

УДК 539.3

**ВПЛИВ РАДІАЦІЙНОГО ОПРОМІНЕННЯ НА НАПРУЖЕНО-  
ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ЗАЛІЗОБЕТОННОЇ БАЛКОВОЇ  
КОНСТРУКЦІЇ**

*І. Добрянський, д.т.н., В. Хмиз, к.с.-г.н., Є. Іваник, к.ф.-м.н.,  
Л. Добрянська, к.е.н.*

*Львівський національний аграрний університет*

**Постановка проблеми.** У процесі експлуатації інженерних об'єктів та їх підготовки до реконструкції основною проблемою, з якою зіштовхуються інженери-дослідники, є визначення фактичного напруженого стану будівельних конструкцій та вибір найбільш ефективних заходів для їх відновлення. Науково-дослідні інститути, проектні та виробничі організації, які здійснюють розробку і впровадження нових проектних пропозицій у практику будівництва, навіть сьогодні не володіють достатньо надійними методами, засобами і приладами для діагностики та прогнозування технічного стану й надійності бетонних і залізобетонних конструкцій, особливо тих, які експлуатуються в несприятливих умовах.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** За десятки років накопичено значний обсяг експериментальних даних про вплив опромінення на механічні властивості конструкційних матеріалів, зокрема бетонів [1–5; 7–13; 15; 16; 18; 19]. На цій основі можна зробити перерахунок напружено-деформованого стану деяких інженерних конструкцій, кількісно оцінити реальні запаси міцності, які вони мають на момент здійснення розрахунків. Відповідні обчислення слід вести для об'єктів із реальною геометричною формою за мінімуму спрощувальних гіпотез. Такі дані можна отримати з використанням сучасних методів числового моделювання, які також порівняно з їх станом на момент створення і встановлення відповідного обладнання значно просунулися у своєму розвитку. Нові методики розрахунку разом з уточненими фізичними моделями будуть тим базисом, на основі якого можна оцінити міцнісні параметри конструкцій, дослідити вплив на них реальних наслідків експлуатаційного впливу і запропонувати нові чи уточнені науково обґрунтовані схеми й методики розрахунку та оцінки міцності.

**Постановка завдання.** Впровадження ресурсощадних технологій та будівництво складних інженерних споруд ємнісного типу (захисні оболонки реакторів, резервуари для зберігання продуктів із високою температурою, акумулятори тепла в комплексі споруд атомних електростанцій тощо) потребують комплексного вирішення проблем, пов'язаних із дослідженням

матеріалів і конструкцій, виконаних на основі бетону, що перебувають в умовах дії високоінтенсивних теплових чинників і, як наслідок, складного термонапруженого стану. Дія температури спричинює появу температурних моментів, що в сукупності зі силовими чинниками створюють умови для появи наскрізних тріщин, які впливають на перебіг експлуатації, особливо об'єктів утилізації відпрацьованого ядерного палива АЕС.

Нашою метою було вивчення впливу радіаційного опромінення на напружено-деформований стан залізобетонної балкової конструкції.

**Виклад основного матеріалу.** Розглянемо тверде тіло  $V \in E^3$  з неперервною за Ліпшицем поверхнею  $S$  за термосилового навантаження. Нехай на частині  $S_u$  поверхні  $S$  задані переміщення  $u^* = (u_1^*, u_2^*, u_3^*)^T$ , а на решті (частині  $S_\sigma$ ) – силове навантаження, яке характеризує в декартовій системі координат вектор  $p = (p_1, p_2, p_3)^T$ . Розподіли температури в тілі в кожний момент часу відомі з розв'язування задачі теплопровідності. Приймаємо, що під час навантаження деформації в тілі є пружними і такими, що дають змогу застосовувати геометрично лінійні співвідношення загальної теорії пружності [10; 17].

Визначимо напружено-деформований стан тіла, а саме компоненти вектора переміщень і симетричних тензорів деформацій і напружень, які задовольняють геометричні співвідношення

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), \quad (1)$$

рівняння стану  $\sigma_{ij} = G_{ijkl} \varepsilon_{kl} - \delta_{ij} \alpha_T (T - T_0), \quad (2)$

та рівноваги  $\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + F_i = 0, \quad r \in V, \quad (3)$

за граничних умов  $n_i \sigma_{ij} - p_i = 0, \quad r \in S_\sigma, \quad (4)$

$$u_i = u_i^*, \quad r \in S_u. \quad (5)$$

Тут  $i, j, k, m = 1, 2, 3$ ;  $\varepsilon_{ij}, \sigma_{ij}$  – компоненти тензорів деформацій і напружень;  $F_i, n_i$  – компоненти векторів масових сил  $F$  й одиничного вектора нормалі  $n$  до поверхні  $S = S_u \cup S_\sigma$  ( $S_u \cap S_\sigma = \emptyset$ );  $\alpha_T$  – лінійний коефіцієнт термічного розширення;  $G_{ijkl}$  – пружні сталі, які у випадку

ізотропного тіла пов'язані з коефіцієнтами Ляме  $\lambda_*$  і  $\mu_*$ :

$$G_{ijkm} = \lambda_* \delta_{ij} \delta_{km} + \mu_* (\delta_{ik} \delta_{jm} + \delta_{im} \delta_{jk}); \quad (6)$$

$$\lambda_* = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}; \quad \mu_* = \frac{E}{2(1+\nu)}, \quad (7)$$

де  $\delta_{ij}$  – символ Кронекера;  $E$  – модуль Юнга;  $\nu$  – коефіцієнт Пуассона. У наведених виразах індекси, що повторюються, є індексами сумування (від 1 до 3).

Співвідношення (1)–(3) та граничні умови (4) і (5) складають повну систему рівнянь квазістатичної задачі теорії пружності, для якої існує єдиний розв'язок [6; 10]. Оскільки отримати його в аналітичному вигляді для тіл складної геометричної конфігурації не завжди вдається, для розв'язування таких задач використаємо універсальний числовий підхід, розроблений на основі методу скінченних елементів [10; 11; 17]. При цьому візьмемо за основу математичне формулювання квазістатичної задачі теорії пружності в переміщеннях у вигляді варіаційного принципу Лагранжа [14].

Загальновідомо, що бетон чинить опір стиску і значно гірше – розтягу [4; 7; 12]. Тому введення сталеві арматури в розтягнуту зону конструктивних елементів суттєво підвищує їх несучу здатність. Зазначимо, що сталь монтується не лише в розтягнутій зоні, а й у зоні стиску – для забезпечення жорсткості арматурного каркаса.

Розглянемо випадок смугової арматури, що дає підстави перейти від просторово тривимірної до плоскої задачі теорії пружності.

Дослідимо, як впливає радіаційне опромінення на напружено-деформований стан балкової конструкції, вільної від навантаження, підсиленої знизу сталеві арматурою товщиною  $h$ . Модуль Юнга і коефіцієнт Пуассона сталі відповідно складають  $21 \cdot 10^4$  МПа та 0,25.

Розрахунки показують, що монтування поздовжнього шару арматури призводить до зменшення напружень у бетонній частині конструкції. При цьому їх значення відчутно зменшуються у разі збільшення арматурної смуги, тобто арматурний шар бере частину навантаження на себе.

На рис. 1 показано переміщення  $u_y$  точок нижньої поверхні балки, підсиленої знизу смугові арматурою товщиною  $h = H/50$ , у разі, коли матеріал усієї балки рівномірно за об'ємом деградував у результаті тривалого радіаційного опромінення (суцільна лінія), у вихідному стані (штрихова лінія) і коли лише ліва половина прогону перебувала в зоні опромінення (штрих-пунктирна лінія).

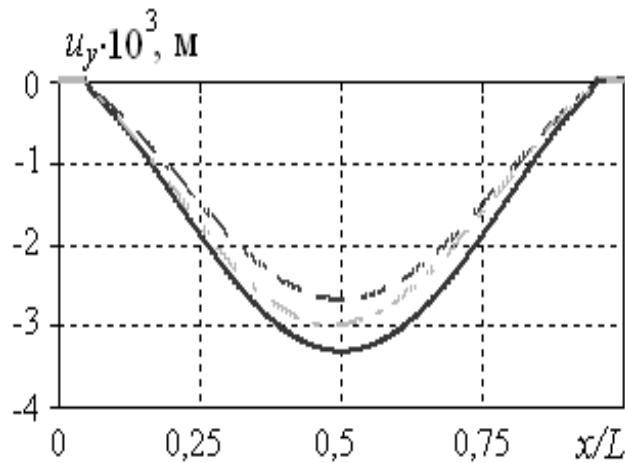


Рис. 1. Прогин прогону залізобетонної балки на опорах із накопиченою радіацією (суцільна лінія), у вихідному стані (штрихова лінія) та коли опромінювалася лише ліва половина прогону (штрих-пунктирна лінія).

На рис. 2 і рис. 3 для цих випадків показано відповідно напруження на верхній і нижній поверхнях залізобетонної конструкції. Власне кажучи, рис. 3 відображає напружений стан у сталевій арматурі.

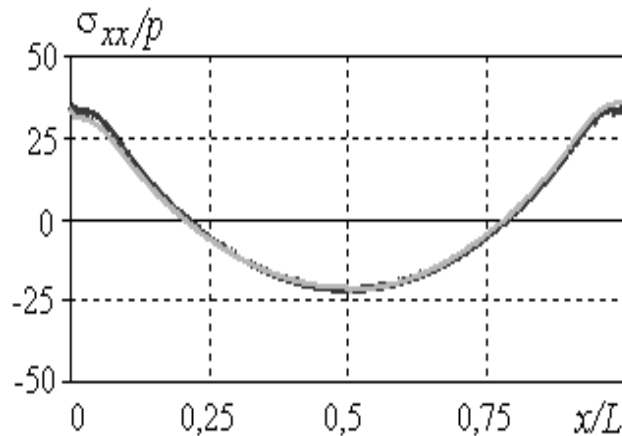


Рис. 2. Напруження на навантаженій поверхні прогону залізобетонної балки за накопиченого опромінення в усій балці, у вихідному стані та коли опромінювалася ліва половина прогону.

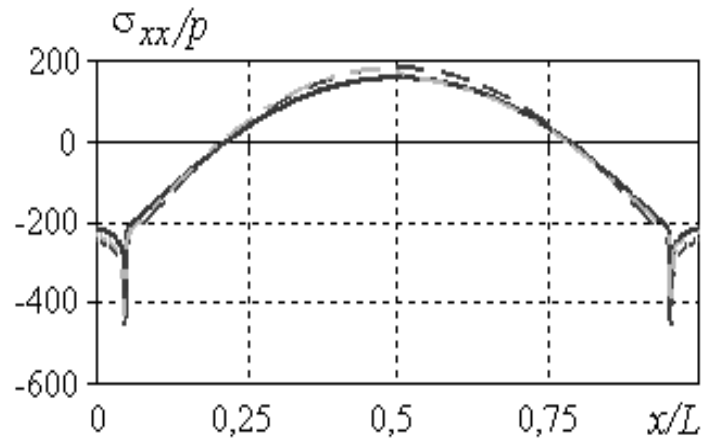


Рис. 3. Напруження у сталевій арматурі (на нижній поверхні прогону залізобетонної балки) за накопиченого опромінення у бетоні всієї конструкції (суцільна лінія), у вихідному стані (штрихова лінія) та коли опромінювалася ліва половина прогону (штрих-пунктирна лінія).

За підсилення балки двома смужками арматури товщиною  $h = H/50$  (з верхньої та нижньої поверхонь) вплив накопиченої радіації на напружено-деформований стан залізобетонної конструкції ще більше зменшується (рис. 4).

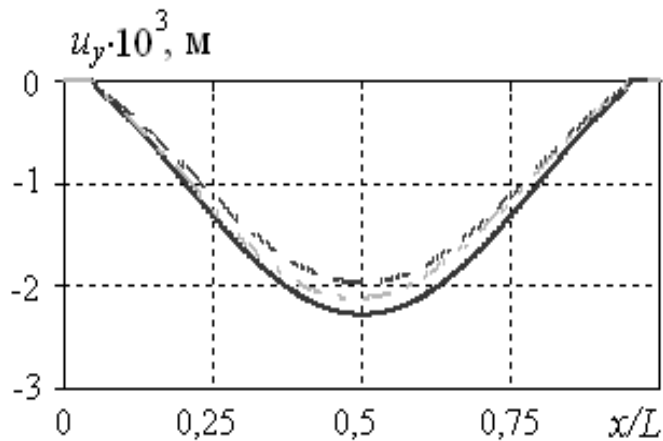


Рис. 4. Прогин прогону залізобетонної балки, підсиленої з обох поверхонь сталевую арматурою товщиною  $h = H/50$ .

Очевидно, що процедура розв'язування диференціальних рівнянь у частинних похідних, які описують той чи інший процес або перебіг певного явища, чисельними методами за конкретних значень параметрів, коли результат неможливо отримати в аналітичному вигляді, що означає моделювання реального фізичного (у нашому випадку інженерного) об'єкта, часто дає змогу не лише описати, а й передбачити нові явища.

**Висновки.** Дослідження збіжності та достовірності отримуваних результатів за допомогою критерію практичної збіжності (за допомогою порівняння розв'язків, отриманих на різних скінченно-елементних поділах області і в межах різних математичних моделей), показало, що досить точні розв'язки отримуємо вже за двох елементів за висотою балки (розміри елементів в інших вимірах приймали такими, щоб елементи максимально наближалися до квадратів у разі плоскої задачі і кубів – у разі просторово тривимірної задачі). При цьому в межах плоскої задачі максимальний прогин розглядуваної вихідної бетонної балки, защемленої на краях, становив 3,99 мм для плоского напруженого стану і 3,74 мм для плоского деформованого стану. Результати розв'язку відповідної тривимірної задачі потрапляли між ними (3,97 мм) – ближче до результатів задачі про плоский деформований стан. Прогин балки з аналітичного розв'язку розглядуваної задачі в межах моделі балки Ейлера-Бернуллі для навантаження  $p \cdot V$  дорівнює 3,62 мм. Таке майже десятивідсоткове відхилення від розв'язків відповідних тривимірної і плоскої задач теорії пружності можна пояснити тим, що розглядувана балка досить товстостінна (із зростанням співвідношення  $L/H$  результати все краще узгоджуються між собою).

Зазначимо також, що радіаційне опромінення спричинює зниження показників стійкості бетонних деталей, оскільки існує прямо пропорційна залежність між критичною силою втрати стійкості і модулем пружності матеріалу.

#### **Бібліографічний список**

1. Анищенко Л. М. Математические основы проектирования высокотемпературных технологических процессов / Л. М. Анищенко, С. Ю. Лавренюк. – М. : Наука, 1986. – 77 с.
2. Апполонов В. В. Термическое воздействие мощного лазерного излучения на поверхности твердого тела / В. В. Апполонов, А. И. Барчуков, Н. В. Карлов // Квантовая электроника. – 1975. – Т. 2. – С. 380–390.
3. Бабей Ю. И. Физические основы импульсного упрочнения стали и чугуна / Ю. И. Бабей. – К. : Наук. думка, 1988. – 240 с.
4. Барашиков А. Я. Влияние длительных температурных и силовых воздействий на прочность обычного тяжелого бетона / А. Я. Барашиков, В. Н. Перенегин // Влияние температурных условий и режимов нагружения на прочность конструктивных бетонов и элементов железобетонных конструкций. – Тбилиси, 1985. – С. 9–11.
5. Бартелеми Б. Огнестойкость строительных конструкций / Б. Бартелеми, Ж. Крюппа. – М. : Стройиздат, 1985. – 256 с.

6. Бенерджи П. Методы граничных элементов в прикладных науках / П. Бенерджи, Р. Баттерфилд. – М. : Мир, 1984. – 494 с.
7. Берг О. Я. Физические основы теории прочности бетона и железобетона / О. Я. Берг. – М. : Стройиздат, 1962. – 96 с.
8. Веденов А.А. Физические процессы при лазерной обработке материалов / А.А.Веденов, Г.Г.Гладуш. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 208 с.
9. Делона Н. Б. Взаимодействие лазерного излучения с веществом / Н. Б. Делона. – М. : Наука, 1989. – 280 с.
10. Демидов С. П. Теория упругости / С. П. Демидов. – М. : Вища шк., 1979. – 432 с.
11. Кархут І. І. Конструкції об'єктів, що працюють при високих температурних навантаженнях / І. І. Кархут, Й. Й. Лучко // Діагностика, довговічність та реконструкція мостів і будівельних конструкцій. – 2007. – Вип. 9. – С. 38–45.
12. Лучко Й. Й. Вплив радіаційного випромінювання на поведінку будівельних матеріалів і конструктивних елементів / Й. Й. Лучко, І. М. Добрянський // Стrojительство, материаловедение, машиностроение : сб. науч. тр. – Днепропетровск : ПГАСА, 2010. – № 56. – С. 251–257.
13. Лучко Й. Й. Термопружність конструкційних бетонів / Й. Й. Лучко, І. І. Кархут // Діагностика, довговічність та реконструкція мостів і будівельних конструкцій. – 2007. – Вип. 9. – С. 101–107.
14. Морозов Е. М. Метод конечных элементов в механике разрушения / Е. М. Морозов, Г. П. Никишков. – М. : Наука, 1980. – 256 с.
15. Рыкалин Н. Н. Воздействие концентрированных потоков энергии (КПЭ) на материалы. Проблемы и перспективы / Н. Н. Рыкалин, А. А. Углов // Физика и химия обработки материалов. – 1983. – № 5. – С. 3–18.
16. Рэди Д. Действие мощного лазерного излучения / Д. Рэди. – М. : Мир, 1974. – 468 с.
17. Сахаров А. С. Метод конечных элементов в механике твердых тел / А. С. Сахаров, И. Альтенбах. – К. : Вища шк., 1982. – 480 с.
18. Duley W. W. CO<sub>2</sub> Lasers: Effect of applications / W. W. Duley. – New York : Acad. Press, 1976. – 427 p.
19. Hector L. G. Thermal stresses in materials due to laser heating / L. G. Hector, R. B. Hetnarski // Thermal stresses IV / ed. R. B. Hetnarski. – Amsterdam : Elsevier, 1996. – P. 453–531.

**Добрянський І., Хмиз В., Іваник Є., Добрянська Л. Вплив радіаційного опромінення на напружено-деформований стан залізобетонної балкової конструкції**

Досліджено вплив радіаційного опромінення на напружено-деформований стан балкової конструкції, вільної від навантаження, підсиленої знизу сталеву смуговою арматурою. Обчислення з використанням методу скінченних елементів виконано в межах рівнянь тривимірної і плоскої термопружно-пластичності з використанням ізопараметричних біквадратичних скінченних елементів. Дослідження збіжності та достовірності отримуваних результатів за допомогою критерію практичної збіжності показало, що досить точні розв'язки отримуємо вже за двох елементів за висотою балки.

**Ключові слова:** температура, температурні напруження, залізобетонна балка, іонізуюче опромінення, метод скінченних елементів, геометрична нелінійність, анізотропія.

**Dobryanskyi I., Hmuz V., Ivanyk E., Dobryanska L. Influence irradiation on stress-strain state reinforced concrete beam system**

The effect of irradiation on the stress-strain state beam construction, free from stress, enhanced with the lower surface of the steel strip reinforcement. Calculations using the finite element method implemented within the three-dimensional equations and plane thermoelastic-plasticity using finite element isoperimetric biquadratical finite elements. Study of convergence and accuracy of the results obtained by practical convergence criterion showed that reasonably accurate solutions get already for two elements height beams.

**Key words:** temperature, thermal stresses, ironconcrete beam, ionization irradiation, finite elements method, geometrical nonlinearity, anisotropy.

**Добрянский И., Хмиз В., Иваник Е., Добрянская Л. Влияние радиационного облучения на напряженно-деформированное состояние железобетонной балочной конструкции**

Исследовано влияние радиационного облучения на напряженно-деформированное состояние балочной конструкции, свободной от нагрузки, усиленной с нижней поверхности стальной полосовой арматурой. Вычисления с использованием метода конечных элементов выполнены в рамках уравнений трехмерной и плоской термоупруго-пластичности с использованием изопараметрических биквадратичных конечных элементов. Исследования сходимости и достоверности полученных результатов при



помощи критерия практической сходимости показало, что достаточно точные решения получаются уже при двух элементах по высоте балки.

**Ключевые слова:** температура, температурные напряжения, железобетонная балка, ионизирующее облучение, метод конечных элементов, геометрическая нелинейность, анизотропия.