

## МОДЕЛЮВАННЯ СТАРІННЯ СТАЛЕЙ ПРИ ВИЗНАЧЕННІ РЕСУРСУ МЕТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ АЕС

Л. Б. Шаміс, Т. І. Матченко, Л. Ф. Первушова

*ВАТ «Київський науково-дослідний та проектно-конструкторський інститут  
«Енергопроект», Київ*

Викладено основи теорії деформаційного старіння сталей, на підставі якої будується методика розрахунків довговічності сталевих конструкцій при нормальних умовах та аварійних режимах експлуатації.

*Ключові слова:* старіння, ресурс, металеві конструкції.

### Вступ

Призначений проектом строк експлуатації енергоблоків АЕС з високою достовірністю дає впевненість, що критичні елементи, як і блок АЕС у цілому, за умови відповідного технічного обслуговування, ремонтів та експлуатаційного контролю протягом цього строку будуть відповідати критеріям безпеки.

Експлуатація енергоблока АЕС після досягнення проектного строку експлуатації є можливою лише в разі внесення змін до ліцензії на право здійснення діяльності «експлуатація ядерної установки», що стосуються строків експлуатації енергоблоків.

Експлуатація в надпроектний строк може бути дозволена тільки за умови, що рівень безпеки енергоблока АЕС є не нижчим, ніж установлений у чинних нормах і правилах з ядерної та радіаційної безпеки.

Експлуатуюча організація, здійснивши періодичну переоцінку безпеки АЕС відповідно до Загальних положень забезпечення безпеки атомних станцій [1], подає до Держатомрегулювання України Звіт з періодичної оцінки безпеки (ЗПОБ) разом з пропозиціями щодо призначення нового строку експлуатації енергоблока, який може бути більшим або меншим, ніж призначений проектом.

Якщо висновком державної експертизи ядерної та радіаційної безпеки буде підтверджено обґрунтованість запропонованого строку подальшої експлуатації енергоблока, це може бути підставою для прийняття рішення щодо внесення відповідних змін до ліцензії на право здійснення діяльності «експлуатація ядерної установки».

У ЗПОБ необхідно надати аналіз безпеки енергоблока АЕС з урахуванням фундаментальних принципів безпеки та факторів безпеки, які, відповідно до рекомендацій МАГАТЕ, розподіляються за такими групами:

1. Технічний стан систем та елементів: проекту енергоблока АЕС; поточний технічний стан систем та елементів; кваліфікація обладнання; старіння.
2. Аналіз безпеки: детерміністичний аналіз безпеки; імовірнісний аналіз безпеки; аналіз наслідків внутрішніх та зовнішніх подій.
3. Експлуатаційна безпека та зворотний зв'язок від досвіду експлуатації: експлуатаційна безпека; використання досвіду інших АЕС і результатів наукових досліджень.
4. Управління: організація та управління; експлуатаційна документація; людський фактор.
5. Аварійна готовність і планування.
6. Вплив на навколишнє середовище.

Одним із факторів, що визначає безпеку конструкції, є старіння. Метою розгляду є визначення ефективності програми експлуатуючої організації з управління старінням, що здатна забезпечити підтримання функцій безпеки енергоблока АЕС на необхідному рівні при подальшій експлуатації енергоблока АЕС.

До обсягу розгляду цього фактора включається:

- політика експлуатуючої організації щодо управління старінням, організація управління старінням, ресурси для його здійснення;
- методи та критерії для визначення систем та елементів, що мають бути внесені до програми управління старінням;
- перелік систем і елементів, які включені до програми управління старінням (окремо виділяються критичні елементи енергоблока АЕС);
- відомості, що забезпечують підтримку управління старінням;
- дослідження та відомості про механізми деградації, які потенційно можуть вплинути на проектні функції систем та елементів, важливих для безпеки;
- дослідження домінуючих механізмів деградації внаслідок старіння;
- наявність інформації, необхідної для оцінки деградації внаслідок старіння, у тому числі в проектній, експлуатаційній і ремонтній документації;
- ефективність програм технічного обслуговування і ремонтів для управління старінням елементів, що не підлягають заміні;
- заходи щодо контролю і послаблення механізмів та ефектів старіння;
- встановлені критерії та межі безпеки систем і елементів;
- прогноз технічного стану систем та елементів, включаючи проектні межі безпеки, та інші передумови, що обмежують строк експлуатації енергоблока АЕС.

### Основний зміст

В якості критерію довговічності сталі при малоциклічній втомі та одноосному розтягу (кількість циклів не більше  $10^5$ ) Л. Ф. Коффінім була запропонована залежність [2]

$$N_p = C \Delta \varepsilon_{nl}^{-k},$$

де  $N_p$  – кількість циклів до руйнування;  $\Delta \varepsilon_{nl}$  – діапазон змін у циклі пластичних деформацій;  $C$ ,  $k$  – емпіричні константи.

$$C = \left( \frac{1}{2} \ln \frac{1}{1-\psi} \right)^2,$$

де  $\psi$  – відносне зменшення поперечного перерізу зразка при статичному розриві.

Для відпущеної сталі було отримано  $C = 0,129$ ;  $k = 2$ ; для наклепаної  $C = 0,0146$ ;  $k = 1,86$ .

Використовуючи поняття максимальної умовної напруги циклу при допущенні пружної роботи матеріалу  $\sigma_{y, \max}$ , можна отримати

$$\Delta \varepsilon_{nl} = \frac{1}{E} (\sigma_{y, \max} - 2\sigma_a).$$

С. С. Менсон зробив спробу [3] розробити спрощений метод оцінки межі високотемпературної втоми лабораторних зразків при знакомінному циклічному деформуванні. У результаті був запропонований критерій для малоциклічного руйнування при кімнатній температурі та при жорсткому одноосному навантаженні

$$\Delta \varepsilon = 3.5 \frac{\sigma_B}{E} N_p^{-0.12} + \left( \ln \frac{1}{1-\psi} \right) N_p^{-0.6}, \quad (1)$$

де  $\sigma_B$  – тимчасовий опір розриву при одноосному розтягу.

У формулі (1) перший член правої частини виражає пружну деформацію  $\Delta \varepsilon_y$ , а другий – пластичну  $\Delta \varepsilon_{nl}$ .

Існують два підходи до розв'язання проблеми довговічності. У першому, який з'явився історично раніше, робляться спроби сформулювати критерії довговічності на основі інваріантів теорії пластичності: інтенсивності напружень чи деформацій головних зсувів. Але ці критерії не завжди достатньо добре збігаються з даними експериментів. У другому за основу приймається розмах максимальних деформацій у циклі  $\Delta\varepsilon_{\max}$  або розмах максимальних деформацій зсуву в циклі  $\Delta\gamma_{\max}$ , або інтенсивність розмахів деформацій

$$\Delta\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\Delta\varepsilon_1 - \Delta\varepsilon_2)^2 + (\Delta\varepsilon_2 - \Delta\varepsilon_3)^2 + (\Delta\varepsilon_3 - \Delta\varepsilon_1)^2}.$$

Відповідні критерії руйнування в цьому випадку мають такий вигляд:

$$N_p = C_1 \Delta\varepsilon_{\max}^{-k_1};$$

$$N_p = C_2 \Delta\gamma_{\max}^{-k_2};$$

$$N_p = C_3 \Delta\varepsilon_i^{-k_3}.$$

Тут  $\Delta\varepsilon_{\max}$ ,  $\Delta\gamma_{\max}$ ,  $\Delta\varepsilon_i$  виражаються через повні деформації. Аналогічні формули можна отримати, використовуючи розмахи пластичних деформацій, що є методично більш правильним.

А. Г. Костюком і його співавторами в [5, 6] показано, що найкращу збіжність з експериментами при складному напруженому стані дає критерій інтенсивності розмахів повних деформацій.

Була запропонована гіпотеза, що для однакових циклів критеріїв руйнування має таку структуру:

$$1/N_p = f(1/N_0, \lambda).$$

У цій формулі  $N_p$  – дійсна кількість циклів до руйнування;  $1/N_p$  – ступінь пошкодження за один цикл;  $1/N_0$  – ступінь пошкодження, обумовлена тільки повторною пластичною деформацією без урахування повзучості;  $\lambda$  – ступінь пошкодження від повзучості:

$$\lambda = \int_0^{\Delta\tau} \frac{d\tau}{\tau_p},$$

де  $\tau_p(\sigma, t)$  – час до руйнування внаслідок повзучості (без урахування циклічного деформування) при постійних напруженнях  $\sigma$  і температурі  $t$ ;  $\Delta\tau$  – тривалість одного циклу.

Залежність була запропонована як

$$\left(\frac{N_p}{N_0}\right)^\alpha + (N_p \lambda)^\beta = 1,$$

де  $\alpha, \beta$  – експериментальні константи.

При  $\alpha = \beta = 1$  умова переходить у гіпотезу лінійного підсумовування пошкоджень

$$1/N_p = \frac{1}{N_0} + \lambda. \quad (2)$$

Г. А. Туляков на базі виконаних у ЦНДІТмаш дослідів [4, 7] прийшов до висновку, що лінійний закон підсумовування відносних довговічностей при сумісній дії термоциклічного та статичного навантажень у загальному випадку не виконується. Він увів допущення, що граничні криві довговічності при комбінованій дії статичного та термоциклічного навантажень виражаються у відносних координатах сімейством парабол, симетрично розташованих

по обидва боки від прямої, що відповідає лінійному закону підсумовування. У результаті для постійної робочої температури отримано

$$\frac{N}{N_p} + \frac{\tau}{\tau_p} = A_c \leq 1 + \alpha_c \sqrt{2} \left[ 1 - \left( \frac{N}{N_p} - \frac{\tau}{\tau_p} \right)^2 \right], \quad (3)$$

де  $A_c$  – параметр відносної сумарної довговічності;  $\alpha_c$  – коефіцієнт підсумовування, що визначається експериментально й знаходиться в межах  $0 \leq |\alpha_c| \leq \frac{\sqrt{2}}{2}$ , характеризує ступінь відхилення кривої граничних амплітуд від лінійного закону й залежить у загальному випадку від послідовності й тривалості прикладання навантажень, рівня напруження та механічних властивостей матеріалу;  $N, N_p$  – задана та руйнівна кількість термоциклів навантажень зразка з амплітудою  $\Delta \varepsilon$ ;  $\tau, \tau_p$  – тривалість статичного навантаження з напруженням  $\sigma$  і час до руйнування зразка за кривими тривалої міцності.

Тут дається припущення, що в умовах термічної втоми й повзучості при складнонапруженому стані зберігаються ступеневі залежності довговічності, які встановлені згідно з даними випробувань при лінійному напруженому стані. Формулу (3) вважають більш точною, але вона складніша за формулу (2) і не має достатніх даних про  $\alpha_c$ .

Л. Н. Мінкіним (ЦНДІТмаш) досліджувалась [8] циклічна міцність зварних з'єднань паропроводів з теплостійких сталей. Досліди проводились при малоциклічному і при тривалому статичному навантаженні. Застосовувались м'який і жорсткий режими навантаження. Циклічно змінювались згинаючі моменти та внутрішній тиск при підвищеній температурі пари, що пропускають через трубу (до 565 °С). Досліджувались впливи асиметрії циклу, частоти зміни навантажень, тривалість витримування в циклі. У результаті була запропонована залежність, яка дає змогу визначати кількість циклів до руйнування з урахуванням витримування в циклах

$$N_p = 0.7 \cdot 10^{-2} N_{pk} (\tau_{ec})^{-0.4},$$

де  $N_{pk}$  – кількість циклів до руйнування при кімнатній температурі;  $\tau_{ec}$  – тривалість витримування в циклах, р.

Ефект змінювання механічних властивостей сталі в часі називають старінням. Старіння відбувається внаслідок фізико-хімічних процесів або під впливом різного роду полів, наприклад температурного, радіаційного тощо. Надзвичайно важливим з точки зору деформування та руйнування є процес накопичення пошкоджень у сталі під впливом деформацій. Провідним тут є процес накопичення міжзернових мікротріщин унаслідок дифузії вакансій і дислокацій із тіла зерна до його кордонів. Унаслідок цього зменшується щільність, що приводить до збільшення об'ємних деформацій.

Не зосереджуючись на фізичній інтерпретації структури пошкодження, будемо характеризувати його скалярною величиною  $\omega_k$ . Очевидно, що об'ємні деформації зворотно пропорційні концентрації залишкових зв'язків  $(1 - \omega_k)$  і вони збільшуються при  $\omega_k \rightarrow 1$ . Приймаємо

$$\varphi_k = A_k [(1 - \omega_k)^{-1} - 1],$$

де  $\varphi_k$  – функція, яка описує зміну механічних властивостей зв'язків сталі з індексом  $k$ , що деформується, у часі  $0 \leq \omega_k \leq 1$

$$(1 - \omega_k)^{-1} = e^{\mu_k \cdot \tau},$$

$A_k$  – коефіцієнт пропорційності.

Тоді  $\varphi_k = \varphi_0(\tau) \cdot A_k \cdot (e^{\mu_k \cdot \tau} - 1)$ .

$$\frac{\partial \omega}{\partial \tau} = \mu_k (1 - \omega_k),$$

де  $\mu_k = \tau_p^1 / \tau_p^k$ ;  $\tau_p^1, \tau_p^k$  – час розриву зв'язків з індексом 1 і  $k$ .

При оцінці ресурсу сталі з урахуванням характеру навантаження: для статично навантажених конструкцій характерно ресурс сталі визначати за деформацією; при циклічних навантаженнях – за коефіцієнтом інтенсивності напружень; при ударних навантаженнях конструкцій без тріщин – за ударною в'язкістю; для конструкцій, що мають тріщини й можуть бути динамічно навантажені, – за динамічним коефіцієнтом інтенсивності напружень (КІН).

При оцінці ресурсу пластичних сталей доцільно ресурс визначати за деформацією, при оцінці крихких сталей – за КІН.

Зміна властивостей сталі внаслідок старіння враховується впровадженням у розрахунок зсувів критичної температури крихкості  $T_k$  при різних впливах у процесі експлуатації.

Номинальні значення критичного КІН  $K_{IC}$  отримуються як огинаюча двох кривих: одна з них знаходиться діленням ординат початкової кривої  $K_{IC}$ ,  $(T - T_k)$  на запас міцності  $n_k$  (як правило,  $n_k = 2$ ); друга – зміщенням початкової кривої  $K_{IC}$  у напрямку осі абсцис на температурний запас  $\Delta T = 30$  °С.

Опір крихкому руйнуванню вважається забезпеченим, якщо для розрахункової тріщини виконується умова  $K_I \leq \beta [K_{IC}]$ , де  $\beta > 1$  – коефіцієнт, який залежить від умов експлуатації.

У нормах розрахунків ASME 1592-7 в якості одного з методів оцінки утомних пошкоджень пропонується таке рівняння:

$$\varepsilon_T = K_\varepsilon \cdot \varepsilon^\circ + K_\varepsilon^2 \cdot p + K_T \cdot \varepsilon_F,$$

де  $\varepsilon_T$  – повна деформація;  $\varepsilon^\circ$  – пружна деформація;  $p$  – непружна деформація;  $\varepsilon_F$  – пікова температурна деформація.

У ч. 8 ASME 1592 пропонується інша залежність:

$$\varepsilon_T = (\alpha^2 / K_\sigma) \cdot \varepsilon_n + \alpha_\sigma \cdot \varepsilon_c + K_T \cdot \varepsilon_F.$$

Для конструкцій з тріщиною встановлюється пряма пропорційна залежність руйнуючої деформації до критичного коефіцієнта інтенсивності деформацій

$$K_{Isc} = \sqrt{2\pi l_0} \cdot \varepsilon_f,$$

де  $l_0$  – початковий розмір тріщини;  $\varepsilon_f$  – деформація у вершині тріщини.

У найбільш загальному вигляді, припускаючи, що  $\varphi(\sigma_i) = K_{I\varepsilon}(\sigma_i)$ , оскільки  $K_{I\varepsilon}$  урахує пластичні властивості матеріалу, отримаємо

$$K_{I\varepsilon} \cdot \left\{ 1 + \sum_{k=1}^N A_k (1 - e^{-\lambda_k \cdot t / t_n}) + \sum_{k=1}^N B_k (e^{\mu_k \cdot t / t_p} - 1) \right\} \leq K_{I\varepsilon c}.$$

Якщо  $l_0$  – розмір початкової тріщини, при якій номінальні руйнуючі напруження дорівнюють межі міцності  $\sigma_b$ , то при  $f(K_I) = 1$

$$K_{I\varepsilon c} = \bar{\sigma}_B^{1/m_{k\varepsilon}} \cdot (\pi \cdot l_0)^{p_{k\varepsilon}/2},$$

де  $K_{I\varepsilon c}$  – критичне значення коефіцієнта інтенсивності деформацій.

Час до руйнування  $t^*$  визначається з умов

$$\varepsilon_{\max}(t^*) \leq \varepsilon_{k0}(1 - \omega); K_{I\varepsilon}(t^*) \leq K_{I\varepsilon c}(1 - \omega),$$

де  $\varepsilon_{k0}, K_{I\varepsilon c}$  – критичні значення деформацій і коефіцієнта інтенсивності деформацій.

$$P_{k\varepsilon} = \frac{2 - n(1 - m)(1 - \bar{\sigma}_n)}{1 + m},$$

де  $n = 0,5$  для тріщини;  $m$  – показник зміцнення матеріалу.

### Рівняння деформаційного ресурсу

Будь-яке рівняння, що визначає деформаційний ресурс, має ліву й праву частини у вигляді функцій часу. Інакше кажучи, з часом можуть змінюватись значення параметрів не тільки в лівій частині рівняння, але й у правій.

Розглянемо окремо співвідношення правої частини рівняння, що визначає ресурс сталі.

У багатьох випадках важко однозначно визначити умови експлуатації конструкцій, тому пропонуються наступні критерії оцінки довговічності сталі:

конструкції з конструкційних сталей, що статично й інколи циклічно навантажені без тріщин

$$\sqrt{\left(\frac{N(t)}{N_k}\right)^2 + \left(\frac{\varepsilon(t)}{\varepsilon_k(1-\omega)}\right)^2} \leq 1;$$

конструкції з конструкційних сталей, що статично й інколи циклічно навантажені й мають тріщини

$$\sqrt{\left(\frac{\varepsilon(t)}{\varepsilon_k(1-\omega)}\right)^2 + \left(\frac{K_I(t)}{K_{IC}(1-\omega)}\right)^2} \leq 1;$$

конструкції з конструкційних сталей, що постійно динамічно навантажені

$$\sqrt{\left(\frac{\mathcal{E}(t)}{KC(1-\omega)}\right)^2 + \left(\frac{K_{Ig}(t)}{K_{ICg}(1-\omega)}\right)^2} \leq 1;$$

конструкції з конструкційних сталей, які не мають тріщин і можуть бути будь-як навантажені

$$\sqrt{\left(\frac{N(t)}{N_k}\right)^2 + \left(\frac{\varepsilon(t)}{\varepsilon_k(1-\omega)}\right)^2 + \left(\frac{\mathcal{E}(t)}{KC(1-\omega)}\right)^2} \leq 1;$$

конструкції із конструкційних сталей, які мають тріщини й можуть бути будь-як навантажені

$$\sqrt{\left(\frac{K_I(t)}{K_{IC}(1-\omega)}\right)^2 + \left(\frac{K_{Ig}(t)}{K_{ICg}(1-\omega)}\right)^2 + \left(\frac{\varepsilon(t)}{\varepsilon_k(1-\omega)}\right)^2} \leq 1.$$

Для посудини під тиском ресурс доцільно визначати за критерієм

$$\sqrt{\left(\frac{\sigma(t)}{R(1-\omega)}\right)^2 + \left(\frac{\varepsilon(t)}{\varepsilon_k(1-\omega)}\right)^2 + \left(\frac{N(t)}{N_k}\right)^2} \leq 1.$$

У наведених рівняннях:  $\mathcal{E}$  – енергія можливого удару;  $KC$  – ударна в'язкість;  $N, N_k$  – кількість циклів навантаження й критична кількість циклів;  $K_{Ig}, K_{ICg}$  – динамічний коефіцієнт інтенсивності напружень і критичне значення;  $K_I, K_{IC}$  – коефіцієнт інтенсивності напружень

і критичне значення;  $\varepsilon, \varepsilon_k$  – накопичені деформації від початку експлуатації й критично допустимі;  $\sigma, R$  – напруження в сталі й критично допустимі.

Після тривалої експлуатації металевих конструкцій в агресивному середовищі залишковий ресурс доцільно визначати за значенням відносного здовження зразка після розриву ( $\delta, \%$ )

$$\delta_\tau = \delta_0(1 - \omega),$$

$$\omega = \sqrt{\left(\frac{\omega_H}{[\omega_H]}\right)^2 + \left(\frac{\omega_T}{[\omega_T]}\right)^2 + \left(\frac{\omega_\varepsilon}{[\omega_\varepsilon]}\right)^2} \leq 1,$$

де  $\omega$  – параметр пошкодження ( $0 < \omega < 1$ );  $\omega_\varepsilon, [\omega_\varepsilon]$  – пошкодження внаслідок деформації та його критичне значення;  $\omega_H, [\omega_H]$  – пошкодження внаслідок радіаційного опромінювання та його критичне значення;  $\omega_T, [\omega_T]$  – пошкодження внаслідок термічного впливу та його критичне значення;  $\delta_\tau, \delta_0$  – відносне здовження після тривалої експлуатації й на початку експлуатації відповідно.

Розтріскування внаслідок зростання граничної деформації матеріалу  $\varepsilon_p$  визначається відношенням

$$E^{-1}[\sigma_x - \nu \cdot (\sigma_y + \sigma_z) + \alpha \cdot \Delta T] \geq [\varepsilon_p],$$

де  $\nu$  – коефіцієнт Пуассона;  $\Delta T$  – зміна температури;  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  – компоненти пружно деформованого стану в точці.

Структурний параметр пошкодження визначається співвідношенням

$$\omega = \frac{E^{-1}[\sigma_x - \nu \cdot (\sigma_y + \sigma_z) + \alpha \cdot \Delta T]}{[\varepsilon_p]},$$

Пошкодження  $\omega$  може змінюватись у межах ( $0 < \omega \leq 1$ ).

Характеристики утомного зварного з'єднання в умовах малого числа циклів навантаження представляють у вигляді графіка залежності деформації за цикл від числа циклів до виникнення тріщини.

У відповідності до рівняння Коффіна можна записати

$$N_c^{1/2} = \left[ \frac{1}{2} \ln \left( \frac{100}{100 - \% \varphi} \right) \right] / (\Delta \varepsilon_t - \Delta \varepsilon_e),$$

де  $N_c$  – кількість циклів деформації ( $\Delta \varepsilon_t$ ) до виникнення тріщини;  $\Delta \varepsilon_t$  – розмах пластичної деформації за один цикл;  $\Delta \varepsilon_e$  – розмах пружної деформації за один цикл;  $\varphi$  – відносне поперечне звуження у відсотках, яке можна визначити за твердістю сталі.

#### Ліва частина рівняння

На підставі аналізу великої кількості експериментальних матеріалів отримані залежності [8]

$$\log t^* = a \cdot \log \varepsilon^* + b(T),$$

При цьому для різних матеріалів:

1.  $a = const$ ;
2.  $a = a(\sigma)$ ;
3.  $a = a(\varepsilon)$ ;
4.  $a = a(T)$ ;
5.  $a = a(T, \sigma, \varepsilon)$ ,

де  $T$  – температура середовища;  $t^*$  – час до руйнування;  $\varepsilon^*$  – деформація руйнування;  $a, b$  – коефіцієнти.

Залежність часу до руйнування від температури можна визначити параметром Ларсона - Міллера [9]

$$T(c + \log t^*) = F(\varepsilon)$$

або Менсона - Хафєрда [9]

$$\frac{T - T_a}{\log t^* - \log t_a} = F(\varepsilon),$$

де  $T_a$  – температура під час  $t_a$ .

З урахуванням накопичення повзучості пошкоджень швидкість деформації моделюється залежністю

$$\dot{p}_{11} = A \cdot p_{11}^{-\alpha} \cdot \exp(\beta \cdot p_{11}) \cdot \left( \frac{\varepsilon_{11}}{1 - \omega} \right)^n,$$

де  $\varepsilon_{11}$  – деформація;  $p_{11}$  – деформація повзучості.

Коефіцієнти  $A, \alpha, \beta, n$  залежать від температури й визначаються експериментально.

Криві повзучості сталі визначаються рівнянням [10, 11]

$$\bar{p}_{11} = \sum_{k=1}^N A_k (1 - e^{-\chi_k t/t_n}) + \sum_{k=1}^N B_k (e^{\mu_k t/t_p} - 1),$$

де величини  $t_n, t_p$  залежать від температури і деформацій. Постійні  $A_k, B_k, \chi_k, \mu_k, \tau_n, \tau_p, \theta_n, \theta_p, \varepsilon_n, \varepsilon_p$  визначаються з експерименту.

Час до руйнування  $t^*$  звичайно набагато більше  $t_n$ ,  $t^*/t_n \gg 1$ . Тому рівняння для визначення  $t^*$  має вигляд

$$A_0 + \sum_{k=1}^N B_k (e^{\mu_k t/t_p} - 1) = \dot{p}_{11}^*,$$

де  $\dot{p}_{11}^*$  – деформація повзучості в момент руйнування.

У простішому випадку, коли  $N = 1$ ,  $\mu_1 = 1$ , отримуємо

$$\ln \ln \left( \frac{\dot{p}_{11}^* - A_0}{B_1} + 1 \right) = \ln \frac{t^*}{t_p}.$$

### Напрямки подальших досліджень

На основі викладених теоретичних основ старіння сталей доцільно розробити: методику моделювання пошкоджень сталі від усіх впливів агресивного середовища, теплових і радіаційних потоків;

бази даних швидкостей старіння сталей усіх марок для режимів нормальної та аварійної експлуатації;

алгоритм зміни механізмів старіння при зміні умов експлуатації сталевих конструкцій.

### Висновки

1. Запропоновано критерії визначення ресурсу конструкційних сталей залежності від домінуючого характеру навантаження.

2. Запропоновано критерії визначення пошкодження конструкційних сталей залежності від характеру впливу середовища.

3. Визначено домінуючі параметри для оцінювання ресурсу конструкційних сталей.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Загальні положення забезпечення безпеки атомних станцій, затверджені наказом Державної адміністрації ядерного регулювання України від 9 грудня 1999 року № 63 та зареєстровані у Міністерстві юстиції України 6 березня 2000 року за № 132/4353.*
2. *Coffin L.F. An investigation of thermal-stress fatigue as related to high-temperature piping flexibility // Trans. ASME. - 1957. - Vol. 79, № 7. - P. 1637 - 1651.*
3. *Manson S.S. A simple procedure for estimating high-temperature low-cycle fatigue // Experimental Mechanics. - 1968. - Vol. 8, № 8. - P. 349 - 355.*
4. *Туляков Г.А., Метельков В.А., Плеханов В.А. Об испытаниях материалов на термическую усталость при сложном напряженном состоянии // Проблемы прочности. - 1972. - № 6. - С. 109 - 113.*
5. *Костюк А.Г., Трухний А.Д., Мичулин В.Н. Критерий прочности материалов при малоцикловой усталости при сложном напряженном состоянии // Машиноведение. - 1974. - № 5. - С. 62 - 67.*
6. *Костюк А.Г., Трухний А.Д., Гецов Л.Б. О прочности деталей энергетических установок при нестационарных режимах // Теплоэнергетика. - 1965. - № 1. - С. 48 - 53.*
7. *Туляков Г.А. Критерий для оценки долговечности работы металлов при термической усталости с учетом условий эксплуатации // Теплоэнергетика. - 1973. - № 6. - С. 64 - 66.*
8. *Минкин Л.Н. Исследование прочности сварных соединений паропроводов из теплоустойчивых сталей: Автореф. дис. ... канд. техн. наук / ЦНИИТмаш. - М., 1972.*
9. *Матухов Н.А. Деформационные критерии разрушения и расчет элементов конструкций на прочность. - М.: Машиностроение, 1981.*
10. *Роботков Ю.Н. Ползучесть элементов конструкций. - М.: Наука, 1966.*
11. *Шестериков С.А. Некоторые проблемы длительной прочности и ползучести // Нелинейные модели и задачи механики деформируемого твердого тела. - М.: Наука, 1984.*

### МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАРЕНИЯ СТАЛИ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ РЕСУРСА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ АЭС

**Л. Б. Шамис, Т. И. Матченко, Л. Ф. Первушова**

Изложены основы теории деформационного старения стали, на основании которой построена методика расчетов долговечности стальных конструкций в нормальных условиях и аварийных режимах эксплуатации.

*Ключевые слова:* старение, ресурс, металлические конструкции.

### MODELING OF STEEL AGEING BY DETERMINATION OF THE RESOURCE OF METAL STRUCTURES OF NPP

**L. B. Shamis, T. I. Matchenko, L. F. Pervushova**

The bases of the theory of deformation aging of steel are expounded, on the basis of which the method of calculations of steelwork longevity in normal conditions and emergency states of working was devised.

*Keywords:* ageing, resource, metal structures.

Надійшла до редакції 25.01.10