438>.

Петров Анатолій Миколайович¹, канд. техн. наук, доц. кафедри надійності та міцності машин і споруд імені В. Я. Аніловича, petrovbm@ukr.net, тел. +38 095-609-28-37;

Синьковська Олена Василівна², канд. техн. наук, доц. кафедри мостів, конструкцій і будівельної механіки ім. В. О. Російського, iglema@meta.ua, тел. +38 067-578-00-14;

Шептун Сергій Юрійович¹, канд. техн. наук, ст. викл. кафедри надійності та міцності машин і споруд імені В. Я. Аніловича, zoooms@btu.kharkov.ua, тел. +38 098-480-66-52;

Марченко Михайло Валентинович¹, канд. техн. наук, доц. кафедри надійності та міцності машин і споруд імені В. Я. Аніловича, mar4enko.mikhail78@gmail.com, тел. +38 050-302-68-40;

Ігнатенко Андрій Васильович³, канд. техн. наук, доц. кафедри промислового та цивільного будівництва, andreykhadi@gmail.com, тел. +38 073-303-33-50;

Грецький Денис Володимирович³, канд. техн. наук, доц. каф. промислового та цивільного будівництва, d.hretskyi@chdtu.edu.ua, тел. +38 067-178-79-94;

Пряник Сергій Петрович³, канд. техн. наук, доц., завідувач кафедри промислового та цивільного будівництва, 111_2020@ukr.net, тел. +38 098-661-16-27.

¹Державний біотехнологічний університет, 61002, Україна, м. Харків, вул. Алчевських, 44.

²Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 61002, Україна, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25.

³Черкаський державний технологічний університет, 18006, Україна, м. Черкаси, бульв. Шевченка, 460.

Destruction of a steel-concrete beam at the contact of steel and concrete and at a sloped crack

Abstract The object of the study is a reinforced concrete beam. The article continues the research, the results of which are specified in the algorithm for selecting the number of rigid supports for a reinforced concrete beam loaded with a transverse concentrated force in the middle of the span. Rigid supports serve to connect the steel strip with concrete, which ensures their joint operation.

The algorithm is specified based on the condition of equality of the longitudinal force in the steel strip from the action of the design load and the maximum longitudinal force obtained after the installation of the supports. In this case, the longitudinal forces in all rigid supports, as well as the pitch of the rigid supports, must be the same.

It is shown that the failure of a reinforced concrete beam can also occur at the contact of steel and concrete and along an inclined crack. This algorithm allows, when designing reinforced concrete beams, to check concrete for crushing under supports and for separation along an inclined crack, as well as for shearing of steel supports. The algorithm also allows for diagnostics of reinforced concrete beams during operation. Especially after a long service life and variable loads, since in this case the calculated supports of concrete and steel change.

This study is aimed at improving the design of reinforced concrete beams. The rational number and location of rigid supports will lead to savings, both in reducing the required amount of building materials and in reducing their cost by reducing labor costs associated with their manufacture and operation.

Key words: reinforced concrete beam, rigid support, support spacing, support force, steel-concrete contact, inclined crack.

Petrov Anatoliy¹, PhD, Associate Professor, Department of Reliability and Strength of Machines and Structures named after V.Ya. Anilovich, <https://orcid.org/0000-0001-6644-223X>, petrovbm@gmail.com;

Synkovska Olena², PhD, Associate Professor, Department of bridges, structures and building mechanics named after V.O. Rosiyskyi, <https://orcid.org/0000-0003-0823-2597>, iglema@meta.ua;

Sheptun Serhii¹, PhD, Senior lecturer, Department of Reliability and Strength of Machines and Structures named after V.Ya. Anilovich, <https://orcid.org/0000-0002-1981-4560>, zoooms@btu.kharkov.ua;

Marchenko Mykhailo¹, Ph.D., Associate Professor, Department of Reliability and Strength of Machines and Structures named after V.Ya. Anilovich, <http://orcid.org/0000-0001-7897-0371>, mar4enko.mixail78@gmail.com;

Ihnatenko Andrii³, PhD, Associate Professor, Department of Industrial and Civil Construction, <https://orcid.org/0000-0001-9222-1051>, andreykhadi@gmail.com;

Gretskeyi Denys³, PhD, Associate Professor, Department of Industrial and Civil Construction, <https://orcid.org/0000-0002-3086-0939>, d.hretskeyi@chdtu.edu.ua;

Prianyk Serhii³, PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Industrial and Civil Engineering, <https://orcid.org/0000-0003-4430-4287>, 111_2020@ukr.net;

¹State Biotechnological University, Alchevskih str., 44, Kharkiv, Ukraine, 61002.

²Kharkiv National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudrogo str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

³Cherkasy State Technological University, 460, Shevchenko Blvd., Cherkasy, 18006, Ukraine.