

УДК 624.012.36

doi:10.31650/2707-3068-2022-26-115-127

СТАЛЕВА ОБОЙМА, ЯК ЕКСПРЕСМЕТОД ПІДСИЛЕННЯ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ПОШКОДЖЕНИХ КОЛОН¹**Клименко Є.В.**, д.т.н., професор,
klimenkoew57@gmail.com, ORCID: 0000-0002-4502-8504¹**Максюта О.В.**, аспірантка,
maxiuta92@gmail.com, ORCID: 0000-0002-7587-0874¹*Одеська 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 пошкодженням під кутом, коли фронт пошкодження не паралельний одній з головних осей перерізу та посиленням сталеву обоймою.

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. Гілки обойми посилення враховуються як додаткова арматура.

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 та підсилених сталеву обоймою є статистично обґрунтованою та достовірною. Це дозволяє розрахунковим методом визначити можливість подальшої безаварійної експлуатації конструкцій.

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, сталеву обойма, методика розрахунку, залишкова несуча здатність.

Вступ. Залізобетон, як матеріал, широко використовується в будівельній галузі, особливо для виготовлення стиснутих елементів, де найкращим чином реалізуються його переваги. В процесі експлуатації, через механічні пошкодження (особливо – в ході бойових дій) залізобетонні конструкції зазнають пошкоджень, що знижує показники експлуатаційної придатності конструкцій та може сприяти переходу в гірший технічний стан [1].

Найбільш поширеними пошкодженнями залізобетонних конструкцій є: корозія робочої арматури (зменшення площі її поперечного перерізу обрив частини стержнів поздовжньої та/або 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.

Дослідженням роботи пошкоджених у процесі експлуатації стиснутих бетонних та залізобетонних конструкцій присвячено чимало робіт, наприклад [2].

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 [3]. 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.

Найбільш ефективним і швидким методом підсилення пошкоджених залізобетонних колон є встановлення сталевих обойм без бетонування пошкодженого перерізу бетону. Однак в цьому випадку постає питання визначення залишкової несучої здатності пошкодженого поперечного перерізу з врахуванням роботи додаткової арматури обойми.

Чинні будівельні норми [4, 5] 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 [6], то рекомендації щодо врахування втрати частини двотаврового перерізу та підсилені сталевую обоймою 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 пошкодженому перерізі.

Досить детально вивчена робота арматурної сталі в залізобетонних елементах, що експлуатуються, 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, чи аналітичними залежностями, але вони не підтверджені експериментально [10-12].

Практично відсутні дані щодо впливу параметрів таврового поперечного перерізу залізобетонних косостиснутих колон (пошкоджених в процесі експлуатації) та підсилених сталевими обоймами на їх залишкову несучу здатність. Досліди [3] дозволили вивчити та описати роботу стиснутих залізобетонних колон двотаврового поперечного перерізу з пошкодженнями, але в роботі не наведена методика визначення залишкової несучої здатності підсилених пошкоджених колон, яку можна було б використовувати в практичних розрахунках.

Підсилення сталевими обоймами (рис. 1) стиснутих залізобетонних елементів є досить ефективним [13], але потребує часу на твердіння ремонтного бетону в місці пошкодження. Як експрес метод підсилення може бути рекомендовано установку обойми без замонолічування зони пошкодженого бетону. Однак, визначення залишкової несучої здатності пошкоджених залізобетонних елементів, підсилених сталевими обоймами в даний час неможливе.

Мета цього дослідження – розроблення методики визначення залишкової несучої здатності залізобетонних стиснутих елементів двотаврового поперечного перерізу при пошкодженні під кутом та підсилених сталевими обоймами, яка б базувалась на основних положеннях чинних норм та розвивала їх дію на роботу косостиснутих підсилених залізобетонних елементів.

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

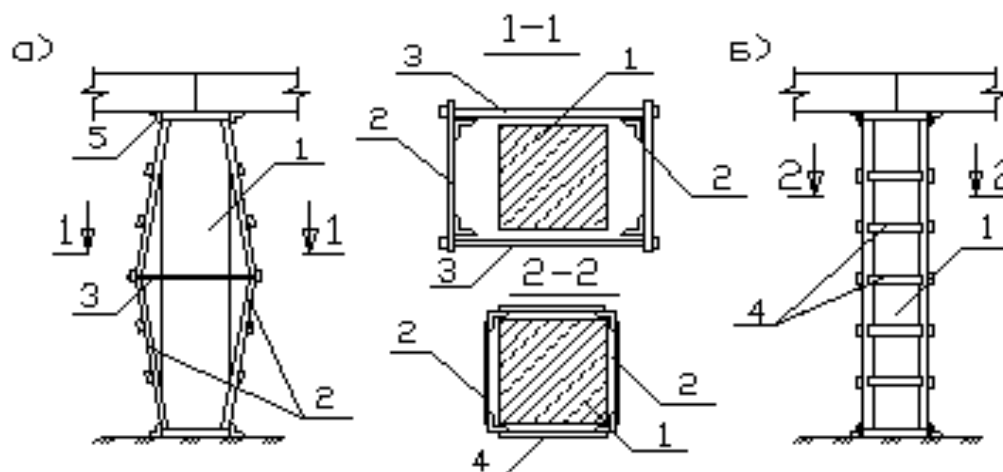


Рис. 1. Підсилення колони металевою обоймою: а) – в період монтажу; б) – проєктне положення; 1 – колона; 2 – розпірки із кутиків та планок; 3 – натяжні монтажні болти; 4 – з'єднувальні планки; 5 – упорні елементи

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 позакентровано стиснуті елементи з шарнірним обпиранням кінців в гідравлічному пресі в лабораторних умовах. Детально методика проведення натурних та чисельних досліджень викладена в роботах [3].

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 [3] 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.

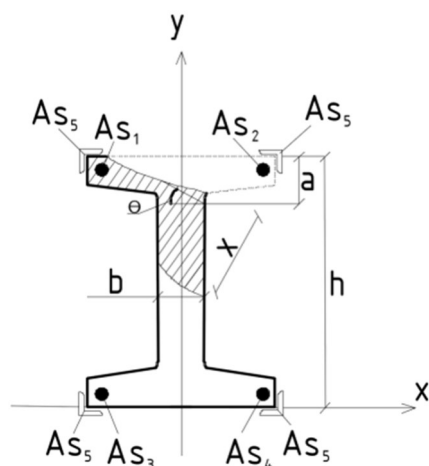


Рис. 2. Розрахунковий переріз підсиленої колони

При розгляді розрахункового перерізу (рис. 2) стержнева арматура розглядалася в комплексі з жорсткою (з відповідними характеристиками міцності), тобто жорстка арматура приводилась до гнучкої. Таким чином згідно рис. 2 в кожному куті перерізу розташовувалась арматура:

$$A_s = A_{s_i} + A_{s_5} \frac{f_{yd5}}{f_{ydi}} \quad (1)$$

Розрахунок залізобетонних будівельних конструкцій за несучою здатністю чинні норми [5] 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 [5].

Положення нейтральної лінії при косому позакентровому 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 [5] 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 [2, 3]. Однак, при забезпеченні надійного з'єднання оголеної арматури з жорсткою арматурою (кутиком обійми) з кроком не менше ніж 20 діаметрів гнучкої арматури, це зниження можна не враховувати

В методиці враховуються рекомендації [5] 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 $b h'_f$;
2. $0,05h \leq h'_f < 0,1h$ – приймаємо $3 h'_f$;
3. $h'_f < 0,05h$ – зв'язи не враховуються.

В даній статті розглядається робота конструкцій з пошкодженнями перерізу під кутом (рис. 3).

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 $\sigma_{кр}$ (за необхідності).

7. Вводяться поняття пошкодження під кутом. 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.

У випадку пошкодження під кутом є декілька варіантів положення нейтральної лінії. Нейтральна лінія буде під кутом, відмінним від кута пошкодження, тобто, стиснута зона може

включати в собі частину і ребра, і полки. Можливо багато варіантів форми стиснутої зони, при розрахунку будемо задаватися найбільш ймовірними, а у випадку, якщо результати розрахунку не будуть задовольняти нашим обмеженням ($N > 0$, $x > 0$, $x \leq h_2 + h_3$ – в ребрі, $x \geq h_2 + h_3$ – в полці) необхідно переглянути форму стиснутої зони і повторити розрахунок з новою площею. Кут нахилу нейтральної лінії, на відміну від руйнуючої сили і висоти стиснутої зони, може бути від'ємним, що означає що кут γ відраховуємо в протилежну сторону від прийнятого напрямку.

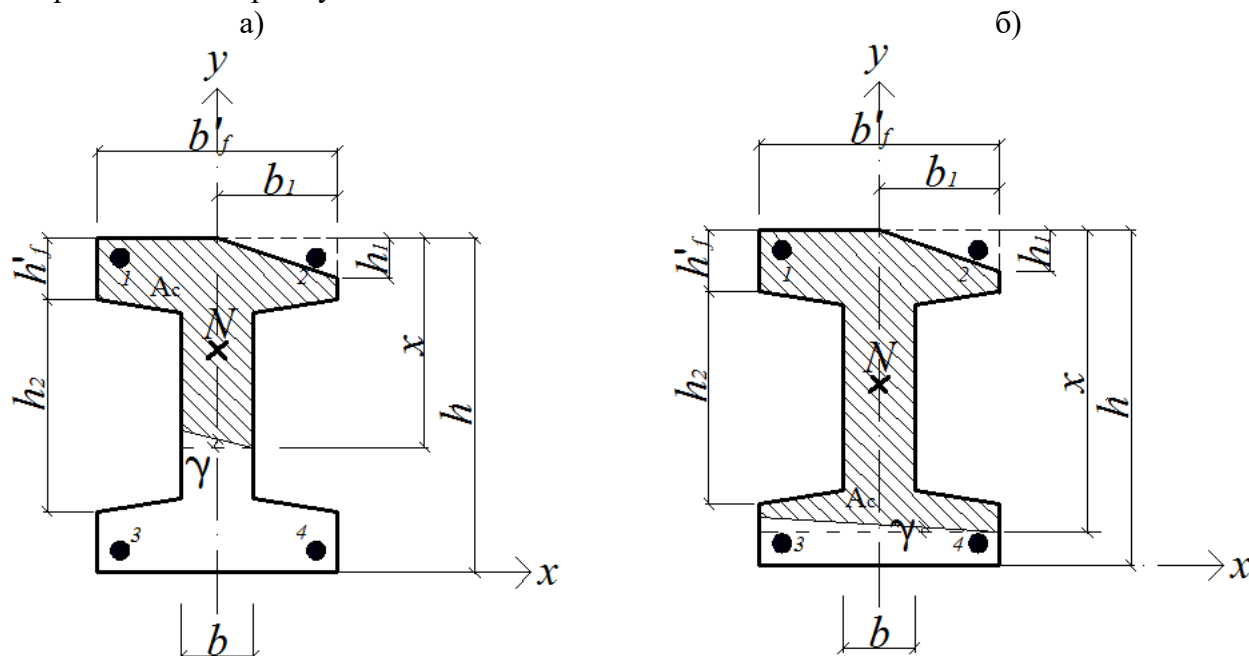


Рис. 3. Можливі варіанти положення нейтральної лінії в елементах з пошкодженням під кутом: а – у ребрі, б – у полці

Далі розглядається два з можливих варіантів положення нейтральної лінії під кутом γ : у ребрі і у полці (рис. 3).

Аналізуємо параметри пошкодження двотавра, точку прикладання сили, наявність оголених стрижнів, які необхідно врахувати у розрахунку, задаємося положенням нейтральної лінії. Для колон з центральним стисненням імовірніший за все варіант положення у нижній полці, з ексцентриситетом – у ребрі. Цими передумовами і будемо користуватися у першому наближенні.

Випадок 1: нейтральна лінія проходить у ребрі. Крім невідомого руйнуючого зусилля та стиснутої зони у задачах з пошкодженням під кутом фігурує ще одна величина – кут нахилу нейтральної лінії γ . Тому, для знаходження невідомих знадобиться скласти три рівняння. Рівняння рівноваги зовнішніх і внутрішніх сил на вісь x (2):

$$N - f_{cd} \cdot A_c - \sum_{i=1}^n \sigma_{s1-s4} \cdot A_{s1-s4} = 0; \quad (2)$$

де: A_c – площа стиснутої зони бетону (рис. 3, а).

Площу A_c знайдемо як складену із простих складових фігур, на які розбиваємо стиснуту зону (рис. 4, а):

$$A_c = A_1 + A_2 - A_3 - A_4, \quad (3)$$

де:

$$A_1 = b'_f \cdot h'_f; \quad (4)$$

$$A_2 = b \cdot (x - h'_f); \quad (5)$$

$$A_3 = \frac{1}{2} \cdot b_1 \cdot h_1; \quad (6)$$

$$A_4 = \frac{1}{2} \cdot b^2 \cdot \tan \gamma. \quad (7)$$

Підставимо (4–7) в (3):

$$A_c = b'_f \cdot h'_f + b \cdot (x - h'_f) - \frac{1}{2} b_1 \cdot h_1 - \frac{1}{2} b^2 \cdot \tan \gamma. \quad (8)$$

Напруження у арматурних стрижнях знайдемо за формулою (9):

$$\sigma_{si} = \frac{\sigma_{scu}}{1 - (\omega/1,1)} \cdot \left(\frac{\omega}{\xi_i} - 1 \right). \quad (9)$$

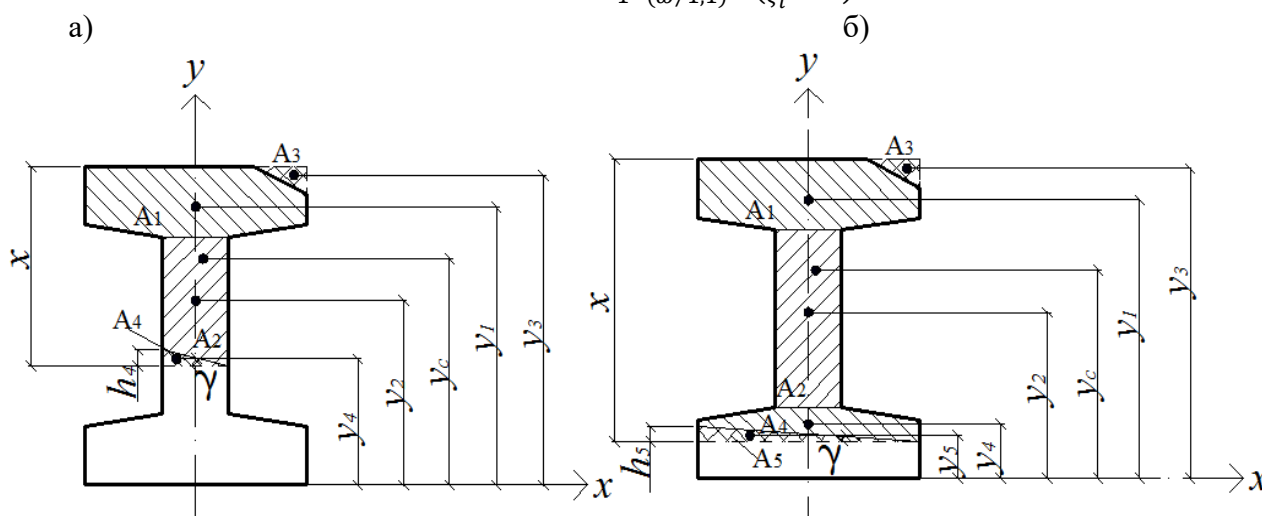


Рис. 4. До визначення A_c та y_c :

а – прості фігури, з яких складається площа стиснутої зони, якщо нейтральна лінія проходить у ребрі, б – прості фігури, з яких складається площа стиснутої зони, якщо нейтральна лінія проходить у полці

Величини h_{oi} (рис. 4, б) визначаємо із геометрії перерізу. У випадку, коли напруження у стрижні дорівнюють $\sigma_{кр}$ або f_{yd} (випадок оголених стержнів або сила прикладена з ексцентриситетом) необхідність у їх визначенні відпадає.

Оскільки має місце випадок косого стиску, то відстані h_{oi} від осей центра мас арматурних стержнів до найбільш стиснутої точки перерізу будуть проходити під кутом γ . Знайдемо значення h_{01-04} з геометрії трикутників, які утворилися.

Величина h_{01} відповідає відрізу A_1F_1 (рис. 5, а). З $\Delta A_1B_1C_1$:

$$B_1C_1 = a' + \frac{d}{2}; \quad (10)$$

a' – захисний шар бетону, d – діаметр арматурного стержня.

$$A_1B_1 = B_1C_1 \cdot \operatorname{tg} \gamma. \quad (11)$$

З $\Delta I_1D_1K_1$:

$$D_1K_1 = b'_f - b_1; \quad (12)$$

$$I_1D_1 = D_1K_1 \cdot \operatorname{tg} \gamma. \quad (13)$$

У $\Delta A_1F_1I_1$:

$$A_1I_1 = a' + \frac{d}{2} - A_1B_1 + I_1D_1; \quad (14)$$

$$A_1F_1 = A_1I_1 \cdot \cos \gamma. \quad (15)$$

Підставивши отримуємо :

$$h_{01} = \left(\left(a' + \frac{d}{2} \right) - \left(a' + \frac{d}{2} \right) \cdot \operatorname{tg} \gamma + (b'_f - b_1) \cdot \operatorname{tg} \gamma \right) \cdot \cos \gamma. \quad (16)$$

Висоту h_{02} визначаємо лише у випадку невеликих за розміром пошкоджень, які не оголюють стрижень 2, в іншому випадку приймаємо його рівним величині $\sigma_{кр}$. Величині h_{02} відповідає відрізок A_2B_2 (рис. 5, б).

$$D_2C_2 = a' + \frac{d}{2}. \quad (17)$$

З $\Delta A_2D_2F_2$:

$$D_2F_2 = a' + \frac{d}{2} - b_1; \quad (18)$$

$$A_2D_2 = D_2F_2 \cdot \operatorname{tg} \gamma; \quad (19)$$

$$A_2C_2 = A_2D_2 + D_2C_2. \quad (20)$$

З $\Delta A_2B_2C_2$:

$$A_2B_2 = A_2C_2 \cdot \cos\gamma. \quad (21)$$

Підставивши отримуємо :

$$h_{02} = \left(\left(a' + \frac{d}{2} - b_1 \right) \cdot \operatorname{tg}\gamma + \left(a' + \frac{d}{2} \right) \right) \cdot \cos\gamma. \quad (22)$$

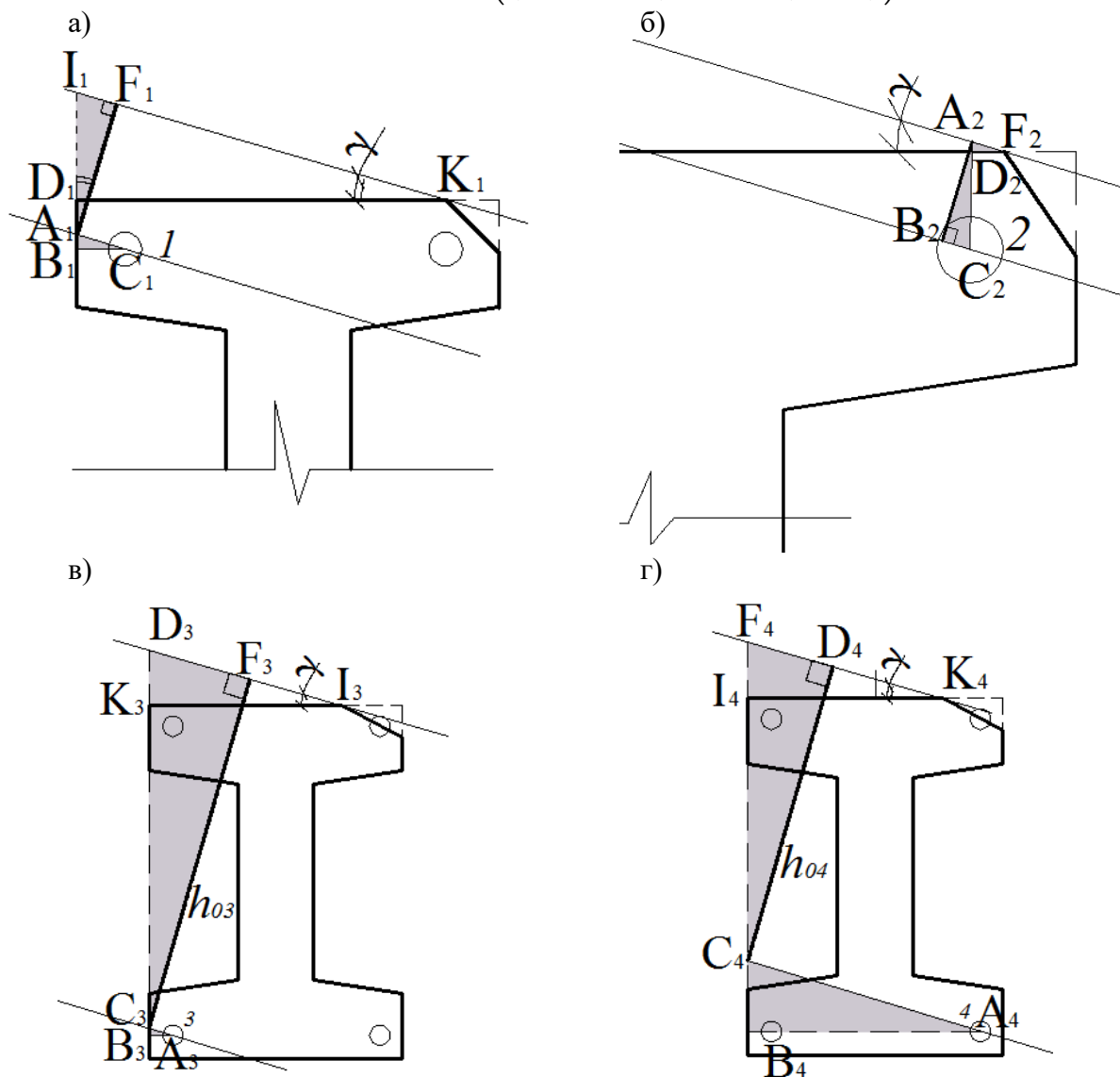


Рис. 5. До визначення величин h_{0i} : а – величина h_{01} ; б – величина h_{02} ; в – величина h_{03} ; г – величина h_{04}

Величина h_{03} відповідає відрізьку C_3F_3 (рис. 5, в).

З $\triangle A_3B_3C_3$:

$$A_3B_3 = a' + \frac{d}{2}; \quad (23)$$

$$B_3C_3 = A_3B_3 \cdot \operatorname{tg}\gamma. \quad (24)$$

З $\triangle I_3K_3D_3$:

$$I_3K_3 = b'_f - b_1; \quad (25)$$

$$K_3D_3 = I_3K_3 \cdot \operatorname{tg}\gamma. \quad (26)$$

З $\triangle C_3F_3D_3$:

$$C_3F_3 = D_3F_3 \cdot \cos\gamma; \quad (27)$$

$$D_3C_3 = h_0 - B_3C_3 + K_3D_3; \quad (28)$$

$$h_0 = h - a' - \frac{d}{2}. \quad (29)$$

Підставивши отримуємо:

$$h_{03} = \left(\left(h - a' - \frac{d}{2} \right) - \left(a' + \frac{d}{2} \right) \cdot \operatorname{tg} \gamma + (b'_f - b_1) \cdot \operatorname{tg} \gamma \right) \cdot \cos \gamma. \quad (30)$$

Величина h_{04} відповідає відрізку C_4D_4 (рис. 5, г).

З $\Delta A_4B_4C_4$:

$$A_4B_4 = b'_f - a' - \frac{d}{2}; \quad (31)$$

$$B_4C_4 = A_4B_4 \cdot \operatorname{tg} \gamma. \quad (32)$$

З $\Delta F_4I_4K_4$:

$$I_4K_4 = b'_f - b_1; \quad (33)$$

$$F_4I_4 = I_4K_4 \cdot \operatorname{tg} \gamma. \quad (34)$$

З $\Delta F_4D_4C_4$:

$$C_4D_4 = F_4C_4 \cdot \cos \gamma; \quad (35)$$

$$F_4C_4 = h_0 - B_4C_4 + F_4I_4. \quad (36)$$

Підставивши отримуємо :

$$h_{04} = \left(\left(h - a' - \frac{d}{2} \right) - \left(b'_f - a' - \frac{d}{2} \right) \cdot \operatorname{tg} \gamma + (b'_f - b_1) \cdot \operatorname{tg} \gamma \right) \cdot \cos \gamma. \quad (37)$$

Запишемо рівняння суми моментів сил відносно вісі x , що проходить по зовнішній грані перерізу:

$$N \cdot e - f_{cd} \cdot A_c \cdot y_c - \sum_{i=1}^n \sigma_{s1-s2} \cdot A_{s1-s2} \left(h - a' - \frac{d}{2} \right) + \sum_{i=1}^n \sigma_{s3-s4} \cdot A_{s3-s4} \left(a' + \frac{d}{2} \right) = 0. \quad (38)$$

Координату центру мас стиснутої зони y_c визначимо за формулою (39) як сукупну координату складної фігури. Розіб'ємо стиснуту зону бетону на прості складові фігури як показано на рисунку 4, а. Площі $A_1 - A_4$ вже визначені у (4)...(7).

$$y_c = \frac{A_1 \cdot y_1 + A_2 \cdot y_2 - A_3 \cdot y_3 - A_4 \cdot y_4}{A_1 + A_2 - A_3 - A_4}; \quad (39)$$

$$y_1 = h - \frac{h'_f}{2}; \quad (40)$$

$$y_2 = h - h'_f - \frac{(x - h'_f)}{2}; \quad (41)$$

$$y_3 = h - \frac{h_1}{3}; \quad (42)$$

$$y_4 = h - x + \frac{b \cdot \operatorname{tg} \gamma}{3}. \quad (43)$$

Підставимо (4)...(7) та (40)...(43) в вираз (39):

$$y_c = \frac{h'_f \cdot b'_f \cdot \left(h - \frac{h'_f}{2} \right) + b \cdot (x - h'_f) \cdot \left(h - h'_f - \frac{(x - h'_f)}{2} \right) - \frac{1}{2} b_1 \cdot h_1 \cdot \left(h - \frac{h_1}{2} \right) - \frac{1}{2} b^2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot \left(h - x + \frac{b \cdot \operatorname{tg} \gamma}{3} \right)}{h'_f \cdot b'_f + b \cdot (x - h'_f) - \frac{1}{2} b_1 \cdot h_1 - \frac{1}{2} b^2 \cdot \operatorname{tg} \gamma}. \quad (44)$$

Оскільки для вирішення задачі необхідно знайти три невідомі, то запишемо третє рівняння – рівняння суми статичних моментів стиснутої зони бетону відносно осі y (51). Його можна розглядати завдяки прийнятій передумови рівномірного характеру розподілу напружень.

Формулою (39) описано положення стиснутої зони бетону відносно осі y , за аналогією запишемо координату відносно осі x :

$$x_c = \frac{A_1 \cdot x_1 + A_2 \cdot x_2 - A_3 \cdot x_3 - A_4 \cdot x_4}{A_1 + A_2 - A_3 - A_4}; \quad (45)$$

$$x_1 = \frac{b'_f}{2}; \quad (46)$$

$$x_2 = \frac{b'_f}{2}; \quad (47)$$

$$x_3 = b'_f - \frac{b_1}{3}; \quad (48)$$

$$x_4 = \frac{b'_f - b}{2} + \frac{b}{3}. \quad (49)$$

Підставимо (4)...(7) та (46)...(49) у вираз (45):

$$x_c = \frac{h'_f \cdot b'_f \cdot \frac{b'_f}{2} + b \cdot (x - h'_f) \cdot \frac{b'_f}{2} - \frac{1}{2} b_1 \cdot h_1 \cdot \left(b'_f - \frac{b_1}{3} \right) - \frac{1}{2} b^2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot \left(\frac{b'_f - b}{2} + \frac{b}{3} \right)}{h'_f \cdot b'_f + b \cdot (x - h'_f) - \frac{1}{2} b_1 \cdot h_1 - \frac{1}{2} b^2 \cdot \operatorname{tg} \gamma}; \quad (50)$$

Таким чином, формулами (43) та (50) ми описали положення центру ваги стиснутої зони бетону. Через цю координату проведемо головні осі $x_1 y_1$ стиснутої зони бетону (рис. 6, а).

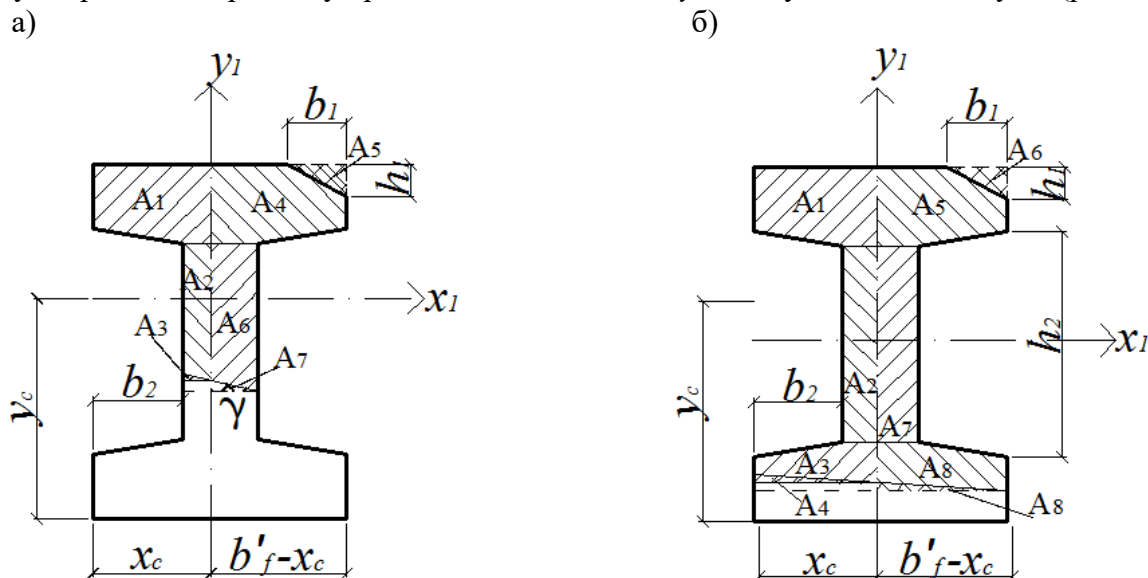


Рис. 6. До визначення статичного моменту S_{y_1} відносно головних осей $y_1 x_1$: а – нейтральна лінія проходить у ребрі; б – нейтральна лінія проходить у полці

Права і ліва частини відносно осі y_1 повинні бути у рівновазі

$$S_{y_1} = A_1 \cdot x_1 + A_2 \cdot x_2 - A_3 \cdot x_3 - A_4 \cdot x_4 + A_5 \cdot x_5 - A_6 \cdot x_6 + A_7 \cdot x_7 = 0; \quad (51)$$

Визначимо площі складових фігур та їх координати:

$$A_1 = h'_f \cdot x_c; \quad (52)$$

$$A_2 = (x - h'_f - (b - (x_c - b_2)) \cdot \operatorname{tg} \gamma) \cdot (x_c - b_2); \quad (53)$$

$$A_3 = \frac{1}{2} \cdot (x_c - b_2)^2 \cdot \operatorname{tg} \gamma; \quad (54)$$

$$A_4 = (b'_f - x_c) \cdot h'_f; \quad (55)$$

$$A_5 = \frac{1}{2} \cdot b_1 \cdot h_1; \quad (57)$$

$$A_6 = (b'_f - x_c - b_2) \cdot (x - h'_f); \quad (57)$$

$$A_7 = \frac{1}{2} \cdot (b - (x_c - b_2))^2 \cdot \operatorname{tg} \gamma; \quad (58)$$

$$x_1 = \frac{x_c}{2}; \quad (59)$$

$$x_2 = \frac{x_c - b_2}{2}; \quad (60)$$

$$x_3 = \frac{2}{3} \cdot (x_c - b_2); \quad (61)$$

$$x_4 = \frac{b'_f - x_c}{2}; \quad (61)$$

$$x_5 = b'_f - x_c - \frac{b_1}{3}; \quad (63)$$

$$x_6 = \frac{b - (x_c - b_2)}{2}; \quad (64)$$

$$x_7 = \frac{b - (x_c - b_2)}{3}. \quad (65)$$

Підставимо (52)...(65) у (51):

$$S_{y_1} = h'_f \cdot x_c \cdot \frac{x_c}{2} + (x - h'_f - (b - (x_c - b_2))) \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot (x_c - b_2) \cdot \frac{x_c - b_2}{2} - \frac{1}{2} \cdot (x_c - b_2)^2 \cdot \cdot \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot \frac{2}{3} \cdot (x_c - b_2) - (b'_f - x_c) \cdot h'_f \cdot \frac{b'_f - x_c}{2} + \frac{1}{2} \cdot b_1 \cdot h_1 \cdot (b'_f - x_c - \frac{b_1}{3}) - (b'_f - x_c - b_2) \cdot (x - h'_f) \cdot \frac{b - (x_c - b_2)}{2} + \frac{1}{2} \cdot (b - (x_c - b_2))^2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot \frac{b - (x_c - b_2)}{3} = 0. \quad (66)$$

Зважаючи на об'ємність запису рівняння (66) після підстановки виразу x_c (50), рекомендується виконувати обчислення системи рівнянь (2), (66) за допомогою математичних комплексів. У межах даної дисертаційної роботи для спрощення перетворень був використаний *KП Matlab*, система рівнянь розв'язувалась методом послідовних наближень за допомогою алгоритму, створеного в *Microsoft Excel*.

У результаті розв'язку системи рівнянь, отримуємо пари корені, які необхідно проаналізувати, їх може бути декілька: $N > 0, x > 0, x \leq h_2 + h_3$. Якщо корені не задовольняють цим вимогам, то необхідно зробити перерахунок задачі, змінивши при цьому форму стиснутої зони бетону. Аналогічно обчислюємо залишкову несучу здатність для інших положень нейтральної осі.

Статистична обробка відхилень експериментальних значень залишкової несучої здатності пошкоджених елементів до несучої здатності, визначеної за методикою, що пропонується, 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:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\frac{N_{\text{розр}}}{N_{\text{експ}}} - \frac{\bar{N}_{\text{розр}}}{\bar{N}_{\text{експ}}})^2} = 0,115. \quad (67)$$

Коефіцієнт варіації:

$$\nu = \sqrt{\frac{\sigma}{\bar{N}_{\text{розр}}/\bar{N}_{\text{експ}}}} = 0,125 = 12,5\%. \quad (68)$$

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, підсилений сталеву обіймою, який базується на основних положеннях норм та розширює їх дію на розрахунок найбільш складного перерізу та методу підсилення. 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 нежиття 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. Klimenko Y., Kos Z., Grynova I., Crnoja A. Damaged reinforced concrete columns of

various flexibility: research and calculation: Monograph. Varaždin, Croatia, 2020. 179 p.

3. Klimenko Y., Kos Z., Grynyova I., Maksuta O. Operation of Damager H-Shaped Columns. Springer Nature Switzerland AG 2021, LNCE 100, pp. 192-201, 2021.

4. 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.

5. ДБН В.2.6-98:2009. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення. Мінрегіонбуд України. 2011. 71 с.

6. 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.

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 Korrosionsbeständigkeit von Zementen und Betonen in Magnesiumsulfat- und Magnesiumchloridlösungen. Promotion, Dissertationsschrift, Hochschule für Bauwesen. Leipzig, 1972 S. 157-163.

11. Kys K. Ermittlung des physischen Zustandes von Stahlbetonkonstruktionen. Bauplanung – autotechnik. 1980. №10. P. 447-450.

12. Wang C. Buckling of a weakened column. *ASCE J. Engng. Mech.* 2004. №130. P. 1373-1376.

13. Мальганов А.И., Плевков В.С. и др. Усиление железобетонных и каменных конструкций зданий и сооружений. Изд. Томского Университета, Томск, 1989. 88 с.

References

- [1] E.V. Klymenko *Tekhnichnij stan budivel ta sporud*: monografiya. Odesa: ODABA, 2010.
- [2] Klimenko Y., Kos Z., Grynyova I., Crnoja A. Damaged reinforced concrete columns of various flexibility: research i calculation: Monograph. Varaždin, Croatia, 2020. 179 p.
- [3] Klimenko Y., Kos Z., Grynyova I., Maksuta O. Operation of Damager H-Shaped Columns. Springer Nature Switzerland AG 2021, LNCE 100, pp. 192–201, 2021.
- [4] DSTU-N B V.1.2-18:2016. *Nastanova shchodo obstezhennya budivel' i sporud dlya viznachennya ta ocinki ih tekhnichnogo stanu*. K., 2017.
- [5] DBN V.2.6-98:2009. *Konstrukcii budinkiv i sporud. Betonni ta zalizobetonni konstrukcii. Osnovni polozhennya*. Minregionbud Ukraïni. 2011.
- [6] Krainskyi P., Blikharskyi Y., Khmil R., Blikharskyi Z. Experimental study of the strenght hening effecto frein forced concrete columns jackete dunder service load level. *MATEC Web of Conferences*. 183. 02008. 2018.
- [5] Y. Klymenko, Z. Kos, I. Grynyova, A. Crnoja, *Damaged reinforced concrete columns of various flexibility: research and calculation*: monograph. Varaždin, Croatia, 2020.
- [7] Toryanik M.S., Faleyev L.V. i dr. *Raschet zhelezobetonnykh konstruktsiy pri slozhnykh deformatsiyakh*. M.: Stroyizdat, 1974.
- [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. S. 157-163.
- [11] Kys K. *Ermittlung des physischen Zustandes von Stahlbetonkonstruktionen*. Bauplanung – autotechnik. 1980. №10. P. 447-450.
- [12] Wang C. *Buckling of a weakened column*. ASCE J. Engng. Mech. 2004. №130. P. 1373-1376.
- [13] Mal'ganov A.I., Plevkov V.S. i dr. *Usileniye zhelezobetonnykh i kamennykh konstruktivnykh zdaniy i sooruzheniy*. Izd. Tomskogo Universiteta, Tomsk, 1989. 88 s.

СТАЛЬНАЯ ОБОЙМА, КАК ЭКСПРЕССМЕТОД УСИЛЕНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПОВРЕЖДЕННЫХ КОЛОН

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

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

¹Одесская 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 повреждением под углом, когда фронт повреждения не параллелен одной из главных осей сечения и усилению стальной обоймы.

Предложены предпосылки для расчета поврежденных железобетонных двутавровых колонн: принимается гипотеза плоских сечений; напряжения в сжатой зоне распределяются равномерно с интенсивностью ηf_{cd} ; напряжения в арматуре принимаются в зависимости от высоты сжатой зоны бетона, усилия в растянутой зоне воспринимаются арматурой и принимаются в пределах расчета растяжения f_i ; 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. Ветки обоймы усиления учитываются как дополнительная арматура.

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

Предложенная методика определения остаточной несущей способности железобетонных сжатых элементов таврового профиля, поврежденных в процессе эксплуатации и усиленных стальной обоймой, является статистически обоснованной и достоверной. Это позволяет расчетным методом определить возможность дальнейшей безаварийной эксплуатации конструкций.

Создана система уравнений, учитывающих все разнообразие форм и размеров поперечного сечения элемента в целом, форм и размеров сжатой зоны бетона. Достоверность этих 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, стальная обойма, методика расчета, остаточная несущая способность.

STEEL CLAMP AS EXPRESS METHOD OF REINFORCEMENT OF REINFORCED CONCRETE DAMAGED COLUMNS

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 damage at an angle, when the damage front is not parallel to one of the main axes of the section and the reinforcement of the steel cage.

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 ηf_{cd} ; 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 accepted within the calculation of tension 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 coincide or are parallel, depending on the design case); the reduced bearing capacity of exposed reinforcing bars is taken into account; damage front is a straight line. Reinforcement clip branches are taken into account as additional reinforcement.

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 and reinforced with a steel cage, is statistically justified and reliable. This allows the calculation method to determine the possibility of further trouble-free operation of structures.

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, steel cage, calculation method, residual bearing capacity.