

Д. В. БРЕСЛАВСЬКИЙ, М. О. ГРОШЕВИЙ, А. С. ХОРОШУН, О. А. ТАТАРІНОВА

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ НАКОПИЧЕННЯ ПОШКОДЖЕНЬ ПРИ ПЛОСКОМУ НАПРУЖЕНОМУ СТАНІ

Запропоновано підхід до моделювання процесів накопичення пошкоджень при повзучості, коли напружений стан у конструктивному елементі характеризується наявністю областей з різним рівнем напружень. Внаслідок процесів старіння, окисації та інших високотемпературних деградаційних процесів у зонах з малими рівнями напружень швидкість накопичення прихованих пошкоджень може збільшуватись, що не відображається у класичних формулюваннях механіки пошкоджуваності. Надано опис еволюційного рівняння для скалярного параметру пошкоджуваності, в якому параметри, що до нього входять, є функціями величин напружень, які при даному часі до припинення прихованого руйнування є руйнівними. Математичну постановку задачі та її скінченноелементне формулювання виконано для випадку плоского напруженого стану. Проведено чисельне моделювання процесів накопичення пошкоджень у пластинах з коловими надрізами, виготовлених з жароміцного сплаву CMSX-4. Порівнюються розподіли параметру пошкоджуваності за пластиною, отримані при використанні класичного рівняння для параметру пошкоджуваності Качанова-Работнова та запропонованого у даній роботі для широкого діапазону напружень. Показано, що врахування іншої, підвищеної швидкості накопичення пошкоджень в областях з малим рівнем напружень в аналізі довготривалої міцності призводить до істотного скорочення часу до завершення прихованого руйнування. Продемонстровано, що у випадку застосування модифікованого еволюційного рівняння зони з високим рівнем пошкоджуваності розповсюджується по всьому об'єму пластини, що може свідчити про подальше швидке руйнування. Запропонований підхід до модифікації еволюційного рівняння для параметру пошкоджуваності можливо використати у разі, коли є інформація щодо реального значення часу до руйнування в експлуатаційних умовах з подальшим виконанням циклу чисельних експериментів для отримання характеристик кривої довготривалої міцності, які будуть закладені у модифіковане еволюційне рівняння.

Ключові слова: чисельне моделювання, плоский напружений стан, метод скінченних елементів, довготривала міцність, повзучість, пошкоджуваність, пластина з надрізами.

D. BRESLAVSKY, M. HROSHEVYI, A. KHOROSHUN, O. TATARINOVA

MODELLING OF DAMAGE ACCUMULATION PROCESSES AT PLANE STRESS STATE

An approach to modeling the processes of damage accumulation during creep is proposed. The case of the stress state in a structural element is characterized by the presence of areas with different stress levels is considered. As a result of aging, oxidation, and other high-temperature degradation processes in zones with low stress levels, the rate of accumulation of hidden damage may increase, which is not reflected in the classical formulations of Damage Mechanics. A description of the evolution equation for the scalar damage parameter is provided, in which the parameters included in it are the functions of the stress values, which at a given time before the finishing of hidden damage accumulation are destructive. The mathematical formulation of the problem and its finite element formulation are performed for the case of a plane stress state. Numerical modeling of damage accumulation processes in plates with circular notches made of heat-resistant alloy CMSX-4 is carried out. The distributions of the damage parameter along the plate obtained using the classical Kachanov-Rabotnov damage parameter equation and the one proposed in this work for a wide range of stresses are compared. It is shown that taking into account a different, increased rate of damage accumulation in areas with a low level of stresses in the analysis of long-term strength leads to a significant reduction in the time to completion of hidden damage accumulation. It is demonstrated that in the case of using the modified evolution equation, the zone with a high level of damage is distributed throughout the volume of the plate, which may indicate further rapid fracture. The proposed approach to modifying the evolution equation for the damage parameter can be used in the case when there is an information about the real value of the time to fracture in operational conditions with the subsequent execution of a cycle of numerical experiments to obtain the characteristics of the long-term strength curve, which will be incorporated into the modified evolution equation.

Key words: numerical modeling, plane stress state, Finite Element method, long-term strength, creep, damage, notched plate.

Вступ. Аналіз високотемпературної довготривалої міцності елементів конструкцій сучасного авіаційного та енергетичного машинобудування є важливою задачею як на етапі проектування нових зразків техніки, так й для оцінювання ресурсу існуючих. Завдяки коштовності та тривалості доведення конструкцій в реальних умовах експлуатації на перше місце висуваються розрахункові, чисельні методи оцінювання довговічності. Найпотужнішим засобом при цьому є використання концепцій континуальної механіки пошкоджуваності (КМП) [1; 2], які дозволяють визначати як час виникнення макроскопічного дефекту, що у багатьох випадках й є терміном життя конструктивного елементу, так й місце його виникнення.

Основним інструментом КМП є формулювання та аналіз т. зв. еволюційних рівнянь, які встановлюють зв'язок між параметрами напружено-деформованого стану, насамперед напруженнями, іншими

параметрами, наприклад температурою, та параметром, що визначає процес накопичення прихованих пошкоджень у матеріалі. Цей параметр, або декілька подібних параметрів, мають назву параметру пошкоджуваності [2]. Вони можуть мати скалярну або тензорну природу.

Одним з важливих та складних питань при формулюванні еволюційних рівнянь є визначення значень констант, що входять до них. Зазвичай це потребує проведення тривалих експериментів, що істотно гальмує впровадження нових матеріалів та виготовлення з них високотемпературних конструкцій. Якщо з отриманням значень параметрів еволюційних рівнянь, що експериментально визначаються, у діапазоні великих та середніх напружень, проблема вирішується завдяки не дуже довгій тривалості експериментів [3; 4], то при малих значеннях, які виникають у багатьох місцях конструктивних елементів, опис процесу накопичення прихованих пошкоджень викликає труднощі. Завдяки процесам

деградації металу при високих температурах (старіння, окислення та інших [3; 5 - 7]), приховане руйнування в областях з малими напруженнями завершується раніше, чим це прогнозується еволюційними рівняннями, константи для яких отримано за аналізом середнього діапазону напружень. В монографії [4] міститься опис характеру змінювання довготривалої міцності в залежності від діапазону напружень, що визначається різним превалюючим типом прихованих пошкоджень, що розвиваються.

Авторами роботи [8] аналізується чутливість еволюційного рівняння, побудованого за класичною моделлю Работнова-Качанова [2], до змінювання напружень за об'ємом. Представлено альтернативну модель пошкодження за використанням закону гіперболічного синусу. Для неї показано що прогнозування довговічності при повзучості за наявності концентрації напружень є менш чутливим до їхніх значень, менш залежить від скінченноелементної сітки та демонструє кращу збіжність, ніж у класичній моделі.

Підхід до застосування у задачах механіки декількох параметрів пошкоджуваності, кожен з яких моделює процеси різної фізичної природи, частина з яких описує процеси більшої тривалості, був запропонований у роботах Д.Хейхерста зі співавторами [9] та розвинений Х.Альтенбахом [10; 11]. Розроблена модель дозволяє оцінювати ступінь впливу різних механізмів пошкоджуваності на довготривалу міцність, але її побудова потребувала застосування дуже складних експериментальних досліджень. Розвиток запропонованих підходів обговорюється у роботах [11; 12].

Перевірка розроблених еволюційних рівнянь при складному напруженому стані є також важливим та складним завданням. Часто первісний аналіз виконується з використанням низки моделей, що мають один яскраво виражений концентратор напружень [2]. В задачах повзучості та пошкоджуваності, що її супроводжує, часто використовуються зразки з надрізами [2; 3; 13; 14], які моделюються пластинами відповідної геометрії при плоскому напруженому стані з використанням методу скінченних елементів (МСЕ) [16; 17]. Аналогічний підхід використано в даній роботі, МСЕ застосовано для аналізу процесів накопичення пошкоджень у пластинах з надрізами з використанням різних еволюційних рівнянь.

Постановка задачі та метод розв'язку. Для аналізу деформування та накопичення пошкоджень при повзучості сформулюємо наступну початково-крайову задачу. Розглядається область V , що має поверхню S . На частині поверхні, позначеній як S_1 , задані значення переміщень. Інша частина поверхні S_2 навантажена поверхневим навантаженням p . В декартовій системі координат $(1,2)$ повзучість тіла V описується наступною системою рівнянь:

$$\sigma_{ij,j} = 0, \quad \varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}), \quad x_i \in V;$$

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^c;$$

$$\sigma_{ij} = D_{ijkl}(\varepsilon_{kl} - \varepsilon_{kl}^c); \quad \sigma_{ij} n_j = p_i, \quad x_i \in S_2; \quad (1)$$

$$u_i|_{S_1} = \bar{u}_i, \quad u_i(x, 0) = \varepsilon_{ij}^c(x, 0) = 0 \quad i, j, k, l = 1, 2.$$

Застосовано наступні позначення: вектор переміщень $\underline{u} = \underline{u}(x_i, t)$, тензор напружень $\underline{\sigma} = \underline{\sigma}(x_i, t)$, тензор деформацій $\underline{\varepsilon} = \underline{\varepsilon}(x_i, t)$, тензор деформацій повзучості $\underline{\varepsilon}^c = \underline{\varepsilon}^c(x_i, t)$, $(i, j = 1, 2)$, t – змінна часу; $\underline{n}$ – вектор нормалі до поверхні тіла, $\underline{D}$ – тензор пружних констант. Початкові деформації вважаються пружними.

Розглядаються матеріали з ізотропними властивостями деформування та накопичення пошкоджень при фіксованій температурі. Швидкість деформацій повзучості опишемо за допомогою теорії плинину (закону Одквіста [2; 3]). Пошкоджуваність при повзучості описується еволюційним рівнянням зі скалярним параметром пошкоджуваності.

Рівняння стану для опису повзучості та еволюційне рівняння для скалярного параметру пошкоджуваності] записуємо з використанням матрично-векторного формулювання [4; 15]:

$$\dot{\underline{\varepsilon}}^c = \frac{3}{2} B \frac{\sigma_{VM}^{n-1}}{(1-\omega)^m} [\bar{B}] \underline{s}; \quad x_i \in S_2; \quad (2)$$

$$\dot{\omega} = D \frac{\sigma_{VM}^m}{(1-\omega)^m}, \quad \omega(0) = 0, \quad \omega(t_*) = \omega_* \quad (3)$$

де $\underline{s} = \underline{s}(x_i, t)$ – вектор компонентів девіатору тензору напружень, $\underline{\varepsilon}^c = \underline{\varepsilon}^c(x_i, t)$ – вектор компонентів деформацій повзучості, σ_{VM} – еквівалентне напруження Мізеса, $[\bar{B}]$ – матриця властивостей повзучості. B , D , n , m – матеріальні константи, t^* – значення часу до завершення процесу накопичення прихованих пошкоджень, k – граничне значення параметру пошкоджуваності, яким характеризується час t^* , $\omega_* \leq 1$

Для відтворення процесів накопичення пошкоджень при різних діапазонах змінювання напружень при повзучості при складному напруженому стані використаємо підхід, що обговорюється у роботі [18], згідно якого рівняння для кривої довготривалої міцності апроксимується функцією часу. Як приклад, розглянемо рівняння, що описує досліджені у роботі [19] процеси повзучості та прихованого руйнування у жароміцному сплаві CMSX-4 при температурі 1273 К та діапазоні напружень 100-400 МПа. Константи до цього рівняння типу (3) отримано у роботі [20] з використанням класичних феноменологічних методів спільно з аналізом структури сплаву.

При малих значеннях напружень отримані у [20]

значення констант, що входять до еволюційного рівняння (3), описують процеси прихованого руйнування з недостатньою точністю. У зв'язку з цим, модифікуємо еволюційне рівняння, для чого розглянемо криву довготривалої міцності у діапазоні 0-300 МПа. На рис. 1 цю криву представлено у традиційних напівлогарифмічних координатах, а на рис.2 – у звичайних.

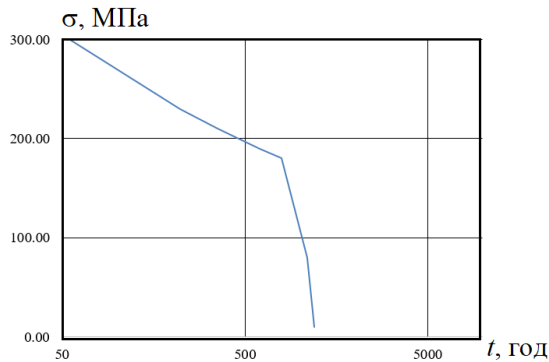


Рис.1 – Крива довготривалої міцності сплаву CMSX-4. Напівлогарифмічні координати

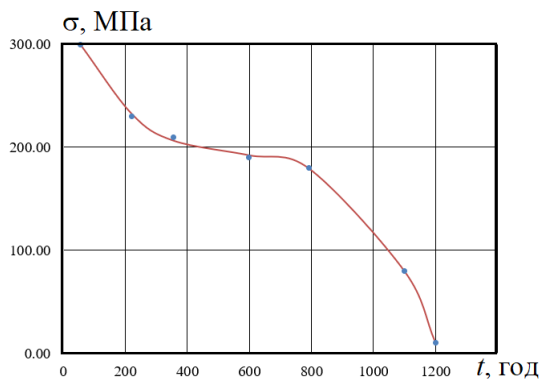


Рис.2 – Крива довготривалої міцності сплаву CMSX-4. Суцільна лінія – розрахункові дані з використанням рівняння (4), точки – експериментальні дані

За допомогою методу найменших квадратів отримано залежність величини напруження руйнування від часу. Її представлено рівнянням (4):

$$\sigma(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3. \quad (4)$$

Значення коефіцієнтів у даному рівнянні: $a_0=330$ МПа, $a_1=-0.675$ МПа/год, $a_2=0.00113$ МПа/год², $a_3=6.59 \cdot 10^{-7}$ МПа/год³.

Далі проведено перебудову рівняння типу (3) з урахуванням залежності (4):

$$\dot{\omega} = D(\sigma_{vM}(t_*)) \frac{\sigma_{vM}^{m(\sigma_{vM}(t_*))}}{(1-\omega)^m}, \quad \omega(0) = 0, \quad \omega(t_*) = \omega_*. \quad (5)$$

Тут, як й у [2], використано залежність ступеня-константи m від величини еквівалентного напруження $m = m(\sigma_{vM}(t_*))$, але також запропоновано врахування залежності константи D від еквівалентного напруження $D = D(\sigma_{vM}(t_*))$. Такий вигляд рівняння забезпечує відбиття особливостей процесу

накопичення прихованих пошкоджень в залежності від величини діючого напруження.

Далі задача переформулюється у варіаційну та розв'язується методом скінченних елементів (МСЕ) на кожному кроці за часом з використанням методу прогнозу-корекції 3-го порядку. Розглядаємо випадок плоского напруженого стану. Для використання алгоритмів МСЕ перейдемо до векторно-матричного формулювання задачі. Застосуємо трикутний скінченний елемент. Після перетворень приходимо до основної системи звичайних диференціальних рівнянь відносно вузлових переміщень скінченноелементної моделі [15;17]:

$$[K]\{\dot{u}\} = \{\dot{F}\} + \{\dot{F}^C\};$$

$$\{\dot{F}\} = \sum_{N_\beta} \int_{S_2^\beta} [N^p]^T \{\dot{p}\} dV; \quad (6)$$

$$\{\dot{F}^C\} = \sum_{N_\beta} \int_{V_\beta} [B]^T [D] \{\dot{\epsilon}^c\} dV;$$

$$\{\dot{\epsilon}^c\} = \frac{3}{2} B \frac{\sigma_{vM}^{n-1}}{(1-\omega)^m} [\bar{B}] \{s\};$$

$$\dot{\omega} = D \frac{\sigma_{vM}^m}{(1-\omega)^m},$$

де $[K]$ – матриця жорсткості системи; $[B]$ – матриця деформування; $\{u\}$ – глобальний вектор вузлових переміщень; $\{F\}$ – вектор миттєвих вузлових навантажень, обумовлених поверхневими силами та температурними деформаціями; $\{F^C\}$ – вузлові навантаження, обумовлені деформаціями повзучості; $[D]$ – матриця пружних констант; $[\bar{B}]$ – матриця коефіцієнтів до закону повзучості; $[N^p]$ – матриця форм; β – номер скінченного елемента; V_β – об'єм скінченного елемента; $\sum_{N_\beta}$ – підсумовування за всіма

скінченими елементами; S_2^β – площа поверхні скінченного елемента, який знаходиться під дією розподіленого навантаження. Позначення векторів компонентів напружено-деформованого стану та вектору пошкоджуваності у скінченному елементі відповідають позначенням тензорів, введених у попередньому розділі.

Після розв'язання системи (6) на кожному кроці інтегрування за часом визначаються компоненти напружено-деформованого стану, параметру пошкоджуваності у кожному скінченному елементі. Розрахунок триває до моменту завершення прихованого руйнування t_* , який визначається часом отримання параметром пошкоджуваності свого критичного значення (близького до 1 [2]).

В розрахунках застосовано програмний комплекс *FEM Creep* [17], в якому виконано модифікацію

модулю, призначеного для визначення величини параметру пошкоджуваності за законом (5).

Повзучість та пошкоджуваність у пластині з коловим вирізом. Аналіз впливу різних типів пошкоджуваності, що відбивається використанням еволюційного рівняння (5), проведемо з використанням прикладу моделювання процесів деформування та розвитку прихованої пошкоджуваності у пластині з коловим вирізом, виготовленої з розглянутого жароміцного сплаву CMSX-4 (рис.3). Пластину рівномірно прогріто до температури 1273 К, розтягнуто поверхневим навантаженням p .

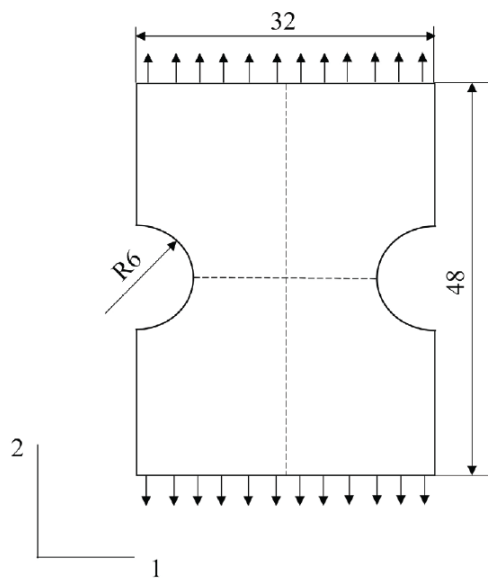


Рис. 3 – Пластина з двома коловими надрізами

Внаслідок симетрії пластины до моделювання залучено одну четверту її частину, використано нерівномірну скінченноелементну сітку зі згущенням у зоні отвору. На рис. 4 як приклад наведено розподіл інтенсивності напружень за фрагментом пластины у початковий момент навантаження при $p=62$ МПа.

Використання еволюційного рівняння з константами, отриманими за результатами аналізу структури матеріалу. Наведемо результати чисельного моделювання процесу накопичення прихованих пошкоджень у пластині з надрізами, що розглядається. Для розрахунків використовуємо еволюційне рівняння (3). Значення констант, що отримано у роботі [20]: $B=4.26 \cdot 10^{-18}$ МПа⁻ⁿ/с, $n=3.04$, $D=9.5 \cdot 10^{-20}$ МПа^{-m}/с, $m=5.22$. Моделювання проведене для випадків навантаження розтягу 62 МПа та 10 МПа. Результати розрахунків у вигляді розподілів параметрів пошкоджуваності за пластиною наведено на рис. 5 (навантаження розтягу 62 МПа, час завершення прихованого руйнування 527 год) та рис.6 (навантаження розтягу 10 МПа, час завершення прихованого руйнування 77142 год).

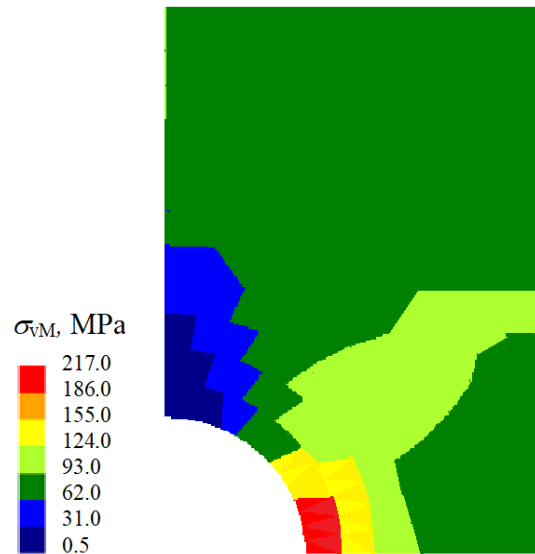


Рис. 4 – Розподіл величин інтенсивностей напружень за пластиною, $t=0$

Як видно з отриманих результатів, завершення прихованого руйнування в обох випадках відбувається в околі надрізу.

У випадку застосування класичного еволюційного рівняння зменшення навантаження істотно збільшує час розвитку прихованих пошкоджень. За цей час, за 77142 год, області пластины з рівнем пошкоджуваності 0.01 - 0.05 поширюються в глибину пластины, при цьому при $p=62$ МПа вони лишаються істотно локалізованими в околі надрізу.

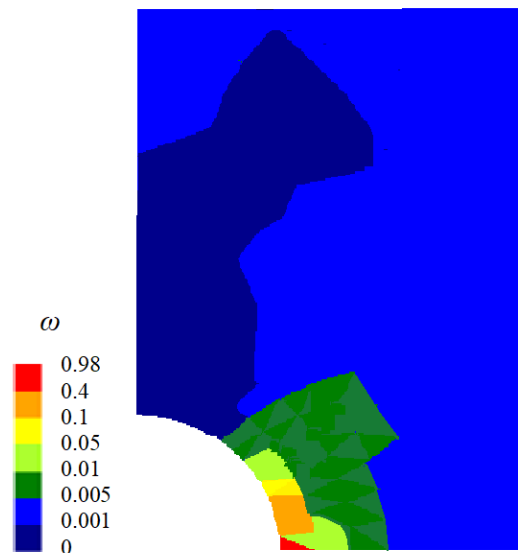


Рис. 5 – Розподіл параметру пошкоджуваності за пластиною, $p=62$ МПа, $t^*=527$ год. Використання еволюційного рівняння (3)

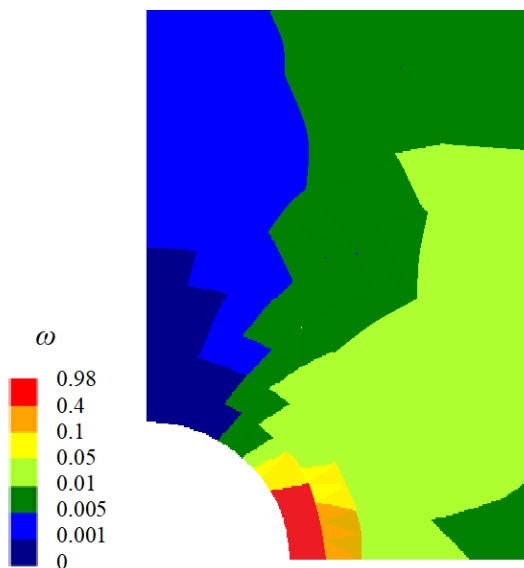


Рис. 6 – Розподіл параметру пошкоджуваності за пластиною, $p=10$ МПа, $t^*=77142$ год. Використання еволюційного рівняння (3)

Використання еволюційного рівняння з константами, що описують багатостадійну криву довготривалої міцності. Далі при чисельному моделюванні використано еволюційне рівняння (5). Як видно з рис. 4, при початковому деформуванні у пластині є присутніми значні зони з малим рівнем напружень (меншим за 180 МПа, при якому, згідно з рис. 1, є змінювання характеру кривої довготривалої міцності). У цих зонах починає працювати інші залежності напружень руйнування від часу, що визначаються рівнянням (4). Результати розрахунків представлено на рис. 7-8.

Рис. 7 містить розподіл параметру пошкоджуваності за пластиною при навантаженні розтягу 62 МПа (час завершення прихованого руйнування 527 год), а рис 8 – при навантаженні розтягу 10 МПа, (час завершення прихованого руйнування 2844 год).

Отримані результати свідчать, що у випадку достатньо великих напружень у зоні концентратора (217 МПа) час до завершення прихованого руйнування не змінюється у порівнянні з випадком використання класичного рівняння (3). Це пояснюється тим, що в обох випадках працюють однакові кількісні механізми визначення пошкоджуваності. Але у випадку застосування рівняння (5) зони з рівнем пошкоджуваності 0.1, яка завдяки нелінійності співвідношень характеризує досягнення часу більш швидкого накопичення пошкоджень, займає практично всю решту області пластини.

Ще більш істотні відмінності мають місце у випадку зменшених у 6 разів початкових напружень. При цьому час до завершення прихованого руйнування зменшується у порівнянні з класичним випадком майже в 27 разів. При цьому, як видно з рис. 8, де зони зі значеннями параметру пошкоджуваності 0.75-0.82

займають більшу частину пластини, руйнування всієї пластини відбудеться дуже швидко: такі значення параметру пошкоджуваності передують завершенню прихованого руйнування. Також відмітимо більший розмір зони, в якій можливо виникнення та швидкий розвиток макроскопічного дефекту ($\bar{\omega}=0.82-0.98$).

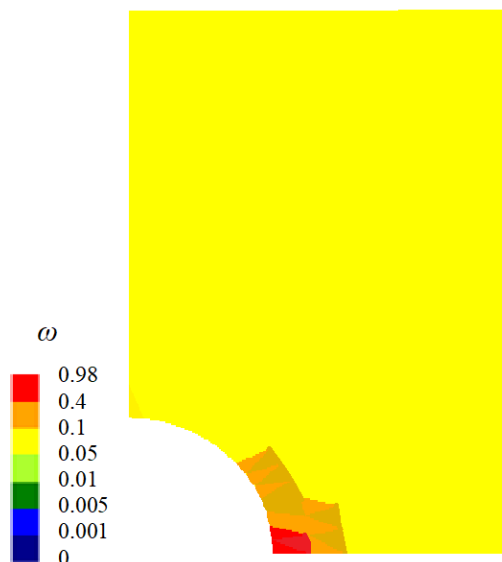


Рис. 7 – Розподіл параметру пошкоджуваності за пластиною, $p=62$ МПа, $t^*=527$ год. Використання еволюційного рівняння (5)

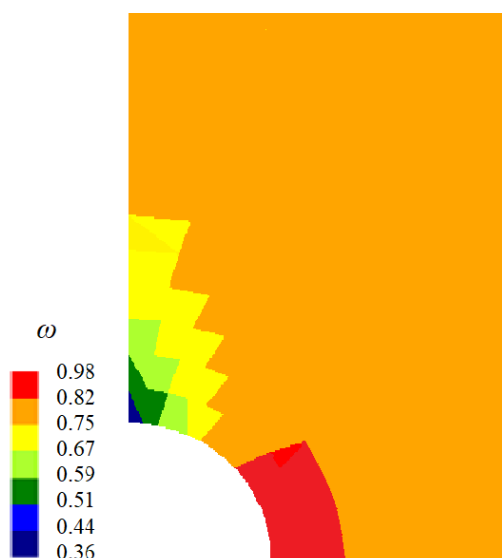


Рис. 8 – Розподіл параметру пошкоджуваності за пластиною, $p=10$ МПа, $t^*=2844$ год. Використання еволюційного рівняння (5)

Висновки. У статті представлено підхід до моделювання процесів накопичення пошкоджень при високотемпературному деформуванні в умовах повзучості матеріалу, коли напружений стан у конструктивному елементі характеризується наявністю областей з різним рівнем напружень. При цьому, завдяки високотемпературним деградаційним

процесам у зонах з малими рівнями напружень процеси накопичення пошкоджень можуть йти інтенсивніше, ніж це впливає з кривих довготривалої міцності, які зазвичай будуються за результатами експериментальних досліджень при вищих рівнях напружень. Запропоновано підхід до побудови еволюційного рівняння для скалярного параметру пошкоджуваності, в якому параметри, що до нього входять, є функціями величин напружень, які при даному часі до припинення прихованого руйнування є руйнівними.

Проведено порівняння результатів чисельного моделювання процесів накопичення пошкоджень у пластинах з коловими надрізами, виготовлених з жароміцного сплаву CMSX-4, що отримані при використанні класичного рівняння для параметру пошкоджуваності та запропонованого у даній роботі. Показано, що врахування іншої, підвищеної швидкості накопичення пошкоджень в областях з малим рівнем напружень в аналізі довготривалої міцності призводить до істотного скорочення часу до завершення прихованого руйнування. Цей факт можливо вважати таким, що є більш наближеним до реального перебігу процесів накопичення пошкоджень у матеріалі, що завершується виникненням зародку макроскопічного дефекту. При цьому зони з високим рівнем пошкоджуваності розповсюджуються по всьому об'єму пластини, що може свідчити про подальше швидке руйнування.

Запропонований підхід до модифікації еволюційного рівняння для параметру пошкоджуваності у загальному випадку потребує, безперечно, експериментального визначення кривої довготривалої міцності у повному діапазоні напружень, що мають місце у конструктивному елементі. Це вимагає тривалих експериментів. Але якщо є інформація щодо реального значення часу до руйнування в експлуатаційних умовах, то у певних випадках є можливим виконати цикл чисельних експериментів та отримати необхідні характеристики кривої довготривалої міцності, які будуть закладені у модифіковане еволюційне рівняння типу (5). Його надалі можливо буде використовувати у розрахунках довговічності інших конструктивних елементів.

Список літератури

1. Öchsner A. Continuum damage mechanics. / A. Öchsner. – Springer Singapore, 2016. – С. 65-84 https://doi.org/10.1007/978-981-287-865-6_4
2. Lemaitre J. Mechanics of solid materials. / J. Lemaitre, J. L. Chaboche. – Cambridge: University press, 1994. – 556 p.
3. Penny R. K. Design for creep. / R. K. Penny, D. L. Marriott. – London: Chapman and Hall, 1995. – 430 p <https://doi.org/10.1007/978-94-011-0561-3>
4. Naumenko K. Modeling High Temperature Materials Behavior for Structural Analysis, Part I: Continuum Mechanics Foundations and Constitutive Models. / K. Naumenko, H. Altenbach // Advanced Structured Materials. – 2016. – Vol. 28. – DOI: 10.1007/978-3-319-31629-1
5. Holdsworth S. Creep-fatigue failure diagnosis / S. Holdsworth // Materials. – 2015. – Т. 8. – №. 11. – С. 7757-7769. <https://doi.org/10.3390/ma8115418>
6. Obert S. Characterisation of the oxidation and creep behaviour of novel Mo-Si-Ti alloys. / S. Obert, A. Kauffmann, M. Heilmaier //

- Acta materialia. – 2020. – Т. 184. – С. 132-142. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2019.11.045>
7. Berthod P. Creep and oxidation kinetics at 1100 C of nickel-base alloys reinforced by hafnium carbides/ P. Berthod, E. Conrath // Materials & Design. – 2016. – Т. 104. – С. 27-36 <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.04.079>.
8. Haque M. S. The stress-sensitivity, mesh-dependence, and convergence of continuum damage mechanics models for creep / M. S. Haque, C. M. Stewart // Journal of Pressure Vessel Technology. – 2017. – Т. 139. – №. 4. – С. 041403 <https://doi.org/10.1115/1.4036142>.
9. Kowalewski Z L. Mechanisms-based creep constitutive equations for an aluminium alloy. / Z L Kowalewski, D R Hayhurst, B F Dyson // The Journal of Strain Analysis for Engineering Design. – 1994. – 29(4). – P. 309-316. – DOI:10.1243/03093247V294309
10. Altenbach H. A nonclassical model for creep-damage processes / H. Altenbach // Materials Physics and Mechanics. – 2001. – Т. 3. – С. 25-35.
11. Altenbach H. On the main directions in creep mechanics of metallic materials / H. Altenbach, K. Nape // Proceedings of the National Academy of Sciences of Armenia. Mechanics. – 2020. – Т. 73. – №. 3 <https://doi.org/10.33018/73.3.2>.
12. Meng Q. Creep damage models and their applications for crack growth analysis in pipes: A review / Q. Meng, Z. Wang // Engineering Fracture Mechanics. – 2019. – Т. 205. – С. 547-576 <https://doi.org/10.1016/j.engframech.2019.09.055>
13. Barbera D. Advances on creep-fatigue damage assessment in notched components / D. Barbera, H. Chen, Y. Liu // Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures. – 2017. – Т. 40. – №. 11. – С. 1854-1867 <https://doi.org/10.1111/ffe.12603>.
14. Luo Y. Notch effect on creep damage for Hastelloy C276-BN12 brazing joint / Y. Luo et al. // Materials & Design. – 2015. – Т. 84. – С. 212-222 <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.06.111>.
15. Бреславський Д. В. Деформування та довготривала міцність конструктивних елементів ядерних реакторів. / Д. В. Бреславський. – Харків, Друкарня Мадрид, 2020. – 249 с.
16. Zienkiewicz O. C. The finite element method for solid and structural mechanics. / O C Zienkiewicz, R L Taylor, D D Wood. – Oxford: Butterworth-Heinemann, 2014.
17. Бреславський Д. В. Проектування та розробка скінченноелементного програмного забезпечення / Д. В. Бреславський, Ю. М. Коритко, О. А. Татарінова. – Харків, «Підручник НТУ «ХПІ», 2017. – 232 с.
18. Бреславський Д. Програмний засіб для обробки даних з довготривалої міцності матеріалів з використанням кривих Едвардса / Д. Бреславський, А. Хорошун, А. Сенько, О. А. Татарінова // Вісник НТУ «ХПІ»: Серія "Динаміка та міцність машин". – 2023. – № 2. – С. 28-33. <https://doi.org/10.20998/2078-9130.2023.2.292955>
19. Hiraguchi H. A Novel Simulation Method for Phase Transition of Single Crystal Ni based Superalloys in Elevated Temperature Creep Regions via Discrete Cosine Transform and Maximum Entropy Method. / H. Hiraguchi // In "Creep in Structures VI", Advanced Structured Materials. – 2023. – P. 151-160. https://doi.org/10.1007/978-3-031-39070-8_10
20. Бреславський Д. В. Алгоритми та програмний засіб для обробки зображень структури металевих матеріалів з метою визначення характеристик повзучості / Д. В. Бреславський, М. О. Грошевий, О. А. Татарінова, А. В. Сенько // Вісник НТУ «ХПІ»: Серія "Динаміка та міцність машин". – 2023. – № 2. – С. 95-101. <https://doi.org/10.20998/2078-9130.2023.1.293427>

References (transliterated)

1. Öchsner, A. *Continuum Damage Mechanics*. Springer Singapore, 2016, pp. 65–84. https://doi.org/10.1007/978-981-287-865-6_4
2. Lemaitre, J., and J. L. Chaboche. *Mechanics of Solid Materials*. Cambridge University Press, 1994. 556 pp.
3. Penny, R. K., and Marriott, D. L. *Design for Creep*. Chapman and Hall, 1995. 430 pp. <https://doi.org/10.1007/978-94-011-0561-3>
4. Naumenko, K., and Altenbach, H. Modeling High Temperature Materials Behavior for Structural Analysis, Part I: Continuum Mechanics Foundations and Constitutive Models. Advanced Structured Materials, vol. 28, Springer, 2016. DOI: 10.1007/978-3-319-31629-1.

5. Holdsworth, S. Creep-Fatigue Failure Diagnosis. *Materials*, vol. 8, no. 11, 2015, pp. 7757–7769. <https://doi.org/10.3390/ma8115418>
6. Obert, S., Kauffmann, A. and Heilmaier, M. Characterisation of the Oxidation and Creep Behaviour of Novel Mo-Si-Ti Alloys. *Acta Materialia*, vol. 184, 2020, pp. 132–142. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2019.11.045>
7. Berthod, P., and Conrath, E. Creep and Oxidation Kinetics at 1100°C of Nickel-Base Alloys Reinforced by Hafnium Carbides. *Materials & Design*, vol. 104, 2016, pp. 27–36. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.04.079>
8. Haque, M. S., and Stewart, C. M. The Stress-Sensitivity, Mesh-Dependence, and Convergence of Continuum Damage Mechanics Models for Creep. *Journal of Pressure Vessel Technology*, vol. 139, no. 4, 2017, p. 041403. <https://doi.org/10.1115/1.4036142>
9. Kowalewski, Z. L., Hayhurst, D. R. and Dyson, B. F. Mechanisms-Based Creep Constitutive Equations for an Aluminium Alloy. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, vol. 29, no. 4, 1994, pp. 309–316. DOI: 10.1243/03093247V294309.
10. Altenbach, H. "A Nonclassical Model for Creep-Damage Processes. *Materials Physics and Mechanics*, vol. 3, 2001, pp. 25–35.
11. Altenbach, H., and Knappe, K. On the Main Directions in Creep Mechanics of Metallic Materials. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Armenia. Mechanics*, vol. 73, no. 3, 2020. <https://doi.org/10.33018/73.3.2>
12. Meng, Q., and Wang, Z. Creep Damage Models and Their Applications for Crack Growth Analysis in Pipes: A Review. *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 205, 2019, pp. 547–576. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2015.09.055>
13. Barbera, D., Chen, H. and Li, Y. Advances on Creep-Fatigue Damage Assessment in Notched Components. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, vol. 40, no. 11, 2017, pp. 1854–1867. <https://doi.org/10.1111/ffe.12603>
14. Luo, Y., et al. "Notch Effect on Creep Damage for Hastelloy C276-BN2 Brazing Joint. *Materials & Design*, vol. 84, 2015, pp. 212–222. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.06.111>
15. Breslavsky, D. V. *Deformuvannya ta Dovhotryvala Mitsnisti Konstruktyvnykh Elementiv Yadernykh Reaktoriv* [Deformation and Long-Term Strength of Structural Elements of Nuclear Reactors]. Drukarnia Madryd, 2020. 249 p.
16. Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L., and Wood, D. D. *The Finite Element Method for Solid and Structural Mechanics*. Butterworth-Heinemann, 2014.
17. Breslavsky, D. V., Korytko, Yu. M., and Tatarinova, O. A. *Proektuvannya ta Rozrobka Skinchennoelementnoho Prohramnoho Zabezpechennia* [Design and Development of Finite Element Software]. Pidruchnyk NTU "KhPI", 2017. 232 p.
18. Breslavsky, D., Khoroshun, A., Senko, A., and Tatarinova, O. Prohramnyi Zasib dlia Obrobky Danykh z Dovhotryvaloi Mitsnosti Materialiv z Vykorystanniam Kryvykh Edwardsa [Software for Processing Long-Term Strength Data Using Edwards Curves]. *Visnyk NTU "KhPI": Seriya "Dynamika ta Mitsnist Mashyn"* [Bulletin of the Kharkov Polytechnic Institute. Series Dynamics and strength of machines], no. 2, 2023, pp. 28–33. <https://doi.org/10.20998/2078-9130.2023.2.292955>
19. Hiraguchi, H. A Novel Simulation Method for Phase Transition of Single Crystal Ni-Based Superalloys in Elevated Temperature Creep Regions via Discrete Cosine Transform and Maximum Entropy Method. In *Creep in Structures VI*, edited by H. Altenbach and K. Naumenko, *Advanced Structured Materials*, vol. 194, Springer, 2023, pp. 151–160. https://doi.org/10.1007/978-3-031-39070-8_10
20. Breslavsky, D. V., Hroshevyi, M. O., Tatarinova, O. A., and A. V. Senko. Alhorytmy ta Prohramnyi Zasib dlia Obrobky Zobrazhen Struktury Metalovykh Materialiv z Metoiu Vyznachennia Kharakterystyk Povzuchosti [Algorithms and Software for Processing Images of Metallic Materials Structures to Determine Creep Characteristics]. *Visnyk NTU "KhPI": Seriya "Dynamika ta Mitsnist Mashyn"* [Bulletin of the Kharkov Polytechnic Institute. Series Dynamics and strength of machines], no. 2, 2023, pp. 95–101. <https://doi.org/10.20998/2078-9130.2023.1.293427>

Надійшла (received) 25.11.2024

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)-707-64-54; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3792-5504>; e-mail: Dmytro.Breslavsky@khpi.edu.ua

Грошевий Михайло Олександрович (Hroshevyi Mykhailo) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри комп'ютерного моделювання процесів та систем; м. Харків, Україна; тел.: (057)7076454; ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-3156-4402>; e-mail: Mykhailo.Hroshevyi@khpi.edu.ua

Хорошун Андрій Сергійович (Khoroshun Andriy) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри комп'ютерного моделювання процесів та систем; м. Харків, Україна; тел.: (057)7076454; email: ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-4369-137X>; email: a.s.khoroshun@gmail.com

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