

*Д. В. БРЕСЛАВСЬКИЙ, А. С. ХОРОШУН, А. В. СЕНЬКО, О. А. ТАТАРИНОВА, Г. О. АНИЩЕНКО*

## МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ПОВЗУЧОСТІ ТА КОРОЗІЙНОГО РОЗТРИСКУВАННЯ ТРУБ

Статтю присвячено опису методу спільного аналізу деформування та руйнування конструктивних елементів, що знаходяться в умовах високотемпературної повзучості, пов'язаного з нею накопичення прихованих пошкоджень, та в яких деякі поверхні піддані впливу агресивних середовищ. Крайова задача розв'язується з використанням методу скінченних елементів, для початкової задачі використано різницевий метод інтегрування за часом. Для аналізу корозійного розтріскування внутрішньої поверхні труби використано підхід, що полягає у виключенні з розрахункової моделі «зруйнованих» скінченних елементів, тобто тих, в яких параметр пошкоджуваності сягнув свого критичного значення, та переформування крайової задачі для моделі з новою геометрією та збереженими початковими умовами для компонентів напружено-деформованого стану та параметру пошкоджуваності у решті скінченних елементів. Для моделювання накопичення прихованої пошкоджуваності внаслідок повзучості та корозії використано підхід з врахуванням внесків приростів відповідних процесів на кожному кроці за часом. Пошкоджуваність внаслідок корозії моделюється автоматичним еволюційним рівнянням з врахуванням спеціально визначеного еквівалентного напруження на поверхні тіла. Як приклад використання методу чисельного моделювання розглянуто процес повзучості з прихованим руйнуванням матеріалу та подальше корозійне розтріскування у товстій трубі. Проаналізовано процес зростання пошкоджень у її матеріалі, оцінено співвідношення між швидкістю накопичення пошкоджень внаслідок повзучості та корозійного розтріскування на поверхні. Розроблений підхід та скінченноелементний метод розрахунку пропонується надалі застосувати для аналізу деформування та корозійного розтріскування елементів конструкцій складної геометрії, які використовуються у енергетичній та атомній промисловості.

**Ключові слова:** повзучість, пошкоджуваність, корозійне розтріскування, моделювання, метод скінченних елементів, товста труба.

*D. BRESLAVSKY, A. KHOROSHUN, A. SENKO, O. TATARINOVA, G. ANISHCHENKO*

## MODELING OF CREEP AND CORROSION CRACKING PROCESSES IN TUBES

The paper is devoted to the description of the method of joint analysis of deformation and fracture of structural elements that are in conditions of high-temperature creep, the accumulation of hidden damage associated with it, and in which some surfaces are exposed to aggressive environments. The boundary value problem is solved using the finite element method, for the initial one the finite difference method of integration over time was used. For the analysis of corrosion cracking of the inner surface of the tube, an approach was used that consists in excluding from the calculation model the “destroyed” finite elements, i.e. those in which the damage parameter has reached its critical value, and reformulating the boundary value problem for the model with a new geometry and preserved initial conditions for the components of the stress-strain state and the damage parameter in the remained finite elements. To simulate the accumulation of hidden damage due to creep and corrosion, an approach was used that takes into account the contributions of the increments of the corresponding processes at each time step. Corrosion damage is modeled by an auto-model evolution equation taking into account a specially defined equivalent stress on the surface of the body. As an example of using the numerical modeling method, the creep process with material damage accumulation and subsequent corrosion cracking in a thick tube is considered. The process of damage growth in its material is analyzed, the ratio between the rates of damage accumulation due to creep and corrosion cracking on the surface is estimated. The developed approach and finite element calculation method are proposed to be further applied to the analysis of deformation and corrosion cracking of structural elements of complex geometry used in the power and nuclear engineering.

**Key words:** creep, damage, stress corrosion cracking, modeling, finite element method, thick tube.

**Вступ.** Наявність агресивних середовищ може істотно інтенсифікувати процеси накопичення пошкоджень при підвищених температурах, коли в матеріалі конструктивних елементів з часом розвиваються деформації повзучості. Корозійне розтріскування поверхні при цьому може бути основним чинником виходу з ладу конструкції в цілому або її частини [1]. Аналіз спільного впливу підвищених температур та агресивного середовища є основним елементом робіт із забезпечення потрібної надійності та довговічності конструкцій. На цьому шляху є обов'язковим як експериментальне дослідження довготривалих властивостей матеріалів при корозійних впливах, так й розробка розрахункових підходів та методів для моделювання процесів, що розглядаються [2]. У цьому дослідженні зосередимось на останньому завданні.

Розрахункові методи оцінювання деформування та руйнування в умовах корозії та пов'язаного з нею накопичення прихованих пошкоджень є досить розвиненими, основні підходи до їхньої розробки та використання викладено в роботах [2-5]. Досліджень, присвячених розрахунковому аналізу спільної дії високотемпературної повзучості конструктивних елементів, на поверхнях яких мають місце корозійні впливи, значно менше, але останнім часом спостерігається підвищена увага до цього питання. В роботі [6] розглянуто різні моделі, що використовуються для дослідження впливу повзучості на розтріскування, викликане корозією. Розглядаються товстостінні циліндри, на поверхні яких накопичується іржа, які моделюються за допомогою напіваналітичних або чисельних методів. Авторами робіт [7, 8] для спільного аналізу повзучості та корозії

© Д. В. Бреславський, А. С. Хорошун, А. В. Сенько, О. А. Татарінова, Г. О. Аніщенко 2025



**Дослідницька стаття:** Цю статтю опубліковано видавництвом НТУ «ХП» у збірнику «Вісник Національного технічного університету «ХП» Серія: Динаміка та міцність машин». Ця стаття поширюється за міжнародною ліцензією [Creative Commons Attribution \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). **Конфлікт інтересів:** Автор/и заявив/или про відсутність конфлікту.



у товстостінній трубі використано метод зважених відхилів у формі Гальоркіна спільно з методом R-функцій.

Як й в інших галузях нелінійної механіки, для розрахунків дуже широко залучається метод скінченних елементів (МСЕ). Авторами роботи [9] досліджено процес зростання тріщин повзучості за підвищених температур у реакторі з розплавленою соллою торію (TMSR). Використано модель пошкоджуваності внаслідок повзучості Лю та Мураками. Розрахунки МСЕ проводились для оцінювання розтягу зразків з тріщиною при повзучості. Запропонований метод чисельного аналізу було застосовано для прогнозування терміну служби резервуара під тиском. В роботі [10] модель часу до руйнування труби була розроблена з використанням чисельного скінченноелементного аналізу в'язкопластичної механічної поведінки матеріалу та модифікованої моделі росту пошкоджень Качанова. Авторами статті [11] за допомогою МСЕ виконано чисельний аналіз напружено-деформованого стану прямолінійних перерізів теплообмінних труб парогенераторів, виготовлених з нержавіючої хромонікелевої сталі 08X18H10T, з урахуванням насичення стінок воднем та дії агресивних середовищ. У роботі [12] представлено аналіз високотемпературного корозійного руйнування лопатки турбіни газотурбінного двигуна. Для визначення напруженого стану сегмента лопатки в робочих умовах було використано нелінійний метод скінченних елементів. Скінченноелементне та експериментальне дослідження характеристик повзучості та стійкості до окислення за високих температур хром-алюмінієвих сплавів було виконано авторами [13]. У статті [14] представлено підхід, що інтегрує традиційний лінійний метод скінченних елементів та ймовірнісний підхід до проектування радіатора важкої техніки з урахуванням дії внутрішнього тиску та інших факторів шляхом включення невизначеності в обчислювальну модель. Огляд інших результатів розрахункових досліджень деформування та руйнування в умовах корозійних впливів міститься в роботі [15].

Як видно з огляду, використання для чисельного моделювання повзучості конструктивних елементів, що триває при дії агресивних середовищ на їхню поверхню, методу скінченних елементів є доцільним та ефективним. Такий підхід буде використано й в даній роботі. Як приклад, буде розглянуто товстостінну трубу. На відміну від вже реалізованих підходів, для чисельного моделювання процесів накопичення прихованої пошкоджуваності різних типів розглядатиметься еволюційне рівняння, що комбінує їхні впливи шляхом сумування відповідних диференціалів. Застосування МСЕ надає можливість ефективного використання такого підходу в граничних областях конструктивних елементів, де мають місце корозійні впливи.

**Математичне формулювання задачі та опис еволюційних рівнянь.** Процеси повзучості та накопичення прихованої пошкоджуваності на поверхні конструктивних елементів, що знаходяться під дією агресивних середовищ при високих температурах, супроводжуються корозійним розтріскуванням поверхонь. Для математичного опису таких складних процесів, що взаємодіють, є необхідним спільне формулювання законів, що описують накопичення пошкоджень внаслідок як повзучості, так й корозії. При цьому внаслідок сумісності деформацій є необхідним розгляд всього континууму точок конструктивного елементу, що розглядається. У зв'язку з цим розглядається повне математичне формулювання задачі.

В даному дослідженні обмежимось розглядом труб, внутрішня поверхня яких є навантаженою внутрішнім тиском. Дану поверхню піддано впливу агресивного корозійного середовища. Значення тиску вважається таким, дія якого не призводить до виникнення пластичних деформацій. Задача розв'язується у постановці плоскої деформації. Розглядається тіло об'ємом  $V$  з поверхнею  $S$ . На частині поверхні  $S_1$ , що є й внутрішньою поверхнею, діє внутрішній тиск  $p$ , цю ж частину поверхні піддано корозійному впливу. Граничні умови першого роду задаються для частини поверхні  $S_2$ .

Основна система рівнянь для опису даної задачі [8] у цьому випадку приймає наступний вигляд:

$$\begin{aligned} \sigma_{ij,j} &= 0, \quad \varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}), \quad x_i \in V; \\ \varepsilon_{ij} &= \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^c; \quad \sigma_{ij} = D_{ijkl}(\varepsilon_{kl} - \varepsilon_{kl}^c); \\ \sigma_{ij} n_j &= p_i, \quad x_i \in S_1; \quad u_i|_{S_2} = \bar{u}_i, \\ u_i(x, 0) &= \varepsilon_{ij}^c(x, 0) = 0, \end{aligned} \quad (1)$$

де  $\mathbf{u}$  – вектор переміщень;

$\boldsymbol{\sigma}$  ( $\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$ ) – тензор напружень ( $i, j = 1, 2$ );

$\boldsymbol{\varepsilon}$  ( $\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ji}$ ) – тензор деформацій ( $i, j = 1, 2$ ).

Всі компоненти напружено-деформованого стану є функціями координат  $\mathbf{x}$  та часу  $t$ . Незворотні деформації повзучості представлено тензором  $\boldsymbol{\varepsilon}^c$  з компонентами  $\varepsilon_{ij}^c$ , пружні деформації тензором  $\boldsymbol{\varepsilon}^e$  з компонентами  $\varepsilon_{ij}^e$ . Використано гіпотезу адитивності деформацій. Тензорний зв'язок для них з тензором напружень й часом (повзучість) визначається за прийнятими рівняннями стану, доповненими еволюційним рівнянням для скалярного параметру пошкоджуваності. Для процесів повзучості маємо:

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon}_{ij}^c &= \frac{3}{2} B \frac{(\sigma_{vm})^{n-1}}{(1-\omega_c)^k} S_{ij}, \\ \dot{\omega}_c &= D \frac{(\sigma_{eq})^m}{(1-\omega_c)^l}, \quad \omega_c(\mathbf{x}, 0) = 0, \quad \omega_c(\mathbf{x}, t_*) = \omega_*, \end{aligned} \quad (2)$$

де  $\sigma_{VM}$  – інтенсивність напружень Мізеса;

$\sigma_{eq}$  – еквівалентне напруження, вираз якого одержується за допомогою критерію високотемпературної міцності, отриманого для даного матеріалу;

$\omega_c$  – параметр пошкоджуваності, що визначається дією механізмів повзучості;

$t^*$  – значення часу до завершення прихованого руйнування;

$\omega^*$  – критичне значення параметру пошкоджуваності, за досягненням якого у точці тіла в момент  $t^*$  в ній завершується приховане руйнування та виникає зародок макроскопічного дефекту;

$B, D, n, k, m, l$  – константи, що описують повзучість й обумовлене нею накопичення пошкоджень та визначаються експериментально.

Дослідження пошкоджуваності внаслідок деградації властивостей матеріалу та розробка відповідних методів її аналізу є досить поширеними, вони спрямовані на аналіз впливів водневих, різноманітних хімічних середовищ, морської води тощо [1-4]. Як відмічалось у вступі, деформування конструктивних елементів у високотемпературній області, що супроводжується корозійними впливами при повзучості матеріалу, є менш вивченим. Це пов'язано в першу чергу з більшими труднощами у побудові рівнянь стану, які обумовлюються браком або малою кількістю експериментальних даних, що потрібно отримувати протягом тривалого часу в умовах високих температур та агресивних середовищ. Нижче наведено один з варіантів визначальних рівнянь, побудований на основі використання двох еволюційних рівнянь для різних скалярних параметрів пошкоджуваності. Перший з них,  $\omega_c$  відповідає за опис пошкоджуваності внаслідок повзучості та може бути описаним з використанням класичних рівнянь типу (2). Інший,  $\omega_{scc}$ , відповідає за опис саме деградації матеріалу внаслідок корозійного впливу. Традиційно цей вплив описувався як «stress corrosion cracking» [3], тобто виникнення поверхневих тріщин в агресивному середовищі при певному рівні напруженого стану.

Еволюційне рівняння для параметру пошкоджуваності  $\omega_{scc}$ , що описує приховане руйнування поверхонь конструктивних елементів внаслідок корозійних впливів, може бути прийнятим, як й у роботах [7, 8], у вигляді наступної функціональної залежності:

$$\dot{\omega}_{scc} = \dot{\omega}_{scc}(\omega_{scc}, \sigma_{scc}; T, \chi_1, \chi_2, \dots); \quad \sigma_{scc} = \sigma_{scc}(\sigma_{ij}), \quad (3)$$

де  $\chi_1, \chi_2, \dots$  – параметри агресивного середовища, завдяки дії якого відбувається корозія матеріалу;

$\sigma_{scc}$  – еквівалентне напруження корозійного розтріскування.

Як завжди у континуальній механіці пошкоджуваності,

$$\omega_{scc}(0) = 0, \omega_{scc}(t^*) = \omega^*, \omega^* \leq 1.$$

Еквівалентне напруження корозійного розтріскування визначається за наступною залежністю [7, 8]:

$$\sigma_{scc} = \max(\sigma); \quad \begin{vmatrix} \sigma_{ij} \tau_i \tau_j - \sigma & \sigma_{ij} b_i \tau_j \\ \sigma_{ij} b_i \tau_j & \sigma_{ij} b_i b_j - \sigma \end{vmatrix} = 0, x_i \in \Omega_{scc}. \quad (4)$$

Поверхня  $\Omega_{scc}$ , на якій розвиваються корозійні процеси, характеризується нормаллю  $n_i$  та ортами  $\tau_i, b_i$ , що лежать у дотичній до поверхні площині.

Крайові умови доповнюються наступними:

$$\sigma_{ij} n_i n_j = -p_{scc}; \quad \sigma_{ij} \tau_i n_j = 0; \quad \sigma_{ij} b_i n_j = 0. \quad (5)$$

де  $p_{scc}$  – значення тиску агресивного середовища на поверхні  $\Omega_{scc}$ .

Як приклад конкретизованого еволюційного рівняння (3) наведемо рівняння, отримане для неіржавіючої сталі 18-8, що знаходиться у розчині хлориду магнію при  $T=500^\circ \text{C}$  [7, 8].

$$\dot{\omega}_{scc} = 10^{b\omega_{scc} + c\chi} a(1 - \omega_{scc})^{-d}, \quad \omega_{scc}(0) = 0. \quad (6)$$

В цьому рівнянні  $a, b, c, d$  є константами, що визначені за експериментальними даними. Їхні значення  $a=1.645 \cdot 10^{-7}$ ;  $b=6.133 \cdot 10^{-3}$ ;  $c=9.306 \cdot 10^{-2}$ ,  $d=1$ . Рівняння отримано для значення концентрації хлориду магнію  $\text{MgCl}_2$   $\chi=5..10\%$ .

В даному дослідженні для спільного аналізу двох процесів накопичення пошкоджень використовується гіпотеза Йокоборі з сумуванням внесків від диференціалів пошкоджуваності різної природи, як це зроблено, наприклад, для випадку взаємодії пошкоджуваностей від повзучості та втоми (див. [16]):

$$d\omega = \alpha d\omega_{scc} + \beta d\omega_c, \quad (7)$$

$$\omega(\mathbf{x}, 0) = 0, \omega(\mathbf{x}, t^*) = \omega^*, 0 < \omega^* \leq 1.$$

Вигляд функцій впливу  $\alpha$  та  $\beta$  має бути визначеним з аналізу експериментальних даних. Відмітимо, що застосування МСЕ надає можливість ефективного використання еволюційних рівнянь: в околі поверхонь, що отримують корозійні впливи є можливість використання співвідношення (7). В середині конструктивного елементу при цьому буде аналізуватись лише умова  $\omega_c(t^*) = \omega^*$ .

Запропоновані підходи та методи розв'язання задачі оцінювання напружено-деформованого стану та рівня накопиченої прихованої пошкоджуваності реалізовано за допомогою використання МСЕ, що доповнений різницевиими методами інтегрування за часом. Задача розглядається при плоскій деформації та розв'язується за допомогою використання програмного комплексу *FEM Creep* [16], доповненому програмою *FEM Creep Damage Fracture* [17] для випадку аналізу процесу розповсюдження макроскопічних дефектів. Основна система рівнянь повзучості записується наступним чином [16]:

$$\begin{aligned}
 [K]\{\dot{u}\} &= \{\dot{F}\} + \{\dot{F}^c\}; \\
 \{\dot{F}^c\} &= \sum_{N_B} \int_{V_B} [B]^T [D] \{\dot{\varepsilon}^c\} dV; \\
 \{\dot{F}\} &= \sum_{N_B} \int_{S_B} [N^p]^T \{\dot{p}\} dS; \\
 \{\dot{\sigma}\} &= [D] (\{\dot{\varepsilon}\} - \{\dot{\varepsilon}^c\}), \quad \{\dot{\varepsilon}\} = [B] \{\dot{u}\}.
 \end{aligned} \quad (8)$$

Система диференціальних рівнянь (8) розв'язується з використанням різницевого методу прогнозу-корекції 3-го порядку інтегрування за часом [16].

У разі продовження аналізу після виникнення першого макроскопічного дефекту (зародку тріщини) використовується програма *FEM Creep Damage Fracture* [17], що побудована на технології вилучення з розрахункової моделі скінченних елементів, в яких параметр пошкоджуваності сягнув свого критичного значення, та подальшого переформулювання початково-крайової задачі з новою геометрією моделі та наявним на той момент розподілом компонентів напружено-деформованого стану та параметрів пошкоджуваності у скінченних елементах.

**Чисельне моделювання повзучості та корозійного розтріскування циліндричної труби.** Як приклад застосування представленого методу розрахунку розглянуто повзучість довгої товстої циліндричної труби кругового перерізу. Зовнішній радіус труби 0.015 м, внутрішній радіус 0.017 м. Матеріал труби – неіржавіюча сталь 18-8, її рівномірно прогріто до температури  $T=500^\circ\text{C}$ . Фізико-механічні параметри цієї сталі при даній температурі: модуль пружності  $E=1.62 \cdot 10^5$  МПа, коефіцієнт Пуассону  $\nu=0.3$ . Константи до рівнянь повзучості та пошкоджуваності:  $B=8.86 \cdot 10^{-13}$  МПа<sup>-n</sup>/год,  $n=k=2.023$ ,  $D=3.79 \cdot 10^{-35}$  МПа<sup>-m</sup>/год,  $m=l=12.34$  [8]. У даному дослідженні в еволюційному рівнянні (6) прийнято  $\chi=0.05$ , функції впливу у рівнянні (7) були взяті однаковими,  $\alpha=\beta=1$ . Внутрішній тиск  $p=p_{sc} = 40$  МПа, поверхня  $S_1$  співпадає з поверхнею  $\Omega_{sc}$ .

Внаслідок симетрії області визначення та крайових умов розглянуто скінченноелементну модель однієї четвертої частини перерізу труби. Алгоритм розрахунку доповнений обчисленням на кожному кроці інтегрування за часом значень компонентів напружень у циліндричній системі координат для визначення значень еквівалентного напруження  $\sigma_{sc}$  на внутрішній поверхні труби. Також реалізовано алгоритм визначення нових елементів, які внаслідок вилучення «зруйнованих» елементів прийшли в стан корозійного впливу на внутрішній поверхні. Після проведення досліджень збіжності скінченноелементних розв'язків розрахунки проводились з використанням моделі з 4800 скінченних елементів. Критичне значення параметру пошкоджуваності було прийнято  $\omega^*=0.98$ .

Розрахунками встановлено, що завершення прихованого руйнування відбувається на внутрішній поверхні практично після року функціонування труби ( $t^*=7985.3$  год). При цьому швидкість накопичення пошкоджень внаслідок корозійного впливу на внутрішній поверхні є на порядок більшою, ніж у внутрішній області труби. На рис.1 (зверху) наведено фрагмент перерізу труби, де має місце виникнення макроскопічного дефекту. Далі розповсюдження корозійного розтріскування відбувається в обидві боки від зародку дефекту на внутрішній поверхні. Протягом декількох хвилин макроскопічний дефект розширюється, далі його розповсюдження уповільнюється. Протягом наступних майже п'яти років до моменту  $t=44463.4$  год відбувається подальше руйнування внутрішньої поверхні труби. Поточний вигляд фрагменту перерізу труби з наведеним розподілом параметру пошкоджуваності представлено на рис.1 знизу.

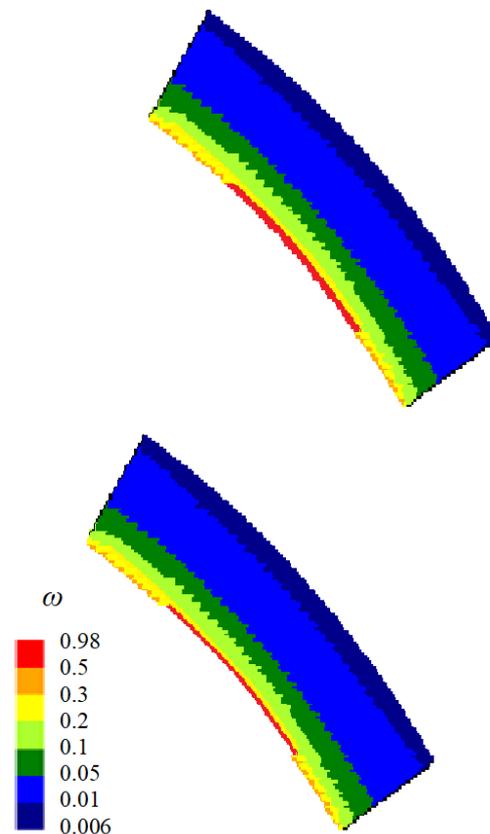


Рис. 1 – Розподіл параметру пошкоджуваності та поточна конфігурація фрагменту перерізу труби при завершенні процесу прихованого руйнування  $t^*=7985.3$  год (зверху) та при  $t=44463.4$  год (знизу)

**Висновки.** У статті представлено метод спільного аналізу деформування та руйнування конструктивних елементів, що знаходяться в умовах високотемпературної повзучості, пов'язаного з нею накопичення прихованих пошкоджень, та в яких деякі поверхні піддано впливу агресивних середовищ. Крайова задача розв'язується з використанням методу скінченних елементів, для початкової задачі

використано різницевий метод інтегрування за часом. Для аналізу корозійного розтріскування внутрішньої поверхні труби використано розроблений авторами [17] підхід, що полягає у виключенні з розрахункової моделі «зруйнованих» скінченних елементів, тобто тих, в яких параметр пошкоджуваності сягнув свого критичного значення, та переформулювання крайової задачі для моделі з новою геометрією та збереженими початковими умовами для компонентів напружено-деформованого стану та параметру пошкоджуваності у решті скінченних елементів.

Як приклад використання методу чисельного моделювання розглянуто процес повзучості з прихованим руйнуванням матеріалу та подальше корозійне розтріскування у товстій трубі. Проаналізовано процес зростання пошкоджень у її матеріалі, оцінено співвідношення між швидкістю накопичення пошкоджень внаслідок повзучості та корозійного розтріскування на поверхні.

Запропонований підхід та скінченноелементний метод розрахунку можуть бути надалі застосованими для аналізу деформування та корозійного розтріскування елементів конструкцій складної геометрії, які використовуються у енергетичній та атомній промисловості.

#### Список літератури

1. Jones R. H. Mechanisms of stress-corrosion cracking. / R. H. Jones – Stress-Corrosion Cracking: Materials Performance and Evaluation, 2017. – p. 1-41. <https://doi.org/10.31399/asm.tb.sccmpe2.t55090001>
2. Андрейків О. С. Механіка руйнування та довговічність металевих матеріалів у водневмісних середовищах. / О. С. Андрейків, О. В. Гембара – К.: Наук. думка, 2008. – 344 с.
3. Kofstad P. High temperature corrosion / P. Kofstad – London and New York, Elsevier Applied Science, 1988. – 568 p.
4. Marcus P., Mansfeld F. B. Analytical methods in corrosion science and engineering. / P. Marcus, F. B. Mansfeld – CRC press, 2005. – 776 p. <https://doi.org/10.1201/9781420028331>
5. Sequeira C. A. C. High temperature corrosion: fundamentals and engineering. / C. A. C. Sequeira – John Wiley & Sons, 2019. – 629 p. <https://doi.org/10.1002/9781119474371>
6. Aldellaa I. et al. Effect of creep on corrosion-induced cracking / I. Aldellaa et al. // Engineering Fracture Mechanics. – 2022. – Т. 264. – P. 108310. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2202.03135>
7. Морачковський О. К. Континуальна модель роста трещин коррозионного растрескивания для расчета ресурса конструкций / О. К. Морачковський, Ю. В. Ромашов // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2010. – №. 46, № 2. – С. 111-116.
8. Морачковский О. К. Прогнозирование коррозионного растрескивания конструкций при высокотемпературной ползучести / О. К. Морачковский, Ю. В. Ромашов // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2010. № 5. – С. 43-47.
9. Wang X. Y. Numerical investigation of creep crack growth behavior of UNS N10003 alloy based on the creep damage model / X. Y. Wang et al. // International Journal of Pressure Vessels and Piping. – 2022. – Т. 200. – P. 104838. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2022.104838>
10. Jezequel T. Stress corrosion crack initiation of Zircaloy-4 cladding tubes in an iodine vapor environment during creep, relaxation, and constant strain rate tests / T. Jezequel et al. // Journal of Nuclear Materials. – 2018. – Т. 499. – P. 641-651. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2017.07.014>
11. Hembara O. V. Modeling of the deformation of structural elements under the conditions of creep, corrosion cracking, and hydrogenation / O. V. Hembara, O. Y. Chepil // Materials Science. – 2022. – Т. 57. – №. 4. – P. 557-561. <https://doi.org/10.1007/s11003-022-00578-x>
12. Mohamad B. A. Failure analysis of gas turbine blade using finite element analysis / B. A. Mohamad, A. Abdelhussien // International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET). – 2016. – Т. 7. – №. 3. – P. 299-305.
13. Jiang X. Exploring the creep and oxidation behaviors of four types of FeCrAl alloys through small punch test at 600° C: experiments and simulations / X. Jiang et al. // Journal of Materials Research and Technology. – 2023. – Т. 27. – P. 733-756. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.09.301>
14. Robin R. Probabilistic finite element analysis of a heavy duty radiator under internal pressure loading / R. Robin, V. Hariram, M. Subramanian // Journal of Engineering Science and Technology. – 2017. – Т. 12. – №. 9. – P. 2438-2452. <https://doi.org/10.17485/jst/2016/v9i33/98483>
15. Liu C. A review of the application of finite element method (FEM) to localized corrosion modeling / C. Liu, R. G. Kelly // Corrosion. – 2019. – Т. 75. – №. 11. – P. 1285-1299. <https://doi.org/10.5006/3282>
16. Бреславський Д. В. Деформування та довготривала міцність конструктивних елементів ядерних реакторів. / Д. В. Бреславський. – Харків, Друкарня Мадрид, 2020. – 249 с.
17. А.с. 82758. Комп'ютерна програма «Розв'язання двовимірних задач повзучості, пошкоджуваності та розповсюдження тріщин» (FEM creep-damage-fracture). Бреславський Д. В., Сенько А. В., Татарінова О. А. Дата реєстрації 12.11.2018.

#### References (transliterated)

1. Jones R. H. Mechanisms of stress-corrosion cracking. Stress-Corrosion Cracking: Materials Performance and Evaluation, 2017, pp. 1-41. <https://doi.org/10.31399/asm.tb.sccmpe2.t55090001>
2. Andrejkiv O. Ye., Gembara O. V. Mexanika rуйnuvannya ta dovговічність металевих матеріалів у водневмісних середовищах. [Fracture mechanics and durability of metallic materials in aqueous environments]. Nauk. dumka, 2008, 344 p.
3. Kofstad P. High temperature corrosion. London and New York, Elsevier Applied Science, 1988, 568 p.
4. Marcus P., Mansfeld F. B. Analytical methods in corrosion science and engineering. CRC press, 2005, 776 p. <https://doi.org/10.1201/9781420028331>
5. Sequeira C. A. C. High temperature corrosion: fundamentals and engineering. John Wiley & Sons, 2019, 629 p. <https://doi.org/10.1002/9781119474371>
6. Aldellaa I. et al. Effect of creep on corrosion-induced cracking. Engineering Fracture Mechanics, 2022, Т. 264, P. 108310. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2202.03135>
7. Morachkovsky O. K., Romashov Yu. V. Kontynualnaya model rosta treshyn korrozionnogo rastreskyvaniya dlya rascheta resursa konstrukcyj [A continuous model of crack growth of corrosion cracking for calculating the resource of structures]. Fizyko-ximichna mexanika materialiv. [Physicochemical mechanics of materials]. 2010, №. 46, № 2. P. 111-116.
8. Morachkovsky O. K., Romashov Yu. V. Prognozyrovanye korrozionnogo rastreskyvaniya konstrukcyj pry vysokotemperaturnoj polzuchesty [Prediction of stress corrosion cracking of structures under high-temperature creep]. Fizyko-ximichna mexanika materialiv. [Physicochemical mechanics of materials]. 2010, № 5. P. 43-47.
9. Wang X. Y. et al. Numerical investigation of creep crack growth behavior of UNS N10003 alloy based on the creep damage model. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2022, Т. 200, P. 104838. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2022.104838>
10. Jezequel T. et al. Stress corrosion crack initiation of Zircaloy-4 cladding tubes in an iodine vapor environment during creep, relaxation, and constant strain rate tests. Journal of Nuclear Materials, 2018, Т. 499, p. 641-651. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2017.07.014>
11. Hembara O. V., Chepil O. Y. Modeling of the deformation of structural elements under the conditions of creep, corrosion cracking, and hydrogenation. Materials Science. 2022, Т. 57, №. 4. P. 557-561. <https://doi.org/10.1007/s11003-022-00578-x>
12. Mohamad B. A., Abdelhussien A. Failure analysis of gas turbine blade using finite element analysis. International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET). 2016, Т. 7, №. 3, P. 299-305.
13. Jiang X. et al. Exploring the creep and oxidation behaviors of four types of FeCrAl alloys through small punch test at 600° C: experiments and simulations. Journal of Materials Research and Technology. 2023, Т. 27, P. 733-756. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.09.301>

14. Robin R., Hariram V., Subramanian M. Probabilistic finite element analysis of a heavy duty radiator under internal pressure loading. *Journal of Engineering Science and Technology*. 2017, T. 12, №. 9, P. 2438-2452. <https://doi.org/10.17485/jst/2016/v9i33/98483>
15. Liu C., Kelly R. G. A review of the application of finite element method (FEM) to localized corrosion modeling. *Corrosion*. 2019, T. 75, №. 11, P. 1285-1299. <https://doi.org/10.5006/3282>
16. Breslavsky, D. V. *Deformuvannya ta Dovhotryvala Mitsnist Konstruktyvnykh Elementiv Yadernykh Reaktoriv* [Deformation and Long-Term Strength of Structural Elements of Nuclear Reactors]. Drukarnia Madryd, 2020. 249 p.
17. C.C. 82758. Computer program *Rozvyazannya dvovymirnykh zadach povzuchosti, poshkodzhuvanosti ta rozpovsyudzhennya trishhyn (FEM creep-damage-fracture)*. [Solution of two-dimensional problems of creep, damage and cracks (FEM creep-damage-fracture)]. Breslavsky D. V., Senko A. V., Tatarinova O. A. Registration date 12.11.2018.

Надійшла (received) 23.07.2025

Прийнята до друку (accepted) 12.11.2025

Опублікована (published) 29.12.2025

#### Відомості про авторів/ About the Authors

**Бреславський Дмитро Васильович (Breslavsky Dmytro)** – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри комп'ютерного моделювання процесів та систем; м. Харків, Україна; тел.: (057)7076454; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3792-5504>; email: [Dmytro.Breslavsky@khpi.edu.ua](mailto:Dmytro.Breslavsky@khpi.edu.ua)

**Хорошун Андрій Сергійович (Khoroshun Andriy)** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри комп'ютерного моделювання процесів і систем; м. Харків, Україна; (057)-707-64-54; ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-4369-137X>; e mail:

**Сенько Альона Володимирівна (Senko Alyona)** – доктор філософії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший викладач кафедри комп'ютерного моделювання процесів та систем; м. Харків, Україна; тел.: (057)7076454; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9961-7419>; email: [Alyona.Senko@khpi.edu.ua](mailto:Alyona.Senko@khpi.edu.ua)

**Татарінова Оксана Андріївна (Tatarinova Oksana)** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувачка кафедри комп'ютерного моделювання процесів та систем; м. Харків, Україна; тел.: (057)-707-64-54; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3090-8469>; e-mail: [Oksana.Tatarinova@khpi.edu.ua](mailto:Oksana.Tatarinova@khpi.edu.ua)

**Аніщенко Галина Оттівна (Anischenko Halyna)** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри теоретичної механіки та опору матеріалів; м. Харків; Україна; тел.: (057)-707-63-73; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6818-4980>; e-mail: [Halyna.Anishchenko@khpi.edu.ua](mailto:Halyna.Anishchenko@khpi.edu.ua)