

ВИЗНАЧЕННЯ НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ ДВОТАВРОВИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОЛОН ПРИ ПРЯМОМУ ПОШКОДЖЕННІ

¹Клименко Є.В., д.т.н., професор,
klimenkoew57@gmail.com, ORCID: 0000-0002-4502-8504

¹Максюта О.В., аспірантка,
maxiuta92@gmail.com, ORCID: 0000-0002-7587-0874

¹Одеська державна академія будівництва та архітектури
вул. Дідріхсона, 4, м. Одеса, 65029, Україна

Анотація. На підставі проведених натурних досліджень та визначення параметрів напружено-деформованого стану, а також характеру роботи залізобетонних двотаврових колон, пошкоджених у процесі експлуатації та в ході бойових дій, створено загальну методiku визначення залишкової несучої здатності елементів. У статті наводиться методика визначення залишкової несучої здатності пошкоджених стиснутих залізобетонних колон з прямим пошкодженням, коли фронт пошкодження паралельний одній з головних осей перерізу.

Запропоновано передумови розрахунку пошкоджених залізобетонних двотаврових колон: приймається гіпотеза плоских перерізів; напруження у стиснутій зоні розподіляються рівномірно з інтенсивністю ηf_{cd} ; напруження в арматурі приймаються залежно від висоти стиснутої зони бетону, зусилля в розтягнутій зоні сприймаються арматурою і приймаються не більше за розрахунок розтягування f_t ; робота розтягнутого бетону не враховується; приймається умова паралельності силових площин (площина дії зовнішніх та внутрішніх сил збігаються або паралельні залежно від розрахункового випадку); враховується знижена несуча здатність оголених арматурних стрижнів; фронт ушкодження – пряма лінія.

Складено рівняння рівноваги. Пропозиції, викладені у статті, ґрунтуються на основних положеннях чинних норм та розширюють сферу їх використання.

Запропонована методика визначення залишкової несучої здатності залізобетонних стиснутих елементів таврового профілю, пошкоджених у процесі експлуатації є статистично обґрунтованою та достовірною. Це дозволяє розрахунковим методом визначити можливість подальшої безаварійної експлуатації конструкцій чи необхідність їх посилення чи реконструкції.

Створено систему рівнянь, що враховують усю різноманітність форм та розмірів поперечного перерізу елемента в цілому, форм та розмірів стиснутої зони бетону. Достовірність цих пропозицій підтверджена шляхом зіставлення з даними, отриманими експериментальним шляхом, та статистичною обробкою такого зіставлення. Коефіцієнт варіації відхилення становить 0,125.

Ключові слова: залізобетонні колони, двотавровий переріз, пошкодження, методика розрахунку, залишкова несуча здатність.

Вступ. В процесі експлуатації, а особливо інтенсивно – в ході бойових дій, залізобетонні конструкції (найбільше поширені в практиці будівництва) зазнають пошкоджень, що знижує показники експлуатаційної придатності конструкцій та може сприяти переходу в гірший технічний стан [1].

Найбільше поширеними пошкодженнями залізобетонних конструкцій є: корозія робочої арматури (зменшення площі її поперечного перерізу), обрив поперечної арматури в стиснутих елементах, що зменшує стійкість стиснутих стержнів, руйнування (механічне або хімічне, в тому числі і динамічне – в ході бойових дій) частини поперечного перерізу бетону.

Чинні будівельні норми [2, 3] не дають жодних рекомендацій щодо оцінювання залишкової несучої здатності залізобетонних конструкцій, пошкоджених в процесі експлуатації. Якщо пошкодження у вигляді зменшення площі перерізу робочої арматури

можна прямо оцінити в розрахунку [4], то рекомендації щодо врахування втрати частини двотаврового перерізу відсутні в науковій та нормативній літературі.

Дослідженням роботи пошкоджених у процесі експлуатації стиснутих бетонних та залізобетонних конструкцій присвячено чимало робіт [5].

Однак, двотавровий профіль (як найбільш складний та загальний) стиснутих елементів в ракурсі визначення залишкової несучої здатності залізобетонних елементів, пошкоджених в процесі експлуатації, на даний час малодосліджений [6]. Пошкодження у вигляді зменшення площі перерізу робочої арматури можна прямо оцінити в розрахунку, то рекомендації щодо врахування втрати частини двотаврового перерізу відсутні в науковій та нормативній літературі.

Аналіз досліджень і публікацій. В ході літературного аналізу встановлено, що особливості впливу складного навантаження (косий позацентровий стиск) на роботу залізобетонних конструкцій та вплив на них оточуючого середовища розглядалися в роботах багатьох дослідників. Основою є дослідження професора Торяника М.С. та його учнів [7]. Але робота косостиснутих елементів, ексцентриситет в двох площинах у яких виник не від наявності ексцентриситетів в двох напрямках, а в результаті пошкодження колон по висоті та зміни положення головних осей в пошкодженному перерізі.

Досить детально вивчена робота арматурної сталі в залізобетонних елементах, що експлуатуються [8, 9] та процеси її деградації впродовж експлуатації [8, 9]. Визначені залежності деградування сталі залежно від класу сталі, умов експлуатації та виду напруженого стану стержнів.

Методи оцінювання технічного стану конструкцій залізобетонних конструкцій через визначення залишкової здатності розроблені або на основі існуючих програмних комплексів, або аналітичними залежностями, але вони підтверджені експериментально [10–13].

Практично відсутні дані щодо впливу параметрів таврового поперечного перерізу залізобетонних косостиснутих колон (пошкоджених в процесі експлуатації) на їх залишкову несучу здатність. Досліди [6] дозволили вивчити та описати роботу стиснутих залізобетонних колон двотаврового поперечного перерізу з пошкодженнями, але в роботі не наведена методика визначення залишкової несучої здатності, яку можна було б використовувати в практичних розрахунках.

Мета цього дослідження – розроблення методики визначення залишкової несучої здатності залізобетонних стиснутих елементів двотаврового поперечного перерізу при прямому пошкодженні, яка б базувалась на основних положеннях чинних норм та розвивала їх дію на роботу косостиснутих залізобетонних елементів, причиною появи складного напруженого стану в яких є пошкодження частини бетонного перерізу по висоті елемента.

Матеріали та методика дослідження. Розробка та апробації достовірності методики визначення залишкової несучої здатності залізобетонних стиснутих елементів двотаврового поперечного профілю, пошкоджених в процесі експлуатації, виконувалась на підставі натурних випробувань 15 дослідних колон, виконаних з бетону класу С 25/30 та за армованих просторовими в'язаними каркасами з робочою арматурою 4 Ø12 мм класу А 400 С та поперечними стержнями (хомутами) з арматури класу А 240 Ø 6 мм. Колони завантажувалися, як позацентрово стиснуті елементи з шарнірним обпиранням кінців в гідравлічному пресі в лабораторних умовах. Детально методика проведення натурних та чисельних досліджень викладена в роботах [6].

Аналітичні розрахункові залежності для визначення залишкової несучої здатності складені на основі загальноприйнятих або обґрунтованих передумов та допущень. Достовірність методики обґрунтовується плануванням експерименту та хорошою збіжністю отриманих теоретичних результатів з натурними випробуваннями.

Результати дослідження. На підставі проведених [6] натурних випробувань і обробки отриманих результатів удалося проаналізувати параметри напружено-деформованого стану двотаврових залізобетонних колон в перерізі з пошкодженнями та сформулювати основні передумови розрахунку залишкової несучої здатності.

Розрахунок залізобетонних будівельних конструкцій за несучою здатністю чинні норми [3] регламентують виконувати враховуючи фізичну нелінійність роботи бетону за реальною діаграмою деформування ε – σ . Методика розрахунку, що представлена в даній роботі, пропонується для застосування в якості перевірного розрахунку пошкоджених двотаврових елементів, тобто, можливе застосування спрощеної прямокутної епюри розподілення напружень по площі стиснутої зони. Така передумова допускається формою перерізу та не суперечить п. 3.1.7.2 [3].

Положення нейтральної лінії при косому позацентровому стиску визначається висотою стиснутої зони x та кутом нахилу нейтральної лінії γ . Плоский позацентровий стиск є окремим випадком при якому $\gamma=0$, вирішення задачі спрощується, оскільки відпадає необхідність в пошуку однієї з невідомих величин, а нейтральна лінія паралельна одній з головних осей перерізу. Аналізуючи результати, отримані при випробуванні пошкоджених двотаврових зразків, робимо висновок, що нейтральна лінія може дещо розвертатися. Розворот цей може бути у сторону збільшення чи зменшення кута γ , що залежить від співвідношення розмірів перерізу, кута нахилу силової площини і розміщення арматури по перерізу. Це пояснюється тим, що внутрішня силова площина, яка проходить через точки прикладання рівнодіючих в розтягнутій арматурі, рівнодіюча стиснутого бетону та арматури та точка прикладання зовнішньої сили при косому позацентровому стиску лежать на одній прямій. Передумова забезпечується відповідним положенням нейтральної лінії. В ході лабораторного випробування пошкоджених двотаврових зразків та з візуалізації, отриманих при розрахунку в ПК «Ліра САПР» виявлено, що нейтральна вісь має вигляд прямої.

Розрахунок елементів, що працюють на косий позацентровий стиск у загальному випадку рекомендується [4] виконувати за умови паралельності силових площин. Це означає, що точка прикладання зовнішньої сили, рівнодіюча стиснутих зусиль у бетоні та арматурі і рівнодіюча зусиль у розтягнутій арматурі повинні лежати на одній прямій.

При виконанні розрахунку необхідно також врахувати оголеність арматури [5, 6].

В методиці враховуються рекомендації [3] відносно обмеження ширини полицки: значення b'_{eff} , яке вводиться у розрахунок, приймається за умови, що ширина зв'язів полицки в кожен бік від ребра повинен бути не більше ніж $1/6$ прольоту цього елемента і при консольних зв'язках полицки не більше ніж:

1. $h'_f \geq 0,1h$ – приймаємо $6h'_f$;
2. $0,05h \leq h'_f < 0,1h$ – приймаємо $3h'_f$;
3. $h'_f < 0,05h$ – зв'язи не враховуються.

В даній статті розглядається робота конструкцій з прямим пошкодженнями перерізу (рис. 1).

Приймаємо основні передумови розрахунку та допущення:

1. Приймаємо гіпотезу плоских перерізів: перерізи, що розглядаються, плоскі і нормальні до осі колони, деформації залишаються плоскими і нормальними до її осі до і після деформації, а за висотою перерізу деформації змінюються за лінійною залежністю.

2. Напруження в стиснутій зоні розподіляються рівномірно з інтенсивністю ηf_{cd} .

3. Напруження в арматурі приймаються залежно від висоти стиснутої зони бетону. Зусилля у розтягнутій зоні сприймаються арматурою і не більші за розрахунковий спротив розтягненню f_t .

4. Робота розтягнутого бетону не враховується.

5. Приймаємо умову паралельності силових площин: площина дії зовнішніх і внутрішніх сил співпадають або паралельні залежно від розрахункового випадку.

6. Враховуємо оголення арматурних стрижнів $\sigma_{кр}$.

7. Вводяться поняття прямого пошкодження. Фронт пошкодження – пряма лінія.

Розрахунок двотаврових елементів необхідно починати з постановки мети розрахунку, збору вихідних даних, аналізу геометрії перерізу та точки прикладання зовнішньої сили.

Як відомо, руйнування косостиснутих елементів за нормальним перерізом відбувається за двома схемами: за розтягнутою арматурою, коли потечуть усі або більшість розтягнутих

стрижнів і за стиснутою зоною, коли руйнування починається зі стиснутого бетону. Першу схему руйнування ми можемо побачити у випадку великих ексцентриситетів, другу – при малих ексцентриситетах.

При розрахунку двотаврових перерізів з прямим пошкодженням задача дещо спрощується, оскільки переріз є симетричним та сила прикладається вздовж осі y . Залежно від точки прикладання зовнішньої сили N можливо декілька випадків положення нейтральної лінії: у ребрі і у нижній полицці. При центральному прикладанні сили переріз практично весь стиснутий, найбільш ймовірні варіанти – стиснута верхня пошкоджена полицка і практично все ребро, і другий варіант – коли нейтральна лінія переходить в нижню полицку. Задаємося одним із варіантів положення нейтральної лінії і перевіряємо правильність цього припущення за отриманими результатами, враховуючи наступні обмеження: сила $N > 0$, висота стиснутої зони $x > 0$ та якщо вона проходить у ребрі, то $x \leq h_2 + h_3$, у полицці – $x \geq h_2 + h_3$, якщо є оголені стрижні, то приймаємо, що вони за величиною не більше ніж критичні напруження $\sigma_{кр}$, які визначені з врахуванням гнучкості стрижня. При позacentровому прикладанні сили імовірніше за все варіант положення нейтральної лінії у ребрі, але таке припущення не є правилом, тому потребує перевірки.

Випадок 1: нейтральна лінія проходить у ребрі. Для пошуку невідомих запишемо рівняння рівноваги зовнішніх і внутрішніх сил на ось x :

$$N - f_{cd} \cdot A_c - \sum_{i=1}^n \sigma_{s1-s4} \cdot A_{s1-s4} = 0; \quad (1)$$

де: A_c – площа стиснутої зони бетону (рис. 1, б).

Площа стиснутої зони:

$$A_c = x \cdot b'_f - (b'_f - b) \cdot (x - h_2). \quad (2)$$

Напруження у арматурних стрижнях знайдемо за емпіричною формулою:

$$\sigma_{si} = \frac{\sigma_{scu}}{1 - (\omega/1,1)} \cdot \left(\frac{\omega}{\xi_i} - 1 \right). \quad (3)$$

У рівнянні (3):

$$\xi_i = \frac{x}{h_{oi}}, \quad (4)$$

де: h_{oi} – відстань від осі, що проходить через центр мас i -го арматурного стрижня і паралельно прямій, яка обмежує стиснуту зону до найбільш віддаленої точки стиснутої зони перерізу (рис. 1, а).

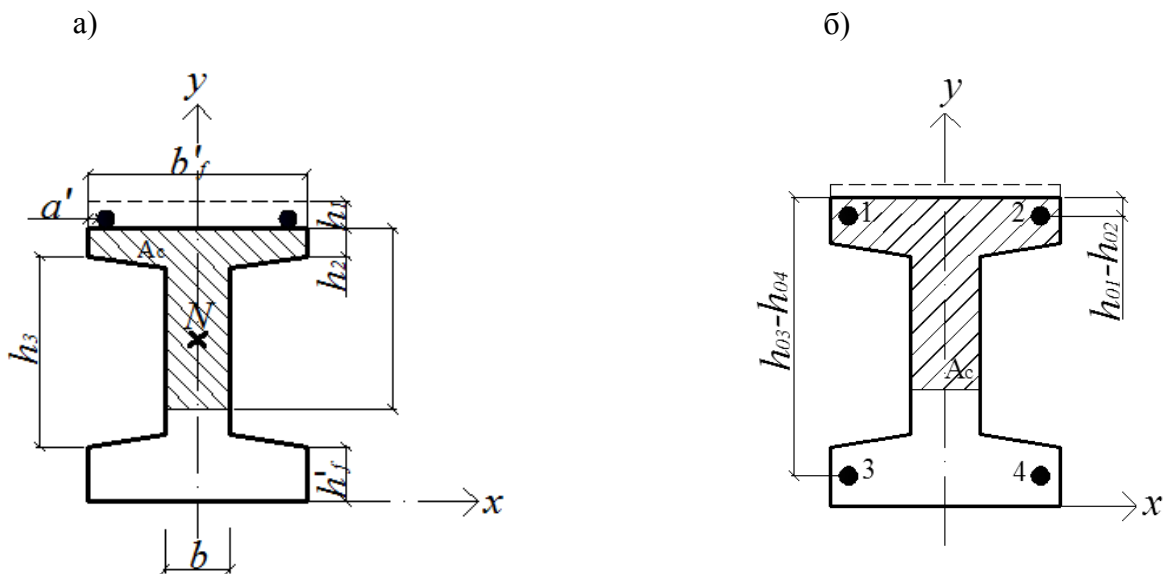


Рис. 1. До визначення понять:

а – пряме пошкодження в перерізі двотаврового елемента; б – стиснута зона бетону

Величини h_{oi} визначаємо наступним чином:

$$h_{01-02} = \left(a' + \frac{d}{2}\right) - h_1; \quad (5)$$

$$h_{03-04} = h - h_1 - a' - \frac{d}{2}. \quad (6)$$

Запишемо рівняння суми моментів сил відносно вісі x , що проходить по зовнішній грані перерізу (рис. 1, а):

$$N \cdot e - f_{cd} \cdot A_c \cdot y_c - \sum_{i=1}^n \sigma_{s1-s2} \cdot A_{s1-s2} \cdot \left(h - a' - \frac{d}{2}\right) + \sum_{i=1}^n \sigma_{s3-s4} \cdot A_{s3-s4} \cdot \left(a' + \frac{d}{2}\right) = 0; \quad (7)$$

y_c – координата центру мас стиснутої зони бетону, виразимо її як сукупну координату складної фігури, розбивши переріз двотавра на прості складові частини.

Проведемо осі як показано на рис. 2, а: ось x – по нижній грані фігури, y – через вертикальну ось симетрії.

$$y_c = \frac{A_1 \cdot y_1 + A_2 \cdot y_2}{A_1 + A_2}; \quad (8)$$

$$A_1 = h_2 \cdot b'_f; \quad (9)$$

$$A_2 = (x - h_2) \cdot b; \quad (10)$$

$$y_1 = h - h_1 - \frac{h_2}{2}; \quad (11)$$

$$y_2 = h - h_1 - \frac{x - h_2}{2}. \quad (12)$$

Підставимо (9 – 12) в вираз (8):

$$y_c = \frac{(h_2 \cdot b'_f) \cdot (h - h_1 - \frac{h_2}{2}) + (x - h_2) \cdot b \cdot (h - h_1 - \frac{x - h_2}{2})}{h_2 \cdot b'_f + (x - h_2) \cdot b}. \quad (13)$$

Рівняння (1) та (7) приймуть вигляд:

$$N - f_{cd} \cdot \left(x \cdot b'_f - (b'_f - b) \cdot (x - h_2)\right) - 2 \cdot A_{s1-s2} \cdot \frac{\sigma_{scu}}{1 - (\omega/1,1)} \cdot \left(\frac{\omega \cdot \left(a' + \frac{d}{2}\right) - h_1}{x} - 1\right) + 2 \cdot A_{s3-s4} \cdot \frac{\sigma_{scu}}{1 - (\omega/1,1)} \cdot \left(\frac{\omega \cdot \left(h - h_1 - a' - \frac{d}{2}\right)}{x} - 1\right) = 0; \quad (14)$$

$$\begin{aligned} & N \cdot e - f_{cd} \cdot \left(x \cdot b'_f - (b'_f - b) \cdot (x - h_2)\right) \cdot \\ & \cdot \left(\frac{(h_2 \cdot b'_f) \cdot (h - h_1 - \frac{h_2}{2}) + (x - h_2) \cdot b \cdot (h - h_1 - \frac{x - h_2}{2})}{h_2 \cdot b'_f + (x - h_2) \cdot b}\right) - 2 \cdot A_{s1-s2} \cdot \frac{\sigma_{scu}}{1 - (\omega/1,1)} \cdot \left(\frac{\omega \cdot \left(a' + \frac{d}{2}\right) - h_1}{x} - 1\right) \cdot \\ & \left(h - a' - \frac{d}{2}\right) + 2 \cdot A_{s3-s4} \cdot \frac{\sigma_{scu}}{1 - (\omega/1,1)} \cdot \left(\frac{\omega \cdot \left(h - h_1 - a' - \frac{d}{2}\right)}{x} - 1\right) \cdot \left(a' + \frac{d}{2}\right) = 0. \end{aligned} \quad (15)$$

Розглядаємо рівняння (14)...(15) як систему та розв'язуємо її зручним способом, враховуючи вище зазначені обмеження щодо отриманих результатів розрахунку.

В кінцевому результаті ми отримуємо пару величин, які і були метою пошуку – несуча здатність N та висота стиснутої зони x .

В процесі розв'язку задачі можливий випадок, коли ні одна із пар отриманих коренів не задовольняє умовам. Таке можливо, якщо припущення щодо контуру стиснутої зони було вибрано не вірно. Імовіріше за все, вона має іншу форму, тобто, необхідно задатися наступним варіантом стиснутої зони та зробити перерахунок задачі з врахуванням нового положення нейтральної лінії.

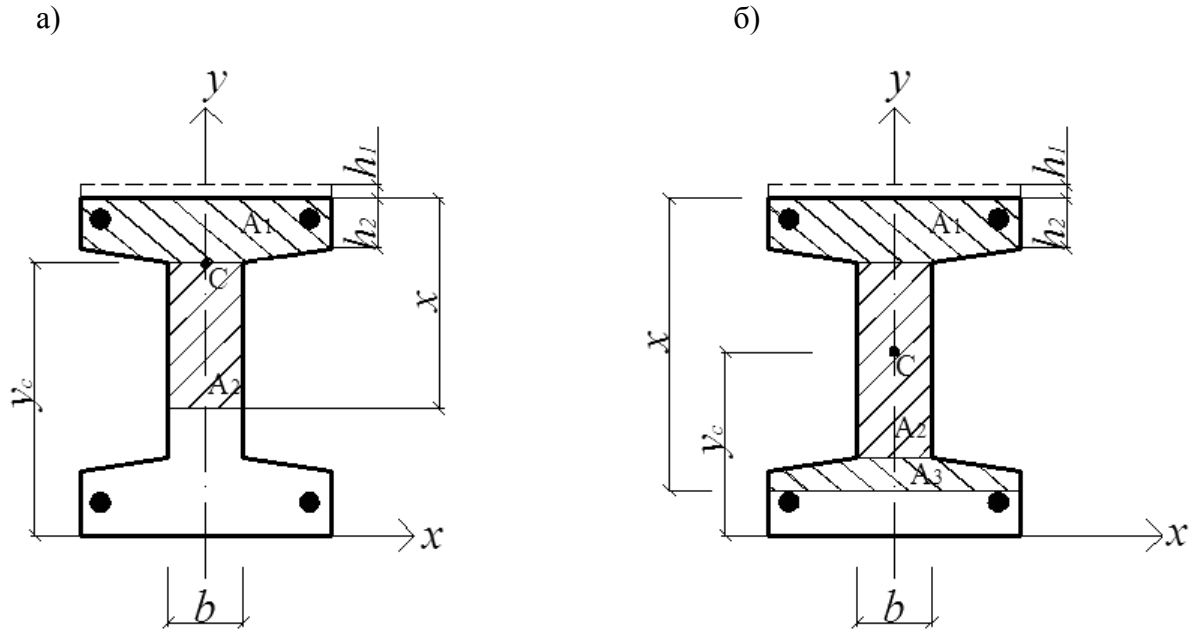


Рис. 2. Визначення координат центру мас стиснутої зони бетону x_c :
а – нейтральна лінія проходить у ребрі двотавра; б – нейтральна лінія проходить у поличці двотавра

Випадок 2: нейтральна лінія проходить у поличці. Якщо нейтральна лінія проходить у поличці, то змінюється площа стиснутої зони (рис. 2, б):

$$A_c = x \cdot b'_f - (b'_f - b) \cdot h_3. \quad (16)$$

Щоб виразити y_c розбиваємо переріз двотавра на прості фігури (рис. 2, б) та знаходимо площі та координати фігур, що утворилися:

$$y_c = \frac{A_1 \cdot y_1 + A_2 \cdot y_2 + A_3 \cdot y_3}{A_1 + A_2 + A_3}; \quad (17)$$

$$A_1 = h_2 \cdot b'_f; \quad (18)$$

$$A_2 = h_3 \cdot b; \quad (19)$$

$$A_3 = b'_f \cdot (x - h_2 - h_3); \quad (20)$$

$$y_1 = h - h_1 - \frac{h_2}{2}; \quad (21)$$

$$y_2 = \frac{h}{2}; \quad (22)$$

$$y_3 = h - x - h_1 + \frac{x - h_2 - h_3}{2}. \quad (23)$$

Підставимо (18 – 23) в вираз (17):

$$y_c = \frac{h_2 \cdot b'_f \cdot (h - h_1 - \frac{h_2}{2}) + h_3 \cdot b \cdot \frac{h}{2} + b'_f \cdot (x - h_2 - h_3) \cdot (h - x - h_1 + \frac{x - h_2 - h_3}{2})}{h_2 \cdot b'_f + h_3 \cdot b + b'_f \cdot (x - h_2 - h_3)}; \quad (24)$$

Рівняння (1) та (7) приймуть вигляд:

$$N - f_{cd} \cdot (x \cdot b'_f - (b'_f - b) \cdot h_3) - 2 \cdot A_{s1-s2} \cdot \frac{\sigma_{scu}}{1 - (\omega/1,1)} \cdot \left(\frac{\omega \cdot ((a' + \frac{d}{2}) - h_1)}{x} - 1 \right) + \\ + 2 \cdot A_{s3-s4} \cdot \frac{\sigma_{scu}}{1 - (\omega/1,1)} \cdot \left(\frac{\omega \cdot (h - h_1 - a' - \frac{d}{2})}{x} - 1 \right) = 0; \quad (25)$$

$$N \cdot e - f_{cd} \cdot (x \cdot b'_f - (b'_f - b) \cdot h_3) \cdot \left(\frac{h_2 \cdot b'_f \cdot (h - h_1 - \frac{h_2}{2}) + h_3 \cdot b \cdot \frac{h}{2} + b'_f \cdot (x - h_2 - h_3) \cdot (h - x - h_1 + \frac{x - h_2 - h_3}{2})}{h_2 \cdot b'_f + h_3 \cdot b + b'_f \cdot (x - h_2 - h_3)} \right) - 2 \cdot A_{s1-s2} \cdot \frac{\sigma_{scu}}{1 - (\omega/1,1)} \cdot \left(\frac{\omega \cdot ((a' + \frac{d}{2}) - h_1)}{x} - 1 \right) (h - a' - \frac{d}{2}) + 2 \cdot A_{s3-s4} \cdot \frac{\sigma_{scu}}{1 - (\omega/1,1)} \cdot \left(\frac{\omega \cdot (h - h_1 - a' - \frac{d}{2})}{x} - 1 \right) \cdot (a' + \frac{d}{2}) = 0; \quad (26)$$

Необхідно зауважити, що у рівняннях (25), (26) описаний випадок, коли нейтральна лінія в поличці, але арматурні стрижні 3-4 розтягнуті. Якщо стиснутий весь переріз, то необхідно врахувати це, змінивши знак в напруженнях. На величину напружень в арматурі впливає оголеність арматурних стрижнів, її враховуємо шляхом визначення допустимих критичних напружень.

Статистична обробка відхилень експериментальних значень залишкової несучої здатності пошкоджених елементів до несучої здатності, визначеної за методикою, до пропонується, наведена в таблиці 1.

Таблиця 1 – Результати розрахунку пошкоджених двотаврових колон

Позначення колони	Шифр	Руйнуюче зусилля $N_{експ.}$, кН	Руйнуюче зусилля розрахункове, $N_{розра.}$, кН	$\frac{N_{розра.}}{N_{експ.}}$
К 1	-1-1-1	900	790	0,88
К 2	-11-1	250	274	1,10
К 3	00-1	890	765	0,86
К 4	1-1-1	1250	965	0,77
К 5	11-1	830	785	0,95
К 6	-100	250	264	1,06
К 7	0-10	780	737	0,94
К 8	000	700	589	0,84
К 9	010	225	240	1,07
К 10	100	910	740	0,81
К 11	-1-11	490	474	0,97
К 12	-111	180	159	0,88
К 13	001	400	457	1,14
К 14	1-11	600	584	0,97
К 15	111	530	475	0,90

Як видно з результатів описана методика дає достатньо точний результат розрахунку, тобто, при виконанні простого алгоритму дій можливо отримати руйнуючі зусилля для прийняття подальших рішень щодо пошкодженого елемента.

Середньоквадратичне відхилення за результатами розрахунку склало:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\frac{N_{розра.}}{N_{експ.}} - \frac{\bar{N}_{розра.}}{\bar{N}_{експ.}})^2} = 0,115. \quad (27)$$

Коефіцієнт варіації:

$$\nu = \sqrt{\frac{\sigma}{\bar{N}_{\text{розр}}/\bar{N}_{\text{експ}}}} = 0,125 = 12,5\%. \quad (28)$$

Висновки. Несуча здатність – один з основних показників експлуатаційної придатності конструкції, тобто, знаючи значення несучої здатності, можемо розрахунковим (а не експертним) методом визначити технічний стан окремих конструкцій, а значить, і будівлі чи споруди в цілому. Розроблений та доведений до рівня можливості практичного використання аналітичний метод визначення залишкової несучої здатності пошкоджених стиснутих залізобетонних колон двотаврового поперечного перерізу, який базується на основних положеннях норм та розширює їх дію на розрахунок найбільш складного перерізу. Прийняті передумови, які є обґрунтованими або загально прийнятими. Створена системи рівнянь, які враховують усе різноманіття форм та розмірів поперечного перерізу елемента в цілому, форм та розмірів стиснутої зони бетону. Співставлення результатів аналітичного визначення залишкової несучої здатності з отриманими в ході статистично достовірного експерименту показав добру збіжність відхилення цих величин (відсоток варіації склав 12,5%, що дає основу для рекомендації методу розрахунку для практичного використання.

На підставі визначеного технічного стану можна приймати аргументовані (розрахунком) рішення щодо подальшої експлуатації будівель: ремонт, підсилення, демонтаж або, навіть невиконання жодних заходів.

В подальших дослідженнях необхідно врахувати вплив на залишкову несучу здатність гнучкості стиснутих двотаврових елементів.

Література

1. Клименко Є. В. Технічний стан будівель та споруд: монографія. Одеса: ОДАБА, 2010. 284 с.
2. ДСТУ-Н Б В.1.2-18:2016. Настанова щодо обстеження будівель і споруд для визначення та оцінки їх технічного стану. К., 2017. 45 с.
3. ДБН В.2.6-98:2009. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення. Мінрегіонбуд України. 2011. 71 с.
4. Krainskyi P., Blikharskyi Y., Khmil R., Blikharskyi Z. Experimental study of the strengthening effect of reinforced concrete columns jacketed under service load level. *MATEC Web of Conferences*. 183. 02008. 2018. URL: 10.1051/mateconf/201818302008.
5. Klimenko I., Kos Z., Grynyova I., Crnoja A. Damazhno otmechennyye konkretnyye columni razlichnykh flexibility: izucheniye i calculation: Monograph. Varaždin, Croatia, 2020. 179 p.
6. Klimenko I., Kos Z., Grynyova I., Maksuta O. Operation of Damager H-Shaped Columns. Springer Nature Switzerland AG 2021, LNCE 100, pp. 192–201, 2021. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-57340-9_24.
7. Торьяник М.С., Фалеев Л.В. и др. Расчет железобетонных конструкций при сложных деформациях. М.: Стройиздат, 1974. 297 с.
8. Hirne W.G. The corrosion of steel-random thoughts and wishful thinking. *Concrete International*. 1993. № 10. P. 54-57.
9. Suchan M. Odporność korozyjna zbrojenia oraz ocean ubytków korozyjnych w konstrukcjach żelbetowych. *Konferencja Naukowo-Techniczna «Warsztat Pracy Projektanta Konstrukcji»*. Ustroń, 1998. P. 249-261.
10. Riedel W. Die Korrosions beständigkeit von Zementen und Betonen in Magnesiumsulfat- und Magnesiumchloridlösungen. *Promotion, Dissertationsschrift, Hochschule für Bauwesen*. Leipzig, 1972. P. 157-163.
11. Kys K. Ermittlung des physischen Zustandes von Stahlbetonkonstruktionen. *Bauplanung – auttechnik*. 1980. №10. P. 447-450.

12. Wang C., Aung M. Buckling of a weakened column. *ASCE J. Engng. Mech.* 2004. № 130. P. 1373-1376.
13. Arya C., Ofori-Darko F.K. Influence of crack frequency on reinforcement corrosion in concrete. *Cement and Concrete Research.* 1996. № 3. P. 345-353.
14. Fu X., D.D.L. Chung. Effect of corrosion on the bond between concrete and steel rebar. *Cement and concrete research.* 1997. № 12. P. 1811-1815.

References

- [1] E.V. Klymenko, *Tekhnichnij stan budivel' ta sporud: monografiya*. Odesa: ODABA, 2010.
- [2] DSTU-N B V.1.2-18:2016. *Nastanova shchodo obstezhennya budivel' i sporud dlya viznachennya ta ocinki ih tekhnichnogo stanu*. K., 2017.
- [3] DBN V.2.6-98:2009. *Konstrukcii budinkiv i sporud. Betonni ta zalizobetonni konstrukcii. Osnovni polozhennya*. Minregionbud Ukraïni. 2011.
- [4] P. Kraynskiy, Y. Blikharskiy, R. Khmil, Z. Blikharskiy, "Experimental study of strengthening effect of reinforced concrete columns jacketed un service load level", *MATEC Web of Conferences*, 183, 02008, 2018. [Online]. Available: 10.1051/mateconf/201818302008.
- [5] Y. Klymenko, Z. Kos, I. Grynyova, A. Crnoja, *Damaged reinforced concrete columns of various flexibility: research and calculation: monograph*. Varaždin, Croatia, 2020.
- [6] Ye. Klymenko, Z. Kos, I. Grynyova, O. Maksuta, "Operation of Damager H-Shaped Columns", Springer Nature Switzerland AG 2021, Z. Blikharskiy (Ed.): *EcoComfort 2020*, LNCE 100, pp. 192–201, 2021. [Online]. Available: https://doi.org/10.10007/978-3-030-57340-9_24.
- [7] M.S. Toryanik, P.F. Vakhnenko, L.V. Faleyev i dr., *Raschet zhelezobetonnykh konstruksiy pri slozhnykh deformatsiyakh*. M.: Stroyizdat, 1974.
- [8] W.G. Hirne, "The corrosion of steel-random thoughts and wishful thinking", *Concrete International*, no. 10, pp. 54-57, 1993.
- [9] M. Suchan, "Odporność korozyjna zbrojenia oraz ocean ubytków korozyjnych w konstrukcjach żelbetowych", *Konferencja Naukowo-Techniczna «Warsztat Pracy Projektanta Konstrukcji»*, 1998, pp. 249-261.
- [10] W. Riedel, "Die Korrosions beständigkeit von Zementen und Betonen in Magnesiumsulfat- und Magnesiumchloridlösungen", *Promotion, Dissertationsschrift, Hochschule für Bauwesen*, 1972, pp. 157-163.
- [11] K. Kys, "Ermittlung des physischen Zustandes von Stahlbetonkonstruktionen", *Bauplanung – autechnik*, no. 10, pp. 447-450, 1980.
- [12] C. Wang, M. Aung, "Buckling of a weakened column", *ASCE J. Engng. Mech.*, no. 130, pp. 1373-1376, 2004.
- [13] C. Arya, F.K. Ofori-Darko, "Influence of crack frequency on reinforcement corrosion in concrete", *Cement and Concrete Research*, no. 3, pp. 345-353, 1996.
- [14] X. Fu, D.D.L. Chung, "Effect of corrosion on the bond between concrete and steel rebar", *Cement and concrete research*, no. 12, p. 1811-1815, 1997.

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ДВУТАВРОВЫХ
ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОЛОНН ПРИ ПРЯМОМ ПОВРЕЖДЕНИИ**

¹**Клименко Е.В.**, д.т.н., профессор,
klimenkoew57@gmail.com, ORCID: 0000-0002-4502-8504

¹**Максюта Е.В.**, аспирант,
maxiuta92@gmail.com, ORCID: 0000-0002-7587-0874

¹*Одесская государственная академия строительства и архитектуры*
ул. Дидрихсона, 4, г. Одесса, 65029, Украина

Аннотация. На основании проведенных натурных исследований и определения параметров напряженно-деформированного состояния, а также характера работы железобетонных двутавровых колонн, поврежденных в процессе эксплуатации и в ходе боевых действий, создана общая методика определения остаточной несущей способности элементов. В статье приводится методика определения остаточной несущей способности поврежденных сжатых железобетонных колонн с прямым повреждением, когда фронт повреждения параллелен одной из главных осей сечения.

Предложены предпосылки расчета поврежденных железобетонных двутавровых колонн: принимается гипотеза плоских сечений; напряжения в сжатой зоне распределяются равномерно с интенсивностью η_{fcd} ; напряжения в арматуре принимаются в зависимости от высоты сжатой зоны бетона, усилия в растянутой зоне воспринимаются арматурой и принимаются не больше расчетного сопротивления растяжению f_t ; работа растянутого бетона не учитывается; принимается условие параллельности силовых плоскостей (плоскость действия внешних и внутренних сил совпадают или параллельны в зависимости от расчетного случая); учитывается пониженная несущая способность обнаженных арматурных стержней; фронт повреждения – прямая линия.

Составлены уравнения равновесия. Предложения, изложенные в статье, основываются на основных положениях действующих норм и расширяют область их использования.

Предложенная методика определения остаточной несущей способности железобетонных сжатых элементов таврового профиля, поврежденных в процессе эксплуатации, статистически обоснованная и достоверная. Это позволяет расчетным методом определить возможность дальнейшей безаварийной эксплуатации конструкций или необходимость их усиления или реконструкции.

Создана система уравнений, учитывающих все разнообразие форм и размеров поперечного сечения элемента в целом, форм и размеров сжатой зоны бетона. Достоверность данных предложений подтверждена путем сопоставления с данными, полученными экспериментальным путем, и статистической обработкой такого сопоставления. Коэффициент вариации отклонения составляет 0,125.

Ключевые слова: железобетонные колонны, двутавровое сечение, повреждения, методика расчета, остаточная несущая способность.

**DETERMINATION OF CARRYING CAPACITY OF TWO-WOOD REINFORCED
CONCRETE COLUMNS IN DIRECT DAMAGE**

¹**Klymenko Ye.V.**, Doctor of Engineering Science, Professor,
klimenkoew57@gmail.com, ORCID: 0000-0002-4502-8504

¹**Maksiuta E.V.**, postgraduate,
maxiuta92@gmail.com, ORCID: 0000-0002-7587-0874

¹*Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture*
4, Didrichson street, Odessa, 65029, Ukraine

Abstract. Based on the field studies and determination of the parameters of the stress-strain state, as well as the nature of the operation of reinforced concrete I-beam columns damaged during operation and during hostilities, a general method for determining the residual bearing capacity of elements was created. The article presents a method for determining the residual bearing capacity of damaged compressed reinforced concrete columns with direct damage, when the damage front is parallel to one of the main axes of the section.

The prerequisites for the calculation of damaged reinforced concrete I-columns are proposed: the hypothesis of flat sections is accepted; stresses in the compressed zone are distributed uniformly with intensity η_{fcd} ; the stresses in the reinforcement are taken depending on the height of the compressed zone of concrete, the forces in the tension zone are perceived by the reinforcement and are taken no more than the design tensile strength f_t ; the work of tensioned concrete is not taken into account; the condition of parallelism of force planes is accepted (the plane of action of external and internal forces are the same or parallel, depending on the design case); the reduced bearing capacity of exposed reinforcing bars is taken into account; damage front is a straight line.

Equilibrium equations are composed. The proposals set forth in the article are based on the main provisions of the current norms and expand the scope of their use.

The proposed method for determining the residual bearing capacity of reinforced concrete compressed elements of the tee profile, damaged during operation, is statistically justified and reliable. This allows the calculation method to determine the possibility of further trouble-free operation of structures or the need for their strengthening or reconstruction.

A system of equations has been created that takes into account all the variety of shapes and sizes of the cross section of the element as a whole, the shapes and sizes of the compressed concrete zone. The reliability of these proposals is confirmed by comparison with data obtained experimentally, and statistical processing of such a comparison. The deviation variation coefficient is 0,125.

Keywords: reinforced concrete columns, I-section, damage, calculation method, residual bearing capacity.

Стаття надійшла до редакції 4.03.2022