

УДК 624.012.35:620.173/174

ОСНОВИ МОДЕЛЮВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОГО РЕСУРСУ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ І КОНСТРУКЦІЙ

Старш. викл. О. В. Ромашко-Майструк

BASICS OF ENERGY RESOURCE MODELING OF REINFORCED CONCRETE ELEMENTS AND STRUCTURES

Sr. Lecturer O. V. Romashko-Maistruk

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.191.2020.217292>

Анотація. Завдяки критичному аналізу існуючих на сьогодні моделей деформування залізобетонних елементів і конструкцій розроблено найважливіші положення моделі, яка могла б претендувати на роль узагальненої. В її основу покладено деформаційно-силову модель опору залізобетону силовим впливам та гіпотезу незмінності в одиниці об'єму і незалежності від режиму завантаження потенціальної енергії деформування залізобетонного елемента. Водночас цю гіпотезу подано як енергетичний критерій вичерпання несучої здатності залізобетонних елементів за дії навантажень будь-якої тривалості, що дозволяє розраховувати загальний та залишковий ресурси зазначених елементів за їх тривалої експлуатації.

Ключові слова: залізобетонні елементи, деформування, діаграми стану, енергетична модель, загальний та залишковий ресурси.

Abstract. Thanks to a critical analysis of the currently known force and deformation models of reinforced concrete elements and structures deformation, the most important model provisions have been developed, which could claim to be a generalized one. It is proposed to base it on the deformation-force model of reinforced concrete to force effects resistance and the hypothesis of invariability in a unit volume and independence from the loading mode of the potential energy of a reinforced concrete element deformation. At the same time, the indicated hypothesis is accepted as an energy criterion for the reinforced concrete elements bearing strength exhaustion, which makes it possible to calculate the total and residual resources of these elements during their long-term operation.

The main deformation and power parameters of the element state are interconnected not only by rigidity, but also by the potential energy spent on the reinforced concrete element deformation in its unit volume. The direct connection of the potential energy of a reinforced concrete element deformation with the generalized diagram parameters of its state is determined. Therefore, instead of deterministic and variational methods for calculating the reinforced concrete elements resource, a direct calculation of their energy resource is proposed based on such deformation characteristics as deflection or the step and width of normal cracks opening. Based on the flat sections hypothesis, these characteristics are related to the element curvature. The proposed model and calculation method also take into account the entire array of field studies results on the totality of visually identified defects and damages and the established strength materials characteristics.

Calculated dependencies for determining the potential energy of a reinforced concrete element at any stage of its deformation are given. For one of the reinforced concrete beams, a theoretical prediction of long-term crack opening was performed and its results were compared with the experimental studies results.

Keywords: reinforced concrete elements, deformations, state diagrams, energy model, total and residual resources.

Вступ. Відтворення реального напружено-деформованого стану залізобетонних елементів і конструкцій на будь-якій стадії їх деформування завжди було одним із ключових завдань теорії залізобетону. Його виконання значною мірою пов'язується з розробленням або створенням деякої загальної моделі деформування залізобетонних елементів. Тому така модель мусила б:

- базуватись на загальних припущеннях, гіпотезах і передумовах механіки деформованого твердого тіла;
- бути наділеною чіткими критеріями настання граничних станів залізобетонних елементів і конструкцій за реальних умов їх експлуатації;
- сприяти розкриттю внутрішньої статичної невизначеності поперечного перерізу залізобетонних елементів та забезпечувати методологічну єдність усіх розрахунків за граничними станами;
- реалізовуватися за допомогою як програмних (переважно числових), так і інженерних (безпрограмних) методів розрахунку;
- бути максимально або повністю позбавленою впливу різних емпіричних залежностей, параметрів та коефіцієнтів;
- сприяти встановленню як загального, так і залишкового ресурсів залізобетонних елементів і конструкцій за їх тривалої експлуатації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відомо, що виконання більшості з вищезгаданих вимог в так званих «силових» моделях [1-3] було просто неможливим через використання ідеалізованої прямокутної епюри напружень як у стиснутому, так і розтягнутому бетоні.

В «деформаційних» моделях [4-8] методологічну єдність усіх розрахунків залізобетонних елементів і конструкцій за граничними станами загалом можна забезпечити за допомогою повних діаграм

деформування бетону $\sigma_c - \varepsilon_c$. Однак при їх інтегруванні чи навіть за використання спрощених форм цих діаграм [7, 8] внутрішню статичну невизначеність поперечного перерізу залізобетонних елементів доводиться розкривати шляхом численних ітерацій за допомогою програмних методів і комплексів з залученням цілої низки емпіричних параметрів і коефіцієнтів.

Найближчою до узагальненої моделі деформування залізобетонних елементів на сьогодні можна вважати деформаційно-силову модель [9]. Вона обґрунтовує, чому за допомогою лише самих діаграм стану бетону $\sigma_c - \varepsilon_c$, нехай навіть найповніших [10], узагальнену модель деформування залізобетонних елементів побудувати неможливо. Тому визначальне місце в деформаційно-силовій моделі займають не діаграми деформування бетону $\sigma_c - \varepsilon_c$, а діаграми стану залізобетонного елемента $M - 1/r$, що характеризують його жорсткість. Саме в цьому і полягає її основна відмінність від деформаційних моделей. Однак і деформаційно-силова модель потребує подальшого розвитку, особливо в питаннях оцінювання дійсного технічного стану залізобетонних елементів і конструкцій та розрахунку їх залишкового ресурсу.

Мета та завдання досліджень. Тому дані дослідження спрямовано, перш за все, на подальше вдосконалення деформаційно-силової моделі опору залізобетонних елементів і конструкцій силовим впливам в питаннях розрахунку їх загального та прогнозування залишкового ресурсів.

Основна частина досліджень. Загалом відомо, що в деформаційно-силовій моделі основні деформаційні та силові параметри стану елемента пов'язуються між собою за допомогою жорсткості $D = M/(1/r)$ [9, 11]. Але згадані параметри можна поєднати між собою і за

допомогою іншої характеристики – потенціальної енергії, витраченої на деформування залізобетонного елемента в його одиничному об’ємі $W = M \cdot (1/r)$ [12]. За таких обставин методика розрахунку загального ресурсу залізобетонних елементів можна будувати за допомогою тих самих параметрів натурних досліджень, що не опосередковано, а безпосередньо характеризують їх жорсткість.

Зазвичай залишковий ресурс залізобетонних елементів розраховують детермінованими або варіаційними методами [13-16] згідно з результатами натурних досліджень за сукупністю візуально виявлених дефектів і пошкоджень та встановлених міцнісних характеристик матеріалів. Будь-які ж деформаційні параметри самих елементів до уваги взагалі не беруться.

Однак саме прогини f або крок s_r і ширина розкриття w_k тріщин, значення яких можна виміряти безпосередньо при обстеженні будь-якими інструментальними способами (геодезичними, фотограмметричними, стереофотограмметричними тощо),

дозволяють доволі просто визначити один із загальних деформаційних параметрів залізобетонного елемента чи конструкції – їх кривину. Зокрема, використовуючи гіпотезу плоских перерізів, можна досить легко розрахувати осереднену кривину згинального елемента $1/r$ на будь-якій стадії його деформування за вимірним кроком s_r та шириною розкриття w_k нормальних тріщин [17]

$$1/r = (\varepsilon_{c,m} + w_k / s_r + \varepsilon_{ctu,m}) / d, \quad (1)$$

де $\varepsilon_{c,m}$ та $\varepsilon_{ctu,m}$ – середні значення поточних деформацій стиснутого та граничних деформацій розтягнутого бетону [18, 19] відповідно;

d – робоча висота перерізу елемента.

Загалом фактичний ресурс згинального залізобетонного елемента за короткочасної дії повного навантаження визначається потенціальною енергією деформування, витраченою на його руйнування (рис. 1):

$$\begin{aligned} W_{uf} &= \int_0^{1/r_{uf}} M d(1/r) = \int_0^{1/r_{uf}} \left[\left(D_o \cdot (1/r) - \frac{M_{uf}}{(1/r_{uf})^2} \cdot (1/r)^2 \right) / \left(1 + (K-2) \frac{(1/r)}{(1/r_{uf})} \right) \right] d(1/r) = \\ &= \frac{M_{uf} \cdot (1/r_{uf})}{(K-2)} \left[-\frac{1}{2} + \frac{(K-1)^2}{(K-2)} - \frac{(K-1)^2}{(K-2)} \ln(K-1) \right], \end{aligned} \quad (2)$$

де осереднена кривина елемента $1/r$ та внутрішні зусилля M пов’язані між собою діаграмою його стану [18]

$$M = \frac{D_o \cdot 1/r - M_{uf} \cdot ((1/r)/(1/r_{uf}))^2}{1 + (D_o / M_{uf} - 2/(1/r_{uf})) \cdot (1/r)} \quad (3)$$

зі значеннями повної початкової жорсткості залізобетонного елемента D_o та характеристикою його граничної деформативності $K = D_o \cdot (1/r)_{uf} / M_{uf}$.

Несучу здатність M_{uf} та граничну кривину $1/r_{uf}$ залізобетонного елемента за короткочасної дії повного навантаження рекомендується розраховувати згідно з основними положеннями механіки деформованого твердого тіла за системою найпростіших загальноновизнаних статичних, геометричних і фізичних співвідношень, що доповнюється в деформаційно-силовій моделі [18] аналітичною залежністю діаграми стану елемента « $M - (1/r)$ » (3) та функцією граничних деформацій

стиснутого бетону ϵ_{cu} , отриману з допомогою екстремального критерію

Ферма $dM / d(1/r) = 0$.

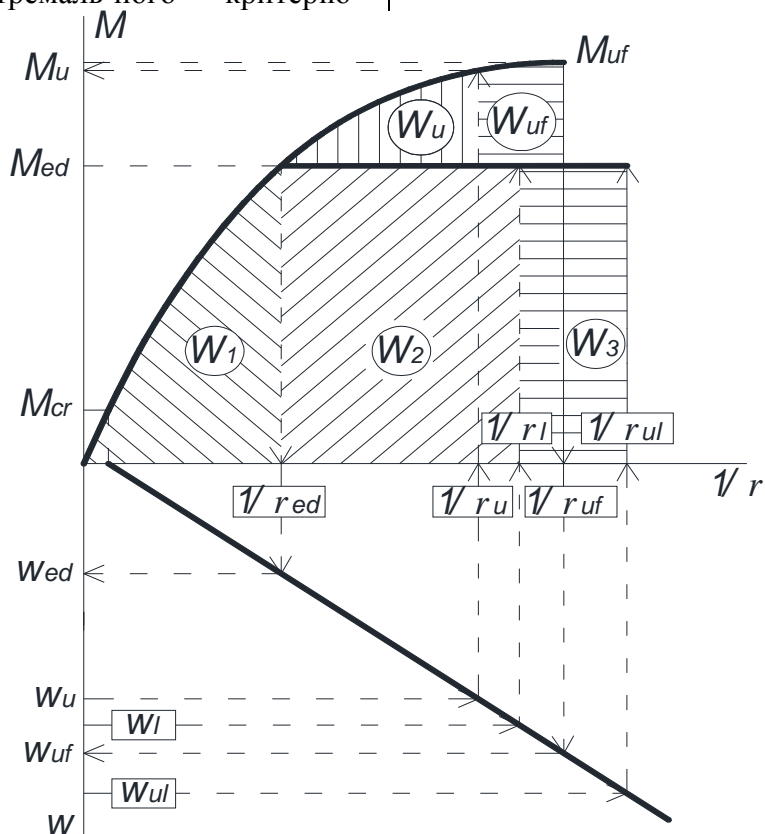


Рис. 1. До розрахунку загального та залишкового ресурсу залізобетонних елементів і конструкцій

Однак при проектуванні залізобетонних елементів і конструкцій мова доволі часто іде не про фактичний, а про розрахунковий граничний стан. Він може наставати задовго до повного фізичного руйнування залізобетонних елементів через надмірний розвиток прогинів f_u або надмірну ширину розкриття нормальних тріщин w_u (рис. 1), що характерно для випадку текучості арматури. За таких

обставин значення граничної розрахункової кривини згинального залізобетонного елемента і розрахункової несучої здатності M_u в граничній стадії деформування теж слід обчислювати за формулами (1) і (3).

Тоді розрахунковий ресурс згинального залізобетонного елемента за короткочасної дії повного навантаження (рис. 1) слід розраховувати згідно з формулою (2) за таким виразом:

$$W_u = \int_0^{1/r_u} M d(1/r) = \int_0^{1/r_u} \left[\left(D_o \cdot (1/r) - \frac{M_{uf}}{(1/r_{uf})^2} \cdot (1/r)^2 \right) / \left(1 + (K-2) \frac{(1/r)}{(1/r_{uf})} \right) \right] d(1/r) =$$

$$= \frac{M_{uf}}{(K-2)} \left[-\frac{(1/r_u)^2}{2 \cdot (1/r_{uf})} + \frac{(1/r_u) \cdot (K-1)^2}{(K-2)} - (1/r_{uf}) \cdot \left(\frac{K-1}{K-2} \right)^2 \ln \left(1 + (K-2) \frac{1/r_u}{1/r_{uf}} \right) \right]. \quad (4)$$

При прогнозуванні залишкового енергетичного ресурсу осереднену кривину згинального елемента від короткочасної дії

експлуатаційного моменту M_{ed} визначають згідно з діаграмою стану (3) за формулою

$$\frac{1}{r_{ed}} = \frac{1/r_{uf}}{2M_{uf}} \left[\left(1 - \frac{M_{ed}}{M_{uf}} \right) \frac{D_o}{r_{uf}} + 2M_{ed} - \sqrt{\left(\left(1 - \frac{M_{ed}}{M_{uf}} \right) \frac{D_o}{r_{uf}} + 2M_{ed} \right)^2 - 4M_{ed} \cdot M_{uf}} \right], \quad (5)$$

а відповідну їй потенціальну енергію деформування W_1 – шляхом інтегрування виразу (4) в межах від 0 до $1/r_{ed}$.

Приріст потенціальної енергії деформування елемента за тривалої дії експлуатаційного навантаження (рис. 1) можна обчислити за формулою

$$W_2 = M_{ed} \cdot (1/r_l - 1/r_{ed}) \quad (6)$$

за відповідної кривини елемента $1/r_l$, ширини розкриття нормальних тріщин w_l і середніх деформацій стиснутого бетону $\mathcal{E}_{cl,m}$

$$1/r_l = (\mathcal{E}_{cl,m} + w_l / s_r + \mathcal{E}_{ctu,m}) / d, \quad (7)$$

$$\mathcal{E}_{cl,m} = \mathcal{E}_{c,m} \cdot (1 + \varphi(t, t_0)), \quad (8)$$

де $\varphi(t, t_0)$ – значення коефіцієнта повзучості стиснутого бетону при дії зовнішнього навантаження тривалістю $(t - t_0)$ [7, 19].

Беручи до уваги вищенаведені вирази (2)–(6), розрахункове значення залишкового енергетичного ресурсу залізобетонного елемента (рис. 1) можна розрахувати за формулою

$$W_3 = W_u - W_1 - W_2 = \frac{M_{uf} \cdot (1/r_{uf})}{(K-2)} \left[-\frac{1}{2} + \frac{(K-1)^2}{(K-2)} - \left(\frac{K-1}{K-2} \right)^2 \ln(K-1) \right] -$$

$$-\frac{M_{uf}}{(K-2)} \left[-\frac{(1/r_{ed})^2}{2 \cdot (1/r_{uf})} + \frac{(1/r_{ed}) \cdot (K-1)^2}{(K-2)} - (1/r_{uf}) \cdot \left(\frac{K-1}{K-2} \right)^2 \ln \left(1 + (K-2) \frac{1/r_{ed}}{1/r_{uf}} \right) \right] -$$

$$-M_{ed} \cdot (1/r_l - 1/r_{ed}). \quad (9)$$

Тоді граничні значення осередненої

кривини залізобетонного елемента $1/r_{ul}$ та

ширини розкриття нормальних тріщин w_{ul} можна знайти за виразами

$$1/r_{ul} = W_3 / M_{ed} + 1/r_l, \quad (10)$$

$$w_{ul} = (d/r_{ul} - \varepsilon_{clu,m} - \varepsilon_{ctu,m}) \cdot s_r, \quad (11)$$

спрогнозувавши середні деформації стиснутого бетону $\varepsilon_{clu,m}$ за формулою (8) при граничному значенні коефіцієнта повзучості бетону $\varphi(\infty, t_0)$ [7, 19].

Подібне теоретичне прогнозування тривалого розкриття тріщин виконано для однієї з балок, випробуваних R. I. Gilbert [20]. Воно відображено на рис. 2.

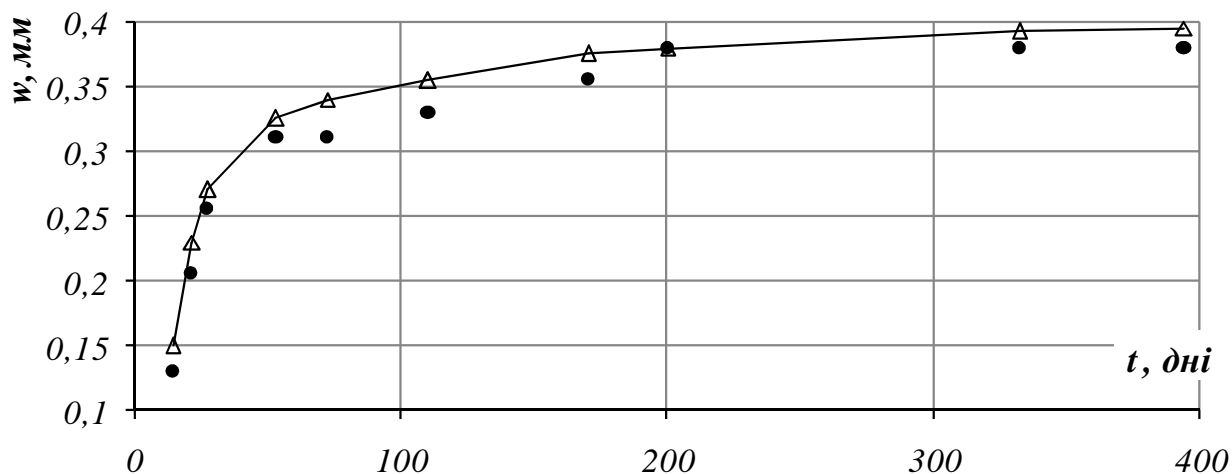


Рис. 2. Порівняння експериментальних (●) та теоретичних (Δ) значень ширини тривалого розкриття нормальних тріщин в залізобетонній балці В2-а [20]

Висновки. Таким чином, в основу наведеної енергетичної моделі деформування залізобетонних елементів і конструкцій пропонується покласти одну з визначальних гіпотез – незмінності в одиниці об'єму та незалежності від режиму завантаження потенціальної енергії деформування залізобетонного елемента, витраченої на його руйнування

$W_{uf} = const$. Водночас цю гіпотезу можна розглядати як енергетичний критерій не тільки загального, але й залишкового ресурсу залізобетонних елементів і конструкцій після їх тривалої експлуатації та використовувати при розробленні відповідних методик розрахунку.

Список використаних джерел

1. Проектирование железобетонных конструкций: справоч. пособ. / А. Б. Гольшев и др.; под ред. А. Б. Гольшева. Киев: Будивельник, 1985. 496 с.
2. Расчет железобетонных конструкций по прочности, трещиностойкости и деформациям / А. С. Залесов, Э. Н. Кодыш, Л. Л. Лемыш и др. Москва: Стройиздат, 1988. 320 с.
3. Боровских А. В. Расчеты железобетонных конструкций по предельным состояниям и предельному равновесию: учеб. пособ. Москва: Изд-во АСВ, 2004. 320 с.

4. Карпенко Н. И., Мухамедиев Т. А., Сапожников М. А. К построению методики расчёта стержневых элементов на основе диаграмм деформирования материалов. *Совершенствование методов расчёта статически неопределимых железобетонных конструкций*. Москва: НИИЖБ, 1987. С. 4-24.
5. Attard M. M., Setunge S. Stress-strain relationship of confined and unconfined concrete. *ACI Materials Journal*. 1996. Vol. 93. No. 5. P. 432-442.
6. Бамбура А. М. Експериментальні основи прикладної деформаційної теорії залізобетону: дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.01 / НДІБК. Київ, 2005. 379 с.
7. EN 1992-1-1. Eurocode 2: Design of Concrete Structures. Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings. [Final Draft, December, 2004]. Brussels: CEN, 2004. 225 p.
8. Дорофеев В. С., Барданов В. Ю. Расчет изгибаемых элементов с учетом полной диаграммы деформирования бетона: монография. Одесса: ОГАСА, 2003. 210 с.
9. Romashko V., Romashko O. The construction features of the deformation and force model of concrete and reinforced concrete resistance. *MATEC Web of Conf*. 2017. Vol. 116. 02028.
10. Ромашко В. М. Деякі особливості діаграми деформування бетону. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наук. праць*. Рівне, 2006. Вип. 14. С. 294-301.
11. Ромашко В. М. Жорсткість та модуль деформацій бетону в деформаційній моделі. *Бетон и железобетон в Украине*. 2007. № 6. С. 2-6.
12. Romashko V. M., Romashko O. V. Energy resource of reinforced concrete elements and structures for the deformation-force model of their deformation. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng*. 2019. Vol. 708. No. 1. 012068.
13. Самолинов Н. А. Использование неразрушающих методов контроля прочности конструкций при определении остаточного ресурса зданий и сооружений. *Сейсмостойкое строительство, безопасность сооружений*. 2002. № 3. С. 8-10.
14. Шматков С. Б. Расчёт остаточного ресурса строительных конструкций зданий и сооружений. *Вестник ЮУрГУ: Строительство и архитектура*. 2007. Вып. 5. № 22. С. 56-57.
15. Суцев С. П., Самолинов Н. А., Адаменко И. А. Остаточный ресурс конструкций (сооружений) и возможные методы его оценки. *Предотвращение аварий зданий и сооружений: сб. науч. трудов*. Москва, 2009. Вып. 8. С. 320-327.
16. Беляев С. М. Расчет остаточного ресурса зданий с учетом запаса несущей способности конструкций. *Вестник СГАСУ: Град-ство и арх-ра*. 2013. № 3(11). С. 22-25.
17. Ромашко В. М., Ромашко О. В. Розрахунок тріщиностійкості залізобетонних елементів з урахуванням рівнів утворення нормальних тріщин. *Зб. наук. праць УкрДУЗТ*. Харків: УкрДУЗТ, 2018. Вип. 181. С. 58-65.
18. Ромашко В. М. Деформаційно-силова модель опору бетону і залізобетону: монографія. Рівне: О. Зень, 2016. 424 с.
19. ДСТУ Б В.2.6-156: 2010. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування. [Чин. від 01.06.11]. Київ: Мінрегіонбуд України, 2011. 123 с.
20. Gilbert R. I., Nejadi S. An Experimental Study of Flexural Cracking in Reinforced Concrete Members under Sustained Loads: UNICIV Report № R-435, School of Civil and Environmental Engineering. Sydney: University of New South Wales, 2004. 59 p.

Ромашко-Майструк Олена Василівна, старш. викладач кафедри основ архітектурного проектування, конструювання і графіки Національного університету водного господарства та природокористування (м. Рівне). ORCID iD: 0000-0003-3353-2268. Тел.: (096) 131-99-17. E-mail: romashkoolena@gmail.com.

Romashko-Maistruk Olena Vasylivna, Senior Lecturer of Chair of Architectural Designing Bases, Constructing and

Graphics National University of Water Management and Nature Recourses Use (Rivne). ORCID iD: 0000-0003-3353-2268. Tel.: (096) 131-99-17. E-mail: romashkoolena@gmail.com.

Статтю прийнято 17.09.2020 р.