

УДК 624.12

**МОДЕЛЮВАННЯ ВИЗНАЧЕННЯ ВТРАТИ МІЦНОСТІ
Й ДОВГОВІЧНОСТІ КОНСТРУКТИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ
ЕНЕРГЕТИКИ, БУДІВЕЛЬ ТА ІНЖЕНЕРНИХ СИСТЕМ**

*І. Добрянський, д. т. н., Л. Добрянська, к. е. н., Є. Іваник, к. ф.-м. н.
Львівський національний аграрний університет*

Постановка проблеми. Чимало конструктивних елементів атомних електростанцій, будівель та інженерних споруд, виготовлених з металу, бетону й залізобетону, піддаються дії не тільки експлуатаційних технологічних навантажень і температури, а й агресивних та радіаційних середовищ. Численні результати експериментальних досліджень і натурних спостережень свідчать про те, що дія радіаційних чинників призводить до істотних змін механічних властивостей матеріалу конструкції, а в деяких випадках – до зміни роботи самої конструкції. З дією радіації змінюються властивості металу, бетону й арматури, відбувається розпухання матеріалів [1]. У результаті напружений стан конструкції змінюється, а термін «життя» зменшується. Багато конструкцій останнім часом опинилися в зоні дії радіаційних чинників. Наприклад, конструкції в зоні дії наслідків аварії на Чорнобильській АЕС, різні конструкції ядерних реакторів, конструкції могильників і сховищ, що слугують для складування відпрацьованого палива і поховання інших радіоактивних відходів. Усі ці конструкції повинні забезпечувати захист об'єктів від негативної дії радіаційних чинників, а також зберігати свої функціональні властивості на певний період експлуатації. Оскільки під впливом радіаційного опромінення змінюється напружено-деформований стан елементів конструкцій, то для прогнозування цієї зміни необхідно мати розрахункові моделі й методи розрахунку, що враховують негативну дію радіаційних чинників.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для розрахунку ресурсу (залишкового ресурсу) елементів конструкцій за відсутності дефектів застосовують критерії класичних теорій [2–8], а за наявності дефектів – критерії механіки руйнування [9–11]. У цих критеріях присутні характеристики довговічності матеріалів, які визначаються на основі прийнятих методик національних стандартів [11] і які можуть бути реалізовані у звичайних умовах заводської лабораторії на стандартному устаткуванні. Водночас матеріали елементів конструкцій часто піддаються впливу різних опромінь, які спричинюють зміну їх міцності й довговічності, що не може бути знайдено в умовах заводської лабораторії. У таких випадках застосовують інші критерії міцності й довговічності

матеріалів, і зміну їх характеристик знаходять на основі нестандартних методик, реалізація яких вимагає спеціального устаткування та умов їх реалізації.

Сьогодні низка енергоблоків в Україні вже виробила свій проектний термін експлуатації (30 років) або наближається до нього. Для подальшої експлуатації енергоблоків, що досягли проектного терміну служби, а також для розробки проектів АЕС нового покоління з терміном експлуатації понад 30 років, необхідне забезпечення безпечної експлуатації устаткування АЕС на нові, триваліші терміни служби. Тому питання обґрунтування продовження терміну служби атомного енергоустаткування із забезпеченням його безпечної експлуатації стають сьогодні дедалі важливішими й актуальнішими. За нормативними документами РДЕО 0185-2006 і РДЕО, що існують в атомній енергетиці, 0330-2001 продовження терміну служби енергоблоків АЕС проводять за вживання великого комплексу регламентованих заходів, що охоплюють, зокрема, оцінку технічного стану й розрахунок залишкового ресурсу елементів енергоблоків з урахуванням фактичного рівня механічних властивостей і виявлених під час експлуатації дефектів. Розрахунок залишкового ресурсу, визначення розмірів дефектів, що допускаються, виконують з урахуванням збільшення тріщиноподібних дефектів у процесі експлуатації. Оскільки устаткування АЕС експлуатується в умовах термічної, механічної, корозійної й радіаційної дій, то необхідно визначити вплив експлуатаційної дії на зміну властивостей металу устаткування і трубопроводів у процесі експлуатації, що дасть змогу прогнозувати їх зміну на продовжуваний термін експлуатації. У зв'язку з цим для забезпечення безпечної експлуатації актуальним стає вдосконалення розрахунків на міцність для обґрунтування продовження терміну служби з урахуванням тривалих термінів експлуатації.

Відсутність надійних даних про зміну характеристик жароміцності конструкційних сталей під дією нейтронного опромінення спричинює значну невизначеність у проектуванні активних зон ядерних апаратів, розрахунках їх на міцність і необхідність введення в розрахунок завищених коефіцієнтів запасу, що, врешті, знижує нейтронно-фізичні характеристики реакторів та їх економічність. При цьому велике значення мають питання, пов'язані з впливом нейтронного опромінення на високотемпературну повзучість матеріалів та їх довготривалу міцність. Особливо великий інтерес становлять ті нечисленні дослідження повзучості й довготривалої міцності, які проведені безпосередньо в потоках реакторних випромінювань. Вони необхідні для розрахунку залишкового ресурсу елементів атомних електростанцій, які контактують з першим контуром. До таких елементів належать внутрішня частина корпусу реактора й різних трубопроводів,

якими тече реакторна вода. В їх стінках утворюються поверхневі тріщини, що розвиваються в результаті високотемпературної повзучості, яка посилюється за рахунок радіоактивного опромінення.

Як показують результати експериментальних досліджень [9; 10], швидкість усталеної повзучості сталі типу 304 за температури $T=650$ °C може збільшуватися у два-п'ять разів за інтенсивності потоку швидких нейтронів, що становить $5 \cdot 10^{12}$ н.см⁻².с⁻¹. В оглядових частинах робіт [9; 10] наведено і багато інших прикладів збільшення швидкості усталеної високотемпературної повзучості за рахунок опромінення швидкими нейтронами.

Постановка завдання. Завдання нашого дослідження – визначити залишковий ресурс труби з поверхневою тріщиною в її стінці, яка піддається дії довготривалого внутрішнього тиску, високої температури й радіаційного опромінення. Для цього побудуємо розрахункову модель, суть якої полягає в такому.

Необхідно визначити залишковий ресурс труби внутрішнього радіуса $r = 0,5d_1$ товщини $h_1 = 0,5(d_2 - d_1)$, яка піддана дії внутрішнього довготривалого статичного тиску p , температури T і радіоактивного опромінення в дозі Φ (флюенс). Вважається, що на внутрішній стінці труби вздовж її твірної розміщена поверхнева півеліптична тріщина з півосями a_0 і b_0 з площею S_0 (рис. 1).

В умовах дії зовнішніх чинників, за яких реалізується явище високо-температурної повзучості, тріщина буде поширюватися, і труба втратить герметичність. Завдання полягає у визначенні часу $t = t_*$, коли площа тріщини S у результаті високотемпературної повзучості зростає до критичного розміру $S = S_*$, тобто $b(t_*) = h_1$, і труба розгерметизується.

Для розв'язання такої задачі побудуємо математичну модель опису кінетики поширення тріщини високотемпературної повзучості у трубі й визначення періоду її докритичного росту $t = t_*$.

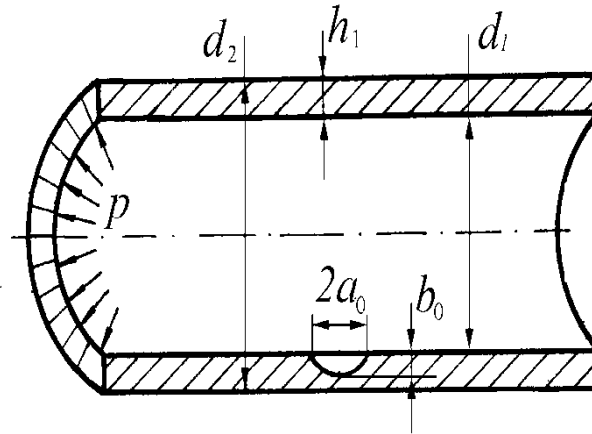


Рис. 1. Схема навантаження труби з півеліптичною тріщиною.

Виклад основного матеріалу. Застосуємо загальний енергетичний підхід, сформульований у [6]. На його основі для опису докритичного зростання тріщини високотемпературної повзучості отримаємо диференціальне рівняння

$$\frac{dS}{dt} = A_m \left[\frac{K_I}{K_{IC}} \right]^{2m} \left[1 - \frac{K_I^2}{K_{IC}^2} \right]^{-1}. \quad (1)$$

Для повноти математичної моделі до рівняння додамо початкову й кінцеві умови

$$t = 0, \quad S(0) = S_0, \quad (2)$$

$$t = t_*, \quad S(t_*) = S_*, \quad (3)$$

де критична площа тріщини $S = S_*$ визначається з критерію Ірвіна

$$K_I(S_*) = K_{IC}, \quad (4)$$

де A_m, m – характеристики високотемпературної повзучості [5; 6]; K_I – коефіцієнт інтенсивності напружень біля контуру тріщини; K_{IC} – його критичне значення.

Отже, період докритичного збільшення тріщин високотемпературної повзучості у стінці труби визначається на основі співвідношень (1) - (4).

Щоб знайти залишковий ресурс труби (час до розгерметизації), застосуємо відомий [6] метод еквівалентних площ: зміна площі рухомої тріщини розглядуваної конфігурації наближено така, як для півкругової

тріщини радіуса a рівної площі. Це значно спрощує розрахунки, але, як показано в [6], забезпечить для розрахунків достатню точність. Оскільки товщина стінки труби h_1 значно менша від її внутрішнього радіуса r ($r \gg h$), то таку трубу з тріщиною під внутрішнім тиском p моделюватимемо пластиною товщини h_1 з поверхневою тріщиною, яка розтягується рівнорозподіленими напруженнями $\sigma_1 = rh_1^{-1}p$. На основі цього та результатів роботи [6] рівняння (1) матиме вигляд

$$\frac{d\xi}{dt} = \frac{A_m}{h_1} \left[\frac{K_I}{K_{IC}} \right]^{2m} \left[1 - \frac{K_I^2}{K_{IC}^2} \right]^{-1}, \quad (5)$$

$$\xi = a/h_1; K_I = 0,7prh_1^{-1} \sqrt{\pi h_1 \xi} (1 + 0,32\xi^2) (1,04 + 0,23\xi^2 - 0,11\xi^4) \quad (6)$$

за початкової й кінцевої умов

$$t = 0, \quad \xi(0) = \xi_0; \quad (7)$$

$$t = t_*, \quad \xi(t_*) = 1. \quad (8)$$

Підставляючи (6) у (5) та інтегруючи за умов (7), (8), отримаємо розв'язок у такому вигляді:

$$t_* = \frac{h_1}{A_m} \int_{\xi_0}^1 \left[\frac{K_I}{K_{IC}} \right]^{-2m} \left[1 - \frac{K_I^2}{K_{IC}^2} \right] d\xi. \quad (9)$$

Для апробації формули (9) розглянемо конкретний випадок, коли досліджувана труба, виготовлена зі сталі ОХ16Н15МЗБ, експлуатується за температури 650°C , нейтронного опромінення $\Phi = 5,3 \cdot 10^{12} \text{ н}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ потужністю $E \geq 0,85 \text{ Мев}$, має геометричні параметри $h_1 = 8 \text{ мм}$, $r = 20 \text{ мм}$, і навантажена тиском p , що задовольняє умову $\sigma_1 = 200 \text{ МПа}$ (за $\xi_0 = 0,1$). Для зазначеної сталі у [9] наведені результати експериментальних досліджень високотемпературної повзучості цієї сталі за таких самих параметрів нейтронного опромінення. При цьому отримані дані для високотемпературної повзучості (усталена ділянка повзучості) добре описуються формулою

$$\varepsilon = \dot{\varepsilon} t, \quad (10)$$

де ε – значення деформації; $\dot{\varepsilon}$ – швидкість повзучості на усталеній ділянці; t – час. У свою чергу швидкість повзучості на усталеній ділянці $\dot{\varepsilon}$ визначається через напруження σ так:

$$\dot{\varepsilon} = A(\sigma \sigma_{0,2}^{-1})^n, \quad (11)$$

де $\sigma_{0,2}$ – межа текучості сталі; $A = 3,98 \cdot 10^{24}$ 1/год; $n = 17,8$; $\sigma_{0,2} = 930$ МПа і $A = 4,29 \cdot 10^9$ 1/год; $n = 7,2$; $\sigma_{0,2} = 1100$ МПа відповідно, для зразків неопромінених і опромінених. На основі результатів робіт [5; 6] можна записати таку залежність:

$$\dot{\delta}_t = \delta_C \dot{\varepsilon} \varepsilon_C^{-1} \quad (12)$$

Аналізуючи задачу Грифітса, в якій пластинка з тріщиною розтягується зусиллями σ , можемо записати таке співвідношення:

$$\frac{K_I(\sigma, l)}{K_I(\sigma_*, l)} = \frac{\sigma \sqrt{\pi l}}{\sigma_* \sqrt{\pi l}} = \sigma \sigma_*^{-1} \quad (13)$$

Для багатьох матеріалів приймаємо [3] $\sigma_* \approx \sigma_{0,2}$, $K_I(\sigma_*, l) = K_{IC}$. Тоді на основі співвідношень (11)–(13) запишемо таку формулу:

$$\dot{\delta}_t = \delta_C \varepsilon_C^{-1} A \left[\frac{K_I}{K_{IC}} \right]^n \quad (14)$$

На основі результатів робіт [5; 6] і формули (14) співвідношення (9) можемо записати:

$$t_* = \frac{h_1 \varepsilon_C}{\delta_C A} \int_{\varepsilon_0}^1 \left[\frac{K_I}{K_{IC}} \right]^{-n} \left[1 - \frac{K_I^2}{K_{IC}^2} \right] d\xi \quad (15)$$

Величини $\varepsilon_C, \delta_C, K_{IC}$, які входять до формули (15), визначаємо на основі результатів робіт [9; 11; 12] у такому вигляді: $K_{IC} = 251$ МПа·м^{1/2}; $\varepsilon_C = 0,1$; $\delta_C = 0,3$ і $K_{IC} = 198$ МПа·м^{1/2}; $\varepsilon_C = 0,25$; $\delta_C = 0,83$ мм відповідно для зразків неопромінених і опромінених. Підставляючи значення наведених характеристик у формулу (15), отримаємо: для неопроміненої труби

$$t_* = 3,46 \cdot 10^{18} \int_{\varepsilon_0}^1 K_I^{-15,8} (K_I^{-2} - 1,59 \cdot 10^{-5}) d\xi \quad (16)$$

для опроміненої труби

$$t_* = 4,60 \cdot 10^8 \int_{\varepsilon_0}^1 K_I^{-5,2} (K_I^{-2} - 2,55 \cdot 10^{-5}) d\xi \quad (17)$$

де у формулі (13) $K_I = 22,19 \sqrt{\xi} (1 + 0,32 \xi^2) (1,04 + 0,32 \xi^2 - 0,11 \xi^4)$.

На основі формул (16) і (17) на рис. 2 побудовані графічні залежності довговічності t_* труби з тріщиною від її початкового розміру ε_0 (крива 1 – неопромінена труба; крива 2 – опромінена труба). Як видно з рис. 2, радіаційне опромінення труби значно скорочує її довговічність.

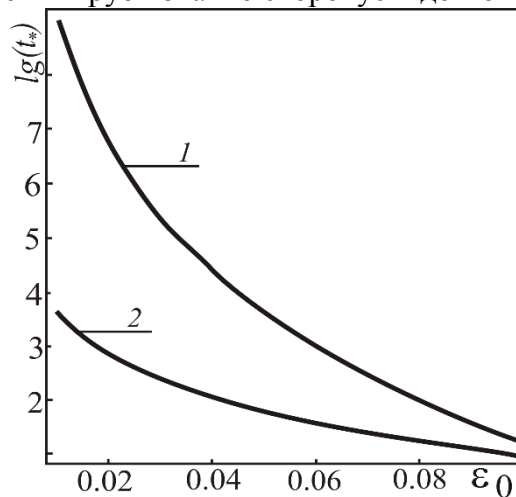


Рис. 2. Графічна залежність залишкового ресурсу труби t_* від ε_0 :
1 – неопромінена труба; 2 – опромінена труба.

Дослідимо, як впливає радіаційне опромінення на напружено-деформований стан балкової конструкції, вільної від навантаження, підсиленої з нижньої поверхні сталеву смуговою арматурою товщиною h . Обчислювальний експеримент виконаємо з використанням тих самих вихідних даних. Модуль Юнга і коефіцієнт Пуассона сталі, відповідно, дорівнюють $21 \cdot 10^4$ МПа та 0,25.

Загальновідомо, що бетон чинить опір стиску і значно гірше – розтягу. Тому включення сталеві арматури в розтягнуту зону конструктивних елементів суттєво підвищує їх несучу здатність [4; 7; 12; 16–22]. Зазначимо, що сталь монтується не лише в розтягнутій зоні, а й у зоні стиску – для забезпечення жорсткості арматурного каркаса. Розглянемо випадок смугові арматури, що дає підстави перейти від просторово тривимірної до плоскої задачі теорії пружності, й використаємо метод скінчених елементів [23–26].

Розрахунки показують, що монтування поздовжнього шару арматури сприяє зменшенню 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. 3 показано переміщення u_y точок нижньої поверхні балки, підсиленої знизу смуговою сталевією арматурою товщиною $h = H/50$ за випадку, коли матеріал усієї балки рівномірно в об'ємі 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).

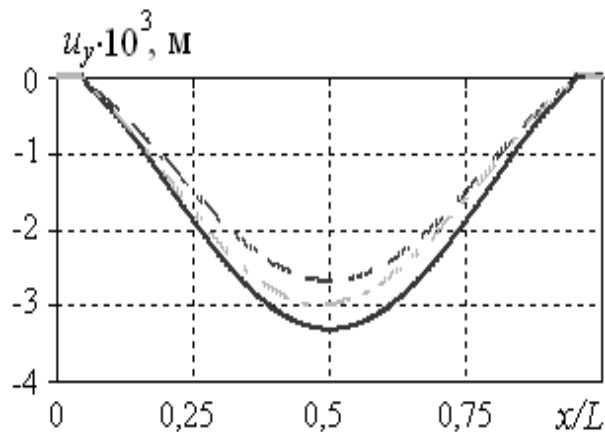


Рис. 3. Прогин прогону залізобетонної балки на опорах з накопиченою радіацією (суцільна лінія), у вихідному стані (штрихова лінія) й у разі, коли опромінювалася лише ліва половина прогону (штрих-пунктирна лінія).

На рис. 4 і 5 для зазначених випадків показано відповідно напруження на верхній і нижній поверхнях залізобетонної конструкції. Власне кажучи, рис. 4 відображає напружений стан у сталевій арматурі.

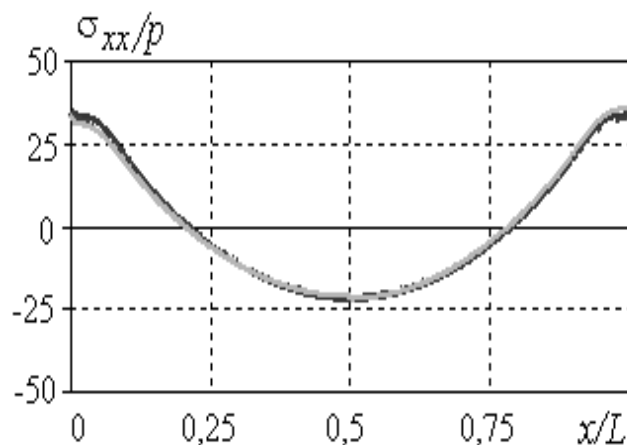


Рис. 4. Напруження на навантаженій поверхні прогону залізобетонної балки за накопиченого опромінення всій балці, у вихідному стані та коли опромінювалася ліва половина прогону.

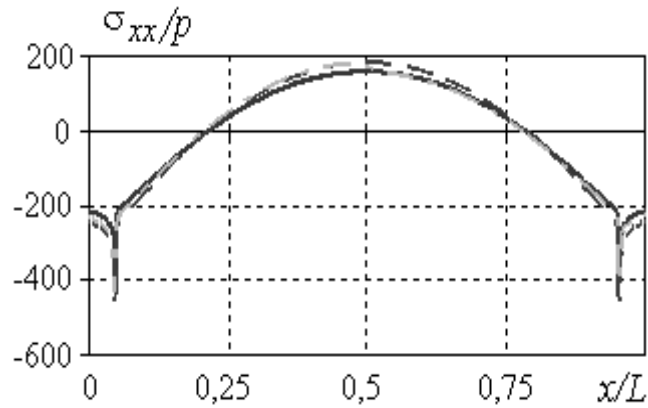


Рис. 5. Напруження у сталевій арматурі (на нижній поверхні прогону залізобетонної балки) за накопиченого опромінення у бетоні всієї конструкції (суцільна лінія), у вихідному стані (штрихова лінія) та коли опромінювалася ліва половина прогону (штрих-пунктирна лінія).

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. 6).

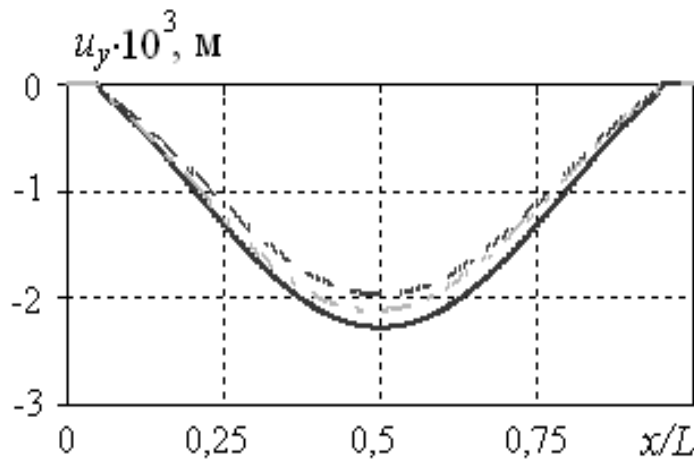


Рис. 6. Прогин прогону залізобетонної балки, підсиленої з обох поверхонь сталеву арматурою товщиною $h = H/50$.

Дослідження збіжності та достовірності отримуваних результатів за допомогою критерію практичної збіжності (за допомогою порівняння розв'язків, отриманих на різних скінченно-елементних поділах ділянки і в межах різних математичних моделей) показали, 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, й кубів – у разі просторово тривимірної задачі).

Висновки. На основі енергетичного підходу сформульовані розрахункові моделі для визначення залишкового ресурсу елементів конструкцій за силового навантаження, лазерного і радіаційного опромінення. Проаналізовано вплив радіаційного опромінення на характеристики високотемпературної міцності конструкційних матеріалів, а також енергетичного підходу для визначення періоду докритичного збільшення тріщин високотемпературної повзучості в елементах конструкцій за довготривалого статичного навантаження й радіаційного опромінення. Конкретний розрахунок ресурсу елемента конструкції показав, що радіаційне опромінення може знизити його залишковий ресурс у декілька разів. Показано, що коефіцієнт запасу міцності конструкції зі збільшенням дози радіації зменшується насамперед через зменшення межі текучості бетону.

Бібліографічний список

- Андрейків О. Є. Визначення залишкової довговічності тонкостінних елементів конструкцій при двохосьовому навантаженні / О. Є. Андрейків, М. Б. Кіт // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2006. – № 1. – С. 11–16.
- Андрейків О. Є. Докритичний ріст плоскої тріщини в тривимірному тілі за високотемпературної повзучості / О. Є. Андрейків, Н. Б. Сас // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2008. – № 2. – С. 19–26.
- Андрейків О. Є. Математична модель для визначення періоду докритичного поширення тріщин високотемпературної повзучості в твердих тілах / О. Є. Андрейків, Н. Б. Сас // Доп. НАН України. – 2006. – № 5. – С. 47–52.
- Андрейків О. Є. Механіка руйнування металічних пластин при високотемпературній повзучості / О. Є. Андрейків, Н. Б. Сас // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2006. – № 2. – С. 62–68.
- Андрейкив А. Е. Усталостное разрушение и долговечность конструкций / А. Е. Андрейкив, А. И. Дарчук. – К. : Наук. думка, 1992. – 184 с.
- Бабей Ю. И. Физические основы импульсного упрочнения стали и чугуна / Ю. И. Бабей. – К. : Наук. думка, 1988. – 240 с.
- Бартелими Б. Огнестойкость строительных конструкций / Б. Бартелими, Ж. Крюппа. – М. : Стройиздат, 1985. – 256 с.
- Влияние реакторных излучений на сопротивление ползучести и длительную прочность аустенитной нержавеющей стали ОХ16Н15МЗБ / [Писаренко Г. С., Кисельовский В. Н., Полевой Д. В. и др.] // Проблемы прочности. – 1974. – № 4. – С. 3-8.
- Ибрагимов Ш. Ш. Радиационные повреждения металлов и сплавов / Ш. Ш. Ибрагимов, В. В. Кирсанов, Ю. С. Пятилетов. – М. : Энергоатомиздат, 1985.

– 240 с.

Ковчик С. Е. Характеристики кратковременной трещиностойкости материалов и методы их определения. Механика разрушения и прочность материалов : справ. пособие / С. Е. Ковчик, Е. М. Морозов. – К. : Наук. думка, 1988. – Т. 3. – 436 с.

Оценка вязкости разрушения корпусных материалов реактора ВВЭР-1000 / [Гринник Э. У., Ревка В. Н., Чирко Л. И., Чайковский Ю. В.] // Ядерная физика та енергетика. – 2007. – Т. 19, № 1. – С. 83–88.

Берг О. Я. Физические основы теории прочности бетона и железобетона / О. Я. Берг. – М. : Стройиздат, 1962. – 96 с.

Божидарнік В. В. Механіка руйнування, міцність і довговічність неперервно армованих композитів : монографія : у 2 т. / В. В. Божидарнік, О. Є. Андрейків, Г. Т. Сулим. – Луцьк : Надстир'я, 2007. – Т. 1: Основи механіки руйнування неперервно армованих композитів. – 2007. – 400 с.

Божидарнік В. В. Механіка руйнування, міцність і довговічність неперервно армованих композитів : монографія : у 2 т. / В. В. Божидарнік, О. Є. Андрейків, Г. Т. Сулим. – Луцьк : Надстир'я, 2007. – Т. 2: Математичні методи в задачах механіки руйнування неперервно армованих композитів. – 2007. – 424 с.

Добрянський І. Вплив перепаду температур на несучу здатність та експлуатаційну надійність сталобетонних балок / І. Добрянський, А. Грицевич // Вісник Львівського державного аграрного університету : архітектура і сільськогосподарське будівництво. – 2003. – № 4. – С. 15-18.

Добрянський І. М. Врахування конвективного теплообміну при дослідженні процесів термічного розтріскування в бетонних зразках за дії лазерного опромінення на основі моделі крихкого руйнування / І. М. Добрянський // Машинознавство. – 2012. – № 1 (175). – С. 32–35.

Добрянський І. Вплив зміни температури від -30°C до $+70^{\circ}\text{C}$ на несучу здатність сталобетонних балок / І. Добрянський, А. Грицевич // Вісник Львівського державного аграрного університету : архітектура і сільськогосподарське будівництво. – 2007. – № 8. – С. 95-99.

Добрянський І. Корозія і захист арматури в бетоні/ І. Добрянський, І. Ніконець, В. Молодих // Вісник Львівського державного аграрного університету : архітектура і сільськогосподарське будівництво. – 2002. – № 3. – С. 18-21.

Добрянський І. М. Напружений стан елементів бетонних конструкцій за дії загального і локалізованого іонізуючого опромінення / І. М. Добрянський // Машинознавство. – 2011. – № 5–6 (167–168). – С.49–51.

Дубровский В. Б. Бетоны в защите ядерных реакторов при высоких температурах / В. Б. Дубровский. – М. : Стройиздат, 1967. – 121 с.

Мурашов В. И. Трещиностойкость, жесткость и прочность железобетона / В. И. Мурашов. – М. : Изд-во Мин. стр-ва предприятий машиностроения, 1950. – 350 с.

Безухов Н. И. Основы теории упругости, пластичности и ползучести / Н. И. Безухов. – М. : Высш. шк., 1961. – 583 с.

Бенерджи П. Методы граничных элементов в прикладных науках /

П. Бенерджи, Р. Баттерфилд. – М. : Мир, 1984. – 494 с.
Демидов С. П. Теория упругости / С. П. Демидов. – М. : Вища шк., 1979. – 432 с.
Морозов Е. М. Метод конечных элементов в механике разрушения / Е. М. Морозов, Г. П. Никишков. – М. : Наука, 1980. – 256 с.
Сахаров А. С. Метод конечных элементов в механике твердых тел / А. С. Сахаров, И. Альтенбах. – К. : Вища шк., 1982. – 480 с.

Добрянський І., Добрянська Л., Іваник Є. Моделювання визначення втрати міцності й довговічності конструктивних елементів енергетики, будівель та інженерних систем

Сформульовано підходи до визначення довготривалої міцності й довговічності елементів конструкцій за довготривалого силового навантаження й опромінення фізичними джерелами.

Ключові слова: міцність, довговічність, іонізоване опромінення, температурні напруження, деформації, енергетичний підхід.

Dobryansky I., Dobryanska L., Ivanyk E. Modelling of determining of the loss of strength and durability of the structural elements of energy, buildings and engineering system

Computational models are formulated to determine the long-term strength and durability of structural elements for long-term power load and natural sources of irradiation.

Key words: strength, long life, ionization irradiation, thermal stresses, deformation, energy approach.

Добрянский И., Добрянская Л., Иваник Е. Моделирование определения утери прочности и долговечности конструктивных элементов энергетики, строений, инженерных систем

Сформулированы подходы к определению длительной прочности и долговечности элементов конструкций в условиях силового нагружения и облучения физическими источниками.

Ключевые слова: прочность, долговечность, ионизирующее облучение, температурные напряжения, деформации, энергетический подход.