

**ЗАЛИШКОВА НЕСУЧА ЗДАТНІСТЬ ПОШКОДЖЕНИХ
ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОЛОН ДВОТАВРОВОГО ПРОФІЛЮ**

**RESIDUAL CARRYING CAPACITY OF DAMAGED REINFORCED
CONCRETE COLUMNS OF I-BEAM PROFILE**

Клименко Є. В., д.т.н., професор, ORCID: 0000-0002-4502-8504,

Максюта О. В., аспірантка, ORCID: 0000-0002-7587-0874 (Одеська державна академія будівництва та архітектури)

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

¹**Maksiuta E. V.**, postgraduate, ORCID: 0000-0002-7587-0874

¹Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture

На підставі проведених натурних досліджень та визначення параметрів напружено-деформованого стану залізобетонних двотаврових колон, пошкоджених у процесі експлуатації, створено загальну методику визначення залишкової несучої здатності елементів. У статті наводиться методика визначення залишкової несучої здатності залізобетонних колон з пошкодженням під кутом до головних осей перерізу.

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.

Ключові слова: залізобетонні конструкції, двотавровий переріз, стиск, пошкодження, експлуатація, розрахунок, залишкова несуча здатність.

reinforced concrete structures, I-beam section, compression, damage, operation, calculation, residual bearing capacity.

Вступ. Одними з найбільш поширеними в практиці будівництва є залізобетонні конструкції. В процесі експлуатації, а особливо інтенсивно – в ході бойових дій, вони зазнають пошкоджень [1], що знижує показники експлуатаційної придатності конструкцій та може сприяти переходу в гірший технічний стан [2].

Чинні будівельні норми [3, 4] 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 [5], 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 [6...11].

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 [12]. Рекомендації щодо врахування втрати частини двотаврового перерізу відсутні в науковій та нормативній літературі.

Аналіз попередніх досліджень. 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. [13] та його учнів [14]. 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.

Практично відсутні дані щодо впливу параметрів таврового поперечного перерізу залізобетонних косостиснутих колон (пошкоджених в процесі експлуатації) на їх залишкову несучу здатність. Досліди [12] 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 роботи – розроблення методики визначення залишкової несучої здатності залізобетонних стиснутих елементів двотаврового поперечного перерізу при пошкодженні під кутом, 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 апробація 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 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 роботі [12].

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 досліджень. Розрахунок залізобетонних будівельних конструкцій за несучою здатністю чинні норми [6] 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 [4].

Положення нейтральної лінії при косому позацентровому стиску визначається висотою стиснутої зони x та кутом нахилу нейтральної лінії γ .

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 [11].

Приймаємо основні передумови розрахунку та допущення:

1. Приймаємо гіпотезу плоских перерізів.
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.
6. Враховуємо оголення арматурних стрижнів $\sigma_{кр}$.

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.

Розглянемо випадок, коли нейтральна вісь проходить в межах полицки (рис. 1).

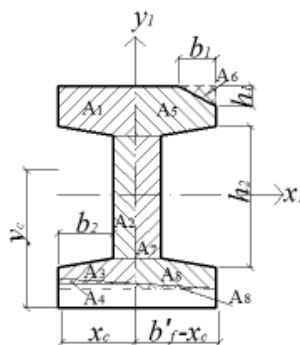


Рис. 1. Розрахунковий поперечний переріз

Рівняння рівноваги зовнішніх і внутрішніх сил на вісь $x(1)$:

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

Площу A_c знайдемо як цілу із простих складових фігур, на які розбиваємо стиснуту зону (рис. 2).

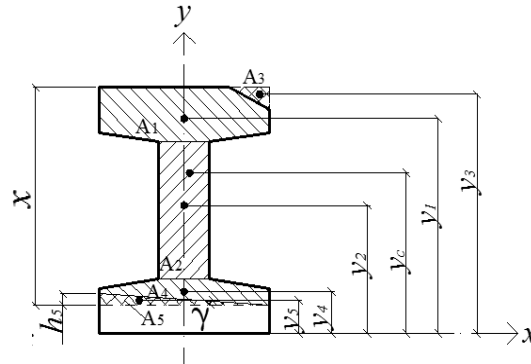


Рис. 2. До визначення A_c та y_c

$$A_c = A_1 + A_2 - A_3 + A_4 - A_5, \quad (2)$$

де:

$$A_1 = b_f' \cdot h_f'; \quad (3)$$

$$A_2 = b \cdot h_2; \quad (4)$$

$$A_3 = \frac{1}{2} b_1 \cdot h_1; \quad (5)$$

$$A_4 = b_f' \cdot (x - h_f' - h_2); \quad (6)$$

$$A_5 = \frac{1}{2} b_f'^2 \cdot \operatorname{tg} \gamma. \quad (7)$$

Підставимо (3)...(7) в (2):

$$A_c = b_f' \cdot h_f' + b \cdot h_2 - \frac{1}{2} b_1 \cdot h_1 + b_f' \cdot (x - h_f' - h_2) - \frac{1}{2} b_f'^2 \cdot \operatorname{tg} \gamma. \quad (8)$$

Запишемо рівняння суми моментів сил відносно вісі x , що проходить по зовнішній грані перерізу (рис. 2):

$$N \cdot e - f_{cd} \cdot A_c \cdot y_c - \sum_{i=1}^n \sigma_{s1-s2} \cdot A_{s1-s2} \cdot \left(h - a' - \frac{d}{2} \right) + \sum_{i=1}^n \sigma_{s3-s4} \cdot A_{s3-s4} \cdot \left(a' + \frac{d}{2} \right) = 0. \quad (9)$$

Координату y_c визначимо як сукупну координату складної фігури (рис. 2).

Площі визначені (3)...(7), запишемо координати y_i .

$$y_c = \frac{A_1 \cdot y_1 + A_2 \cdot y_2 - A_3 \cdot y_3 + A_4 \cdot y_4 - A_5 \cdot y_5}{A_1 + A_2 - A_3 + A_4 - A_5}; \quad (10)$$

$$y_1 = h - \frac{h_f'}{2}; \quad (11)$$

$$y_2 = \frac{h}{2}; \quad (12)$$

$$y_3 = h - \frac{h_1}{3}; \quad (13)$$

$$y_4 = h - x + \frac{(x - h_f' - h_2)}{2}; \quad (14)$$

$$y_5 = h - x + \frac{1}{3} \cdot b_f' \cdot \operatorname{tg} \gamma. \quad (15)$$

Підставимо (3)...(7) та (11)...(15), у вираз (10):

$$y_c = \frac{h'_f \cdot b'_f \left(h - \frac{h'_f}{2} \right) + b \cdot h_2 \cdot \frac{h}{2} - \frac{1}{2} \cdot b_1 \cdot h_1 \left(h - \frac{h_1}{3} \right) + b'_f \cdot (x - h'_f - h_2) \left(h - x + \frac{(x - h'_f - h_2)}{2} \right) - \frac{1}{2} b'_f{}^2 \cdot \text{tg}\gamma \left(h - x + \frac{1}{3} b'_f \cdot \text{tg}\gamma \right)}{0 b'_f \cdot h'_f + b \cdot h_2 - \frac{1}{2} b_1 \cdot h_1 + b'_f \cdot (x - h'_f - h_2) - \frac{1}{2} b'_f{}^2 \cdot \text{tg}\gamma} \quad (16)$$

Визначимо координату x_c простих складових фігур (рис. 2):

$$x_c = \frac{A_1 \cdot x_1 + A_2 \cdot x_2 - A_3 \cdot x_3 + A_4 \cdot x_4 - A_5 \cdot x_5}{A_1 + A_2 - A_3 + A_4 - A_5} \quad (17)$$

Площі фігур визначені (3)...(7).

$$x_1 = \frac{b'_f}{2}; \quad (18)$$

$$x_2 = \frac{b'_f}{2}; \quad (19)$$

$$x_3 = b'_f - \frac{b_1}{3}; \quad (20)$$

$$x_4 = \frac{b'_f}{2}; \quad (21)$$

$$x_5 = \frac{b'_f}{3}. \quad (22)$$

Підставимо (3)...(7) та (18)...(22) у вираз (17):

$$x_c = \frac{b'_f \cdot h'_f \cdot \frac{b'_f}{2} + b \cdot h_2 \cdot \frac{b'_f}{2} - \frac{1}{2} b_1 \cdot h_1 \cdot \left(b'_f - \frac{b_1}{3} \right) + b'_f \cdot (x - h'_f - h_2) \cdot \frac{b'_f}{2} - \frac{1}{2} b'_f{}^2 \cdot \text{tg}\gamma \cdot \frac{b'_f}{3}}{b'_f \cdot h'_f + b \cdot h_2 - \frac{1}{2} b_1 \cdot h_1 + b'_f \cdot (x - h'_f - h_2) - \frac{1}{2} b'_f{}^2 \cdot \text{tg}\gamma}; \quad (23)$$

Формули (16) та (23) описують положення центру мас стиснутої зони бетону. Через цю координату проведемо головні осі $x_1 y_1$ стиснутої зони бетону (рис. 3). Права і ліва частина фігури відносно осі y_1 повинна бути у рівновазі.

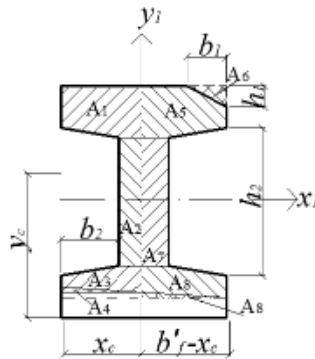


Рис. 3. До визначення статичного моменту S_y відносно головних осей $y_1 x_1$

$$S_{y_1} = A_1 \cdot x_1 + A_2 \cdot x_2 + A_3 \cdot x_3 - A_4 \cdot x_4 - A_5 \cdot x_5 + A_6 \cdot x_6 - A_7 \cdot x_7 - A_8 \cdot x_8 + A_9 \cdot x_9 = 0. \quad (24)$$

Визначимо площі складових фігур та їх координати:

$$A_1 = h'_f \cdot x_c; \quad (25)$$

$$A_2 = h_2 \cdot (x_c - b_2); \quad (26)$$

$$A_3 = x_c \cdot \left(x - h'_f - h_2 - (b'_f - x_c) \cdot \text{tg}\gamma \right); \quad (27)$$

$$A_4 = \frac{1}{2} \cdot x_c^2 \cdot \text{tg}\gamma; \quad (28)$$

$$A_5 = (b'_f - x_c) \cdot h'_f; \quad (29)$$

$$A_6 = \frac{1}{2} \cdot b_1 \cdot h_1; \quad (30)$$

$$A_7 = (b'_f - x_c - b_2) \cdot h_2; \quad (31)$$

$$A_8 = (b'_f - x_c) \cdot (x - h'_f - h_2); \quad (32)$$

$$A_9 = \frac{1}{2} \cdot (b'_f - x_c)^2 \cdot \text{tg}\gamma; \quad (33)$$

$$x_1 = \frac{x_c}{2}; \quad (34)$$

$$x_2 = \frac{x_c - b_2}{2}; \quad (35)$$

$$x_3 = \frac{x_c}{2}; \quad (36)$$

$$x_4 = \frac{2}{3} \cdot x_c; \quad (37)$$

$$x_5 = \frac{b'_f - x_c}{2}; \quad (38)$$

$$x_6 = b'_f - x_c - \frac{1}{3} b_1; \quad (39)$$

$$x_7 = \frac{b'_f - x_c - b_2}{2}; \quad (40)$$

$$x_8 = \frac{b'_f - x_c}{2}; \quad (41)$$

$$x_9 = \frac{b'_f - x_c}{3}. \quad (42)$$

Підставимо (25)...(42) у (24):

$$\begin{aligned} S_y = & h'_f \cdot x_c \cdot \frac{x_c}{2} + h_2 \cdot (x_c - b_2) \cdot \frac{x_c - b_2}{2} + x_c \cdot (x - h'_f - h_2 - (b'_f - x_c) \cdot \\ & \text{tg}\gamma) \cdot \frac{x_c}{2} - \frac{1}{2} \cdot x_c^2 \cdot \text{tg}\gamma \cdot \frac{2}{3} \cdot x_c - (b'_f - x_c) \cdot h'_f \cdot \frac{b'_f - x_c}{2} + \frac{1}{2} \cdot b_1 \cdot h_1 \cdot (b'_f - x_c - \\ & \frac{1}{3} b_1) - -(b'_f - x_c - b_2) \cdot h_2 \cdot \frac{b'_f - x_c - b_2}{2} - (b'_f - x_c) \cdot (x - h'_f - h_2) \cdot \frac{b'_f - x_c}{2} + \frac{1}{2} \cdot \\ & (b'_f - x_c)^2 \cdot \text{tg}\gamma \cdot \frac{b'_f - x_c}{3} = 0; \quad (43) \end{aligned}$$

Де x_c виражено формулою (23).

Аналізуємо отримані корені: $N > 0, x > 0, x \geq h_2 + h_3$. Якщо корені не задовольняють цим вимогам, то необхідно зробити перерахунок задачі, змінивши при цьому форму стиснутої зони бетону.

Статистична обробка відхилень експериментальних значень залишкової несучої здатності пошкоджених елементів до несучої здатності, визначеної за методикою, що пропонується, дає достатньо точний (коефіцієнт варіації відхилення 0,125) результат розрахунку, тобто, при виконанні простого алгоритму дій можливо отримати руйнуючі зусилля для прийняття подальших рішень щодо пошкодженого елемента.

Висновки. 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 та методу підсилення. Прийнятті 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, що дає основу для рекомендації методу розрахунку для практичного використання.

1. Клименко Є. В. Технічна експлуатація і реконструкція будівель та споруд / Є. В. Клименко // Центр учбової літератури. – К., 2004 р. – 304 с.

Klymenko Ye. V. Tekhnichnaekspluatatsiiairekonstruktsiabudivel ta sporud / Ye. V. Klymenko // Tsentruchovoiliteratury. – К., 2004 r. – 304 s.

2. Клименко Є. В. Технічний стан будівель та споруд: монографія / Є. В. Клименко – Одеса: ОДАБА, 2010 р. – 284 с.

Klymenko Ye. V. Tekhnichni stan budivel ta sporud: monohrafiia / Ye. V. Klymenko – Odessa: ODAVA, 2010 r. – 284 s.

3. 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.

DSTU-N B V.1.2-18:2016. Nastanova shchodo obstezhennia budivel i sporud dlia vyznachennia ta otsinky yikh tekhnichnoho stanu. – К., 2017, – 45 s.

4. ДБН В.2.6-98:2009. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення / Мінрегіонбуд України, – 2011 р.

DBN V.2.6-98:2009. Konstruktsii budynkiv i sporud. Betonni ta zalizobetonni konstruktsii. Osnovni polozhennia / Minrehionbud Ukrainy, – 2011 r.

5. Krainskyi P., Blikharskyu Y., Khmil R., Blikharskyu Z. Experimentalstudyofthestrengtheningeffectofreinforcedconcretecolumnsjacketedunderserviceloadlevel. MATECWebofConferences. 183. 02008. 10.1051/matecconf/201818302008.

6. Клименко Е. В., Мустафа Г. М. Поврежденныебетонныежатыеконструкции: работа, расчет: Монография – Одесса: Одесскийнац. ун-т им. И. И. Мечникова, 2014. – 169 с.

KlymenkoE. V., MustafaH. M. Povrezhdennyebetonnyeszhatyekonstruktsyy: rabota, raschet: Monohrafiya – Odessa: Odesskuyunats. un-tym. Y. Y. Mechnykova, 2014. – 169 s.

7. Клименко Е.В. Расчетповрежденныхжелезобетонныхколонн // Е.В. Клименко, Т.А. Дуденко / Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. Зб. наук. праць / Національний університет водного господарства та природокористування. – Рівне, 2013. – Вип.27. –С. 448-453.

KlymenkoE.V. Raschetpovrezhdennykhzhelezobetonnyhkolonn // E.V. Klymenko, T.A. Dudenko / Resursoekonomniamaterialy, konstruktsiyi, budivlitasporudy. Zb. nauk.prats' / Natsional'nyyuniversyetyvodnohospodarstvatarpyrodokorystuvannya. – Rivne, 2013. – Vyp.27. –S. 448-453.

8. Клименко Е. В., Крутько Т. А. Работа поврежденных железобетонных колонн: Монография Одеса: Одеська держ. академія буд. та архітектури, 2014. – 137 с.

KlymenkoE. V., Krut'koT. A. Rabotapovrezhdennykhzhelezobetonnyhkolonn: MonohrafiyaOdessa: Odes'kaderzh. akademiyaбуд. taarkhitektury, 2014. – 137 s.

9. Klymenko E. V., Structuralreliabilityandevaluationofcurrentstateofconstruction / Є.В. Клименко, М. Орешкович, В. Задревич, Ж. Кос // Tehničkiglasnik. Technicaljournal /

Znanstveno-stručničasopisSveučilištaSyever.

ScientificprofessionalyournalofUniversityNort. – Varaždin, 2015. –№ 4, pp. 426-431.

10. KlymenkoYevhenii, MاتيyaOrešcovic Damagedcircularcolumns: researchandcalculation: Monograf – UniversityNord, Korpivnica/VaraždinandOdessastateacademyofcivilengineeringandarchitecture. – S. 169.

11. Klymenko Y. Damagedreinforcedconcretecolumnsofvariousflexibility: researchandcalculation. Monograph / Y. Klymenko, Z. Kos, I. Grynyova, A. Crnoja // Varaždin, Croatia, 2020. 179 p.

12. KlymenkoYe. OperationofDamager H-ShapedColumns / Ye. Klymenko, Z. Kos, I. Grynyova, O. Maksuta // SpringerNatureSwitzerlandAG 2021, Z. Blikcharsky (Ed.): EcoComfort 2020, LNCE 100, pp. 192–201, 2021. https://doi.org/10.1007/978-3-030-57340-9_24.

13.Торяник М. С. Косоевнецентренноежатие и косоизгиб в железобетоне / М. С. Торьяник // – Киев: Госстройиздат, – 1961, – 156 с.

Toryanik M. S. Kosoyevnetsentrennoyeszhatiyekosoyizgib v zhelezobetone / M. S. Toryanik // – Kiyev: Gosstroyizdat, – 1961, – 156 s.

14.Торяник М. С. Расчетжелезобетонныхконструкций при сложныхдеформациях / М. С. Торьяник, П. Ф. Вахненко, Л. В. Фалеев и др. // – М.: Стройиздат, 1974. – 297 с.

ToryanikM. S. Raschetzhelezobetonnykhkonstruktsiyprislozhnykhdeformatsiyakh / M. S. Toryanik, P. F. Vakhnenko, L. V. Faleyevidr. // – М.: Stroyizdat, 1974. – 297 s.