

УДК 624.012.36

РОЗРАХУНОК НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ ІЗ ПОДВІЙНИМ АРМУВАННЯМ ПРИ ЗГІНІ З КРУЧЕННЯМ НА ОСНОВІ ДЕФОРМАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ

Клюка О. М., асп.

**Кременчуцький державний політехнічний університет
імені Михайла Остроградського**

м. Кременчук Полтавської обл., вул. Першотравнева, 20, 39614

E-mail: kkad@polytech.poltava.ua

Роговий С.І., д. т. н., проф.

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка

м. Полтава, вул. Бібліотечна, 4а, 36027

E-mail: i_rogovoy@rambler.ru

На основании уточненных расчетных предпосылок и деформационной модели представлена методика расчета несущей способности железобетонных элементов с двойным армированием.

Ключевые слова: расчетная схема, кручение, деформационная модель, несущая способность.

Bearing ability of concrete elements with double reinforcement calculation principles are represented in this article based on specified calculated suppositions and deformation model.

Key words: loading diagram, torsion, deformation model, bearing ability.

Вступ. У процесі проектування та будівництва промислових об'єктів часто зустрічаються елементи залізобетонних конструкцій різних поперечних перерізів (прямокутник, тавр, двотавр, Г-подібний, кільцевий і ін.), які, у випадку неминучих ексцентриситетів зовнішніх навантажень та внутрішніх зусиль відносно центру кручення, в тій чи іншій мірі піддаються стисненому крученню. Залежно від схеми дії зовнішнього навантаження їх часто приходиться виконувати з подвійною поздовжньою робочою арматурою.

Аналіз попередніх досліджень. У перших експериментальних дослідженнях роботи залізобетонних елементів прямокутного перерізу при згині з крученням [1, 2] визначено можливі схеми їх руйнування залежно від співвідношення силових чинників, розмірів поперечного перерізу та поздовжнього і поперечного армування. Запропоновані три можливі просторові схеми руйнування такого перерізу, коли стиснута від згину зона бетону знаходиться біля верхньої, бокової чи нижньої грані перерізу, по лінії, яка з'єднує кінці похилих тріщин руйнування, що розвиваються на інших трьох гранях елемента. При визначенні несучої здатності просторового перерізу враховувалась поздовжня робоча арматура і одна гілка поперечної арматури, а саме та, яка знаходилась біля грані, найвіддаленішої від стиснутої зони бетону. Ці пропозиції в свій час лягли в основу рекомендацій діючих норм [3] стосовно розрахунку несучої здатності таких елементів.

Автори подальших експериментально-теоретичних досліджень, як звичайних, так і попередньо напружених залізобетонних елементів при

плоскому [4, 5] та косому згині з крученням [6, 7], піддали серйозній критиці рекомендації попередніх дослідників [1, 2, 8] і діючих норм [3] стосовно схеми розташування стиснутої від згину зони бетону. При ускладненні форми поперечного перерізу (тавр, двотавр), за умови рівності всіх інших параметрів (крутний і згинаючий моменти, міцнісні та кількісні характеристики бетону й арматури), кут нахилу стиснутої від згину зони бетону α до поздовжньої вісі елемента буде зменшуватись, що протирічить суті фізичного явища. Необгрунтованим є також ігнорування наявності трьох інших гілок поперечної арматури, які разом із четвертою гілкою сприймають крутний момент. На підставі цього автори робіт [4-7, 9-11] для визначення кута α запропонували гіперболічну залежність

$$a = \arctg\left(1 + \frac{1}{5h}\right), \quad (1)$$

за якою цей кут може змінюватися в межах від 45° (чисте кручення) до 90° (плоский згин), що чітко відповідає фізичному явищу сумісної дії крутного і згинаючого моментів.

Мета роботи. Розробка методики розрахунку несучої здатності залізобетонних елементів прямокутного поперечного перерізу з подвійним армуванням при згині з крученням на основі деформаційної моделі.

Матеріали і результати дослідження. У пропозиціях авторів робіт [1, 2, 4-8] і в рекомендаціях діючих норм [3] фактично ігнорується використання повної діаграми деформування бетону. Однак, у виконаних останнім часом дослідженнях [12-15] і ін.

звертається особлива увага на доцільність і необхідність переходу розрахунку міцності залізобетонних елементів на основі деформаційної моделі, в основу якої покладена науково обґрунтована концепція визначення критичних деформацій бетону в граничному стані. Незважаючи на те, що у вітчизняних і зарубіжних наукових джерелах накопичені широкі відомості з використання повної діаграми деформування бетону, в офіційних нормах [3] про неї відсутні будь-які рекомендації. В той же час, в нормах проектування Англії [16], Німеччини [17], США [18], Франції [19], Росії [20], в міжнародних нормах [21] повні діаграми деформування вже сьогодні знаходять практичне використання. Тут допускається можливість застосування принципово нових методів розрахунку, що ґрунтуються на використанні деформаційної розрахункової моделі, яка дозволяє враховувати характер роботи поперечного перерізу, близький до реального. В проекті українських норм [22] також наголошується, що розрахунок бетонних і залізобетонних елементів за несучою здатністю необхідно виконувати за нелінійною деформаційною моделлю.

У роботі [9] викладені та обґрунтовані основні передумови методики розрахунку міцності нормальних перерізів елементів залізобетонних конструкцій прямокутного перерізу, що зазнають згину з крученням, на основі нелінійної деформаційної моделі. Ця методика розрахунку базується на розрахунковій схемі, в якій криволінійна епюра напружень стиснутого бетону висотою z_f замінюється прямокутною епюрою з умовною висотою $z \leq z_f \leq z_{fR}$, де z_{fR} – гранична висота стиснутої частини перерізу, і рівномірно розподіленими напруженнями в бетоні R_b . Крім цього, в роботі [15] запропоновані наступні додаткові передумови:

- реалізація нелінійної деформаційної моделі розрахунку здійснюється на основі трансформованих діаграм деформації бетону, які перетворюють у вирішувану систему рівнянь рівноваги для граничного стану, а також установлюють межу стійкої деформації в умовах висхідної або низхідної гілки діаграми стану бетону;

- критичні деформації стиснутого бетону в граничному стані оцінюються ітераційним способом із залученням належним чином обраного рівняння рівноваги зовнішніх і внутрішніх сил, що діють в нормальному перетині, як такі, при яких досягається гранична міцність перетину;

- передбачається можливість перенесення діаграм $\sigma_b - \varepsilon_b$ (напруження-деформації), одержаних при однорідному стисканні бетонних призм, на стиснуту зону неоднорідно деформованого перерізу при згині з крученням;

- уточнюються і одержують подальший розвиток розрахункові передумови, прийняті в існуючих розрахункових моделях: зокрема, передбачається враховувати можливість неодновременного досягнення граничних зусиль у спільно працюючому стиснутому бетоні й арматурі, а також – диференційовано

оцінювати їх розрахункові опори залежно від критичних деформацій бетону в граничному стані;

- використовуються відомі гіпотези: поперечні перерізи, плоскі до завантаження, залишаються такими і після нього; бетон і арматура деформуються спільно;

- розрахунок міцності за нормальними перерізами залізобетонних конструкцій здійснюється шляхом розв'язання системи рівнянь рівноваги і перевірки умов міцності:

$$e_{b,max} \leq e_{b,u}, \quad (2)$$

$$e_{s,max} \leq e_{s,u}, \quad (3)$$

де $\varepsilon_{b,max}$, $\varepsilon_{s,max}$ – максимальні відносні деформації в стиснутому бетоні і розтягнутій арматурі від дії зовнішнього навантаження, які приймаються у процесі ітераційного пошуку; e_{bu} , e_{su} – критичні деформації стиснутого бетону і розтягнутої арматури в граничному стані.

Виходячи з викладеного вище, розрахунок міцності нормальних перерізів із подвійною арматурою (рис.1) пропонується вести в такій послідовності.

Рівнодіючу в стиснутому бетоні при прямокутній епюрі напружень визначають за скорегованою для згину з крученням формулою (28) [23]

$$N_b = R_b \cdot b / \sin a \cdot h_o \cdot x_R, \quad (4)$$

де x_R – відносна гранична висота вкороченої стиснутої зони z , що обчислюється за формулою (29) [23]

$$x_R = x_{fR} [L_1 / e'_{bu} + (D_o + D_1 \cdot e'_{bu} / 2 + D_2 \cdot (e'_{bu})^2 / 3) - L_2 / e'_{bu}] / R_b. \quad (5)$$

У цій формулі x_{fR} – відносна гранична висота стиснутого перерізу – підраховується за формулою (4.12) [14]

$$x_{fR} = e'_{bu} / (e_{su} + e'_{bu}), \quad (6)$$

де e'_{bu} – гранична крайова деформація бетону, яка знаходиться в процесі ітераційного пошуку як значення, при якому згинаючий момент M_R , що сприймається стиснутим бетоном, досягає максимального значення;

$e_{su} = R_s / E_s$ – гранична відносна деформація розтягнутої арматури.

Значення L_i обчислюються за формулами (3.6), (3.7) [14]:

$$L_1 = C_1 \cdot e_{bR}^2 / 2 + C_2 \cdot e_{bR}^3 / 3 + C_3 \cdot e_{bR}^4 / 4; \quad (7)$$

$$L_2 = D_o \cdot e_{bR} + D_1 \cdot e_{bR}^2 / 2 + D_2 \cdot e_{bR}^3 / 3. \quad (8)$$

Зазначені в цих залежностях сплайн-функції C_i знаходяться відповідно залежностям (1.9)–(1.11) [14]:

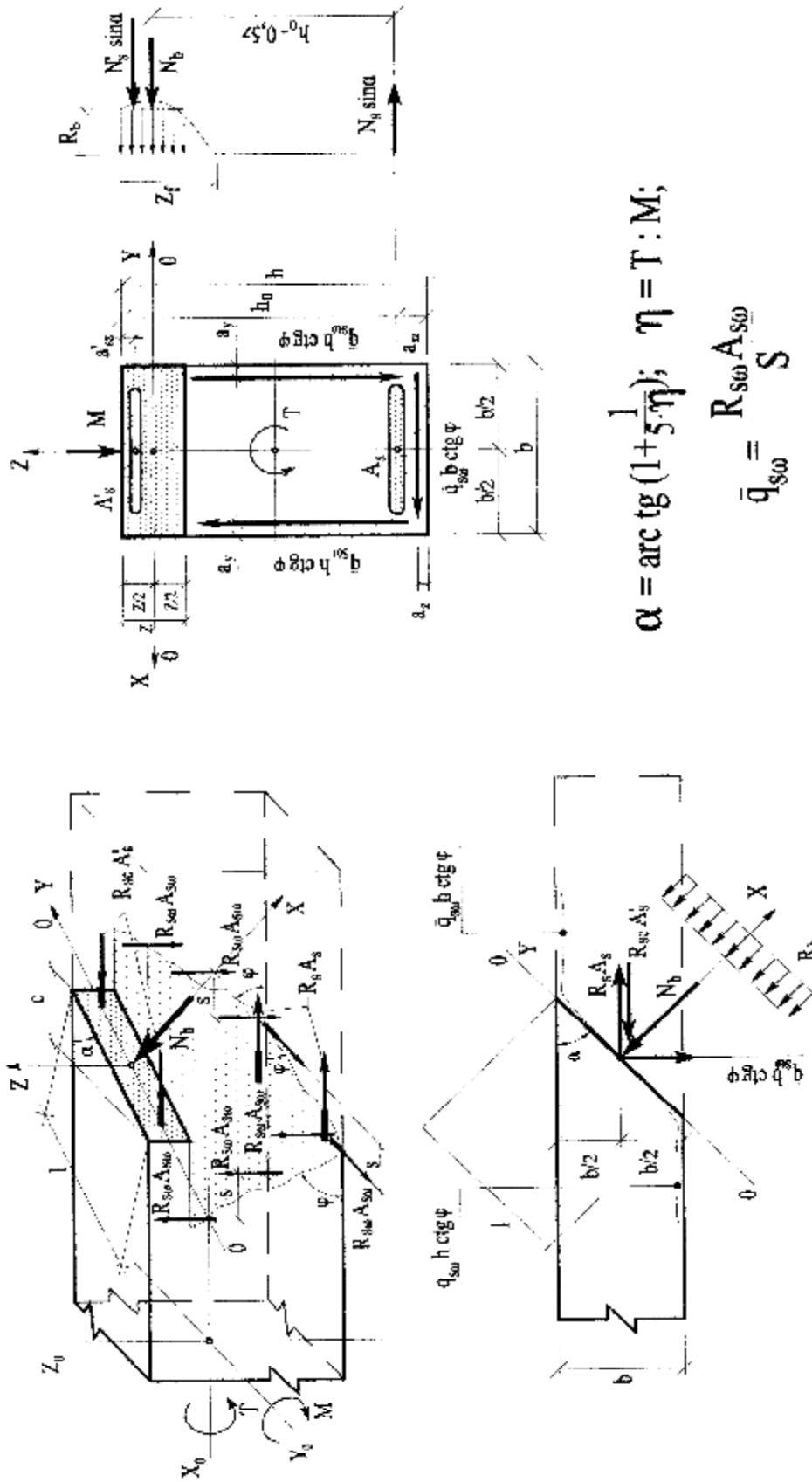


Рисунок 1 – Розрахункова схема для визначення несучої здатності звичайно армованого залізобетонного елемента прямокутного перерізу з подвійною арматурою при згині з крученням за спрощеною деформаційною моделлю

$$C_1 = E_b; \quad (9)$$

$$C_2 = (3R_b - 2E_b \cdot e_{bR}) / e_{bR}^2; \quad (10)$$

$$C_3 = (E_b \cdot e_{bR} - 2R_b) / e_{bR}^3. \quad (11)$$

Параметри D_i визначаються за формулами (1.12)– (1.14) [14]:

$$D_o = R_b(a_R \cdot e_{bR}^2 - 2e_{bR} \cdot e'_{bu} + (e'_{bu})^2) / (e_{bR} - e'_{bu})^2; \quad (12)$$

$$D_1 = 2R_b(1 - a_R) \cdot e_{bR} / (e_{bR} - e'_{bu})^2; \quad (13)$$

$$D_2 = R_b(a_R - 1) / (e_{bR} - e'_{bu})^2. \quad (14)$$

Наведений тут параметр a_R визначається за співвідношенням (12) [23]:

$$a_R = R_b / R_{bu}, \quad (15)$$

де R_{bu} – залишкова міцність бетону, що знаходиться, згідно з рекомендаціями [21], за формулою:

$$R_{bu} = (k \cdot n - n^2) \cdot R_b / (1 + (k - 2) \cdot n). \quad (16)$$

Використані в цій формулі параметри n і k визначаються за формулами (14) і (15) [15]:

$$n = e'_{bu} / e_{bR}; \quad (17)$$

$$k = E_b \cdot e_{bR} / R_b. \quad (18)$$

В цих залежностях e_{bR} – критична деформація бетону у вершині повної діаграми деформування, визначається за залежністю (2) [12].

Висоту стиснутої від згину зони бетону визначають із умови граничної рівноваги:

$$\sum X = (R_s \cdot A_s - R_{sc} \cdot A'_s) \cdot \sin a + \bar{q}_{sw} \cdot b \cdot \text{ctgj} \cdot \cos a - R_b \cdot \frac{b \cdot z}{\sin a} = 0, \quad (19)$$

звідки

$$z = \frac{(N_s - N'_s) \cdot \sin^2 a}{R_b \cdot b} + \frac{0,5 N_{swb} \cdot \sin 2a}{R_b \cdot b}. \quad (20)$$

У цій формулі

$$N_s = R_s \cdot A_s, \quad (21)$$

$$N'_s = R_{sc} \cdot A'_s, \quad (22)$$

$$N_{swb} = \bar{q}_{sw} \cdot b \cdot \text{ctgj}, \quad (23)$$

$$\bar{q}_{sw} = \frac{R_{sw} \cdot A_{sw}}{S}. \quad (24)$$

Після цього визначають відносну висоту стиснутої зони бетону:

$$x = \frac{z}{h_o} \leq x_R, \quad (25)$$

де x_R – гранична відносна висота стиснутої зони бетону, визначається за таблицею 1 [23].

Якщо умова (25) виконується, то з умови граничної рівноваги $SM_{o-o}=0$, яка має наступний вигляд:

$$\begin{aligned} M \cdot \sin a + T \cdot \cos a = & \\ = R_s \cdot A_s \cdot \sin a \cdot (h_o - 0,5z) + & \\ + R_{sc} \cdot A'_s \cdot \sin a \cdot (0,5z - a'_{sz}) + & \\ + \bar{q}_{sw} \cdot b \cdot \text{ctgj} \cdot \cos a \cdot (h - & \\ - a_z - 0,5z) + \bar{q}_{sw} \cdot h \cdot \text{ctgj} \cdot & \\ \cdot [(h+b) \cdot \text{ctgj} - b \cdot \text{ctga}] \cdot \sin a, & \end{aligned} \quad (26)$$

визначають несучу здатність поперечного перерізу елемента за формулою:

$$M = \frac{M_s + M_{swb} \cdot \text{ctga} + M_{swh}}{1 + h \cdot \text{ctga}}, \quad (27)$$

в якій

$$M_s = N_s \cdot z_s, \quad (28)$$

$$M'_s = N'_s \cdot z'_s, \quad (29)$$

$$z_s = h_o - 0,5z, \quad (30)$$

$$z'_s = 0,5z - a'_{sz}, \quad (31)$$

$$M_{swb} = N_{swb} \cdot z_{swb}, \quad (32)$$

$$z_{swb} = h - a_z - 0,5z, \quad (33)$$

$$M_{swh} = N_{swh} \cdot z_{swh}, \quad (34)$$

$$N_{swh} = \bar{q}_{sw} \cdot h \cdot \text{ctgj}, \quad (35)$$

$$z_{swh} = (h+b) \cdot \text{ctgj} - b \cdot \text{ctga}. \quad (36)$$

У цих формулах співвідношення крутного і згинаючого моментів визначається за залежністю $\eta = T / M$, (37)

а кут нахилу похилих тріщин руйнування до поздовжньої вісі елемента φ за експериментальними даними, складає 45° .

Якщо умова (25) не виконується, то приймають $x = x_R$, і розрахунок продовжують за вище наведеною методикою.

Висновки. 1. У даній роботі запропонована методика визначення теоретичної несучої здатності нормальних перерізів звичайно армованих залізобетонних елементів прямокутного поперечного перерізу з одиночним та подвійним армуванням при згині з крученням на основі деформаційної моделі.

2. Співставлення експериментальних та теоретичних значень руйнуючих зусиль дає кращі результати порівняно з нормативною методикою [3],

що дозволяє рекомендувати розроблену методику для практичного використання.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лессиг Н. Н. Теоретические и экспериментальные исследования железобетонных балок при совместном действии изгиба и кручения. «Теория расчета и конструирования железобетонных конструкций». НТО строительной промышленности, Москва, 1958.

2. Лессиг Н. Н. Определение несущей способности железобетонных элементов прямоугольного сечения, работающих на изгиб с кручением. «Исследование прочности железобетонных конструкций», НИИЖБ, выпуск 5, Москва, 1959.

3. СНиП 2.03.01-84*. Бетонные и железобетонные конструкции. — М., 1986. — 79 стр.

4. Жорняк М. С. До розрахунку попередньо напружених залізобетонних елементів прямокутного перетину з одиночною арматурою при згині з крученням//Сборник научных трудов «Проблемы создания новых машин и технологий», выпуск 2. — Кременчуг: КГПУ, 1999(7)- С.401-404.

5. Жорняк М. С. Розрахунок звичайно армованих залізобетонних елементів прямокутного перетину з одиночною арматурою при згині з крученням//Сборник научных трудов «Проблемы создания новых машин и технологий», выпуск 2. — Кременчуг: КГПУ, 1999(9)- С.487-490.

6. Жорняк Н. С. Экспериментально-теоретические исследования несущей способности предварительно напряженных железобетонных элементов таврового и двутаврового поперечных сечений на косоугольный изгиб с кручением: Диссер. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. — Полтава, 1973. — 170с.

7. Кузьменко А. М. Экспериментально-теоретические исследования предварительно напряженных железобетонных элементов прямоугольного сечения при косоугольном изгибе с кручением. Диссер. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. — Полтава, 1972. — 230с.

8. Фалеев Л. В. Экспериментально-теоретические исследования несущей способности железобетонных балок прямоугольного и таврового сечений, работающих на косоугольный изгиб с кручением. Диссер. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. — Полтава, 1968. — 301с.

9. Жорняк М. С., Клюка О. М. Основні передумови методу розрахунку міцності нормальних перерізів залізобетонних конструкцій прямокутного поперечного перерізу, що зазнають згину з крученням, на основі нелінійної деформаційної моделі // Ресурсо-економічні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. — Рівне, 2007. — Вип.15. — С.161-167.

10. Жорняк М. С., Клюка О. М., Роговий С.І.

11. Розрахунок несучої здатності залізобетонних елементів при згині з крученням на основі деформаційної моделі//Будівельні конструкції. — К., 2007. — Вип.67.

12. Клюка О. М. До визначення розташування стиснутої зони бетону в залізобетонних елементах при сумісній дії крутного та згинаючого моментів//Науковий вісник будівництва. — Х.: ХДТУБА, ХДТВ АБУ, 2006. — № 37. — С.65-70.

13. Бамбура А. М., Гурковский А. Б. К построению деформационной теории железобетона стержневых систем на экспериментальной основе // Будівельні конструкції – К.: Будівельник, 2003. – Вип. 59. – С. 121-130.

14. Звездов А. И., Залесов А. С., Мухамедиев Т. А., Чистяков Е. А. Расчет прочности железобетонных конструкций при действии изгибающих моментов и продольных сил по новым нормативным документам // Бетон и железобетон. – 2002. — № 2. — С.21-25.

15. Роговой С. И. Нелинейное деформирование в теории железобетона и расчет прочности нормальных сечений. – Полтава: ПолтНТУ 2002. — 183 стр.

16. Роговий С.І. Методологія оцінки міцності нормальних перерізів бетонних і залізобетонних конструкцій на основі деформаційної розрахункової моделі. Дисертація на здобуття вченого ступеня доктора технічних наук, Полтава, 2005, 371 с.

17. BS 8110: Part 1. British Standard. Structural use of Concrete. Code of Practice for design and Construction. London: British Standard Institution. 1985. — 210 pp.

18. DIN 1045. Beton und Stahlbeton. Bemessung und Ausführung, Berlin, 1997. – 143 s.

19. ASI 318 M – 95. Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary. ASI, 1996. – 369 p.

20. В. А. Е. Л. – 91. Du Béton armé aux états limites. Paris, 1992. – 320 pp.

21. СП 52-101-03. Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения арматуры. — М.: Госстрой России, 2003. — С. 125.

22. CEB – FIP MODEL CODE 1990. DESIGN CODE.

23. ДБН...2005. Бетонні та залізобетонні конструкції (проект). Загальні положення. — К.: Держбуд України, 2005. — С.47-52.

24. Роговий С.І. Посібник із розрахунку міцності нормальних перерізів елементів залізобетонних конструкцій на основі деформаційної розрахункової моделі. – Полтава: ПолтНТУ 2004. — 42 с.

Стаття надійшла 1.10.2007

Рекомендовано к печати д. т. н., проф.

Шмандієм В. М.