

Д. В. БРЕСЛАВСЬКИЙ, П. І. ПАЛАМАРЧУК, О. К. МОРАЧКОВСЬКИЙ

ПОВЗУЧИСТЬ ТА ПОШКОДЖУВАНІСТЬ ОБОЛОНКИ ТВЕЛУ ПРИ СТАТИЧНОМУ ТА ЦИКЛІЧНОМУ НАВАНТАЖЕННІ

В статті представлено підхід до розв'язання задачі повзучості оболонки твєлу ядерного реактору за умов його контактної взаємодії з фіксуєчим елементом за допомогою спеціально розробленої користувацької процедури для програмного комплексу скінченноелементного аналізу. Розглядаються випадки незмінного у часі та циклічного навантаження, яке обумовлено дією потоку, що омиває твєл. Задачу розв'язано на основі повної тривимірної постановки, розглянуто матеріали з ізотропією властивостей повзучості та накопичення пошкоджень. У випадку аналізу циклічного деформування з накопиченням прихованих пошкоджень враховуються амплітудні контактні напруження та напруження, що виникають при вимушених коливаннях твєлу. Для врахування процесів накопичення прихованих пошкоджень внаслідок повзучості використано спеціально розроблену процедуру для додавання до розрахункової схеми функції інтегрування у часі еволюційного рівняння для скалярного параметру пошкоджуваності. В даній процедурі у випадку врахування циклічного навантаження також виконується перехід до еквівалентної задачі повзучості, отриманої шляхом використання методу двох масштабів часу та осереднення на періоді, визначаються функції асиметрії циклу напружень для кожної точки інтегрування скінченноелементної моделі. Отримано результати чисельного моделювання повзучості оболонки твєлу при її контакті з елементом фіксації для випадку статичної та динамічної повзучості. Матеріал оболонки – цирконієвий сплав. У випадку врахування циклічного навантаження продемонстровано суттєве прискорення процесів повзучості й накопичення прихованих пошкоджень та зменшення часу до виникнення макроскопічного дефекту. Визначено місце його виникнення, яке відповідає внутрішній поверхні оболонки твєлу навпроти розташування елемента фіксації.

Ключові слова: повзучість, пошкоджуваність, циклічне навантаження, оболонка твєлу, користувацька процедура.

D. BRESLAVSKY, P. PALAMARCHUK, O. MORACHKOVSKY

CREEP AND DAMAGE OF FUEL ROD CLADDING UNDER STATIC AND CYCLIC LOADING

The paper presents an approach to solving the problem of creep of the nuclear reactor fuel rod cladding under the conditions of its contact interaction with the fixing element using a specially developed user subroutine for the finite element analysis software. The cases of time-invariant and cyclic loading, which is caused by the action of the flow washing the fuel, are considered. The problem is solved on the basis of a full three-dimensional formulation, materials with isotropy of creep-damage properties are considered. In the case of analysis of cyclic deformation with accumulation of hidden damage, amplitude contact stresses and stresses arising during forced oscillations of the fuel rod are taken into account. To take into account the processes of accumulation of hidden damage due to creep, a specially developed subroutine is used to add to the calculation scheme the function of integration in time of the evolution equation for the scalar damage parameter. In this subroutine, in the case of taking into account the cyclic loading, a transition to the equivalent creep problem is also performed, obtained by using the method of two time scales and averaging over the period, the stress cycle asymmetry functions are determined for each integration point of the finite element model. The results of numerical simulation of the creep of the fuel cladding when it is in contact with the fixing element for the case of static and dynamic creep are obtained. The cladding material is zirconium alloy. In the case of taking into account cyclic loading, a significant acceleration of creep processes and accumulation of hidden damage and a reduction in the time to the occurrence of a macroscopic defect are demonstrated. The place of its occurrence is determined, which corresponds to the inner surface of the fuel cladding opposite the location of the fixing element.

Key words: creep, damage, cyclic loading, fuel cladding, user subroutine.

Вступ. Вихід з ладу тепловиделяючих елементів ядерних реакторів (твєлів) є суттєвою проблемою в експлуатаційній практиці. Наявність високих температур, тисків, радіаційного опромінювання та інші чинники суттєво обмежують їхній ресурс [1]. Оцінювання рівня деформування та довготривалої міцності твєлів є важливою задачею при проектуванні реакторів та оцінюванні їхнього поточного стану. Так, наприклад, роботи за Програмою Міністерства енергетики США «Аварійно-стійке паливо» спрямовані на подовження часу до відмови паливних елементів під час постульовано важких аварій порівняно зі стандартною паливною системою зі сплавом UO_2-Zr [2]. Такі роботи на сучасному етапі виконуються з використанням методів комп'ютерного моделювання, побудова рівнянь стану в яких спирається на експериментальні результати та дані

експлуатації. Одним з найбільш розповсюджених та ефективних методів чисельного аналізу напружено-деформованого стану є метод скінченних елементів (МСЕ). Він плідно використовується при аналізі компонентів внутрішньокорпусних пристроїв ядерних реакторів, в тому числі твєлів та їхніх оболонок [3]. В роботі [4] показується що МСЕ ефективно використовується на практиці при аналізі результатів низки розрахунків повзучості при оцінюванні зазору між оболонкою й елементом фіксації та часу до виникнення їхнього контакту.

Оболонки твєлів виконуються з металевих матеріалів. Саме їхній вихід з ладу завдяки значним деформаціям або руйнуванню й обумовлює обмеження терміну роботи твєлів. У зв'язку з цим аналіз напружено-деформованого стану оболонок твєлів при їхньому довготривалому високотемпературному

© Д. В. Бреславський, П. І. Паламарчук, О. К. Морачковський 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 заявля/или про відсутність конфлікту.



деформування продовжує знаходитись у центрі уваги дослідників. Авторами роботи [2] оболонки твелів досліджувалися за допомогою моделювання з використанням програмного засобу (ПЗ) BISON, що враховує різні фізичні явища, у стаціонарних умовах роботи реактору, а також для двох нестационарних процесів. В роботі [5] підкреслюється необхідність постійних зусиль для вдосконалення механічних визначальних моделей, що використовуються в даному ПЗ BISON для оцінки продуктивності палива з метою підвищення надійності твелів. Викладено результати роботи, спрямованої на вдосконалення моделі розтріскування - руйнування, для застосування до осесиметричних двовимірних моделей елементів легководного реактора (LWR). Автори роботи [6] наголошують, що одним з найкращих способів уникнення фрагментації та розсіювання палива є запобігання руйнування оболонки. Реалістичні експлуатаційні умови були реалізовані в кодї BISON для оцінки характеристик палива для моделювання стаціонарного та перехідного режимів еволюції паливних стрижнів до точки, коли стався розрив оболонки. Підкреслюється необхідність більш детального формулювання моделей повзучості матеріалу для адекватного прогнозування руйнування оболонки.

В роботі [7] на основі експериментальних результатів розроблено критерій розриву для прогнозування руйнування за допомогою програмного засобу для аналізу перехідних процесів у паливному стрижні. Використано моделі пластичності та повзучості матеріалу Zircaloy-4. Показано, що розрахункові прогнози деформації розриву за моделлю повзучості добре узгоджувалися з експериментальними результатами у всіх температурних зонах.

Огляд, що міститься у роботі [8], зосереджено на поведінці паливних стрижнів з аварійностійкими оболонками в стаціонарних умовах працюючого реактора ВВЕР-1000. Термомеханічні характеристики паливних стрижнів з паливом UO_2 , що підтримуються двома нещодавно рекомендованими оболонками з FeCrAl та SiC, порівнюються з двома традиційними оболонками з Zr4 та Zr-1%Nb. Досліджуються напружено-деформований стан оболонок при тепловій та радіаційній повзучості, розпуханні та окисленні. Аналізуються дані щодо ймовірності жорсткого контакту між паливом та оболонками.

Авторами [9] використано теорію пластичності кристалів для моделювання повзучості внаслідок опромінення. Розрахунки проведено з використанням МСЕ у програмному комплексі скінченних елементів ABAQUS. Вивчалися величини контактних сил та еволюція зазорів. Результати оброблено як функції від величини опромінення. Автори відзначають, що за відсутності коливань, викликаних потоком теплоносія, ці розрахунки прогнозують внесок повзучості у процес відкриття зазору між плакировочною трубкою та елементами фіксації у вигляді пружин та заглиблень.

В дисертаційній роботі [10] розроблено

тривимірну скінченноелементну модель для елемента реактору CANDU. Використано програмний комплекс ANSYS. Визначався вплив повзучості на загальний деформований стан та можливість контакту оболонки з іншими елементами.

Результати розрахунків частини тепловиділяючої збірки активної зони реактора ВВЕР-1000 у стаціонарному режимі роботи, наведені авторами [11], дозволили оцінити механічний стан оболонки твелу, зрозуміти вплив методів керування реактором на міцність та критерії прийнятності конструкції. Розрахунки виконано з використанням ПЗ START-3. Аналізувався 4-річний цикл роботи у стаціонарному режимі за нормальних умов експлуатації та при їх порушенні.

Повний аналіз підходів до чисельного моделювання деформування та руйнування твелів представлено в огляді [12].

Останнім часом також з'являються роботи, в яких врахування розглянутих вище чинників впливу типу, насамперед високотемпературної повзучості, доповнюється також аналізом зношування поверхонь твелів. В роботі [13] відмічається, що початкові стадії фреттинг процесу або зношування поверхні паливного стрижня пов'язані з релаксацією напружень. Авторами представлено підхід до розробки моделей, які поєднують ці два процеси. Підкреслюється, що повзучість, а не зношування є домінуючим механізмом, який визначає еволюцію контактних напружень. В роботах [14, 15] розглянуто підходи до визначення спільного впливу процесів повзучості, контактної взаємодії та зношування з використанням осесиметричних моделей. Загальний випадок повзучості за умов тривимірного напружено-деформованого стану з урахуванням неосесиметричного контакту твелу з елементом фіксації є більш складним з точки зору його теоретичного опису та практичної реалізації. Цій задачі й присвячено дану статтю.

Математичне формулювання задачі та опис технології розв'язання на основі МСЕ.

Основними механічними факторами, що впливають на міцність та довговічність твелів ядерних реакторів, є вплив навантаження, обумовленого циклічно дією потоків, що омивають оболонку та повзучість матеріалу оболонки під дією внутрішнього та/або зовнішнього тиску.

Математично задачу необхідно ставити у загальній тривимірній постановці. Це обумовлюється відсутністю симетрії контактів та навантажень на оболонку твелу. Отже, об'єктом досліджень є тверде тіло, навантажене в умовах повзучості статичними та циклічно змінними поверхневими навантаженнями, на частині поверхні якого відбуваються періодичні контактні впливи.

Розглянемо тіло V , що обмежено поверхнею S . На частині поверхні тіла S_1 можуть діяти поверхневі навантаження $p(x,t)$, на іншій частині S_2 задано

відомі переміщення \bar{u}_i . На частині поверхні S_C виникають контактні напруження, які обумовлені постійним або періодичним контактом поверхні оболонки з поверхнями пристроїв фіксації твелів. Застосуємо систему координат $\mathbf{x}(x_1, x_2, x_3)$. Деформування при повзучості описуємо вектором переміщень \mathbf{u} , їхніх швидкостей \mathbf{v} ($\mathbf{v} = \dot{\mathbf{u}}$, $d(\cdot)/dt = (\cdot)^{\cdot}$), тензорами напружень $\boldsymbol{\sigma}$ ($\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$) та деформацій $\boldsymbol{\varepsilon}$ ($\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ji}$), ($i, j = 1, 2, 3$), які є функціями координат \mathbf{x} та часу t . Незворотні деформації описуємо тензором повзучості $\boldsymbol{\varepsilon}^c$ з компонентами ε_{ij}^c . Тензорний зв'язок для них з девіатором тензора напружень \mathbf{s} з компонентами s_{ij} й часом визначається за прийнятими рівняннями стану. Вважаємо тіло однорідно прогрітим, тобто кожна його точка має однакову температуру. Вважаємо, що в жодний момент часу напруження не перевищують значень границі плинності, тобто пластичні деформації є відсутніми. Також є відсутніми об'ємні сили, за винятком сил інерції.

У сформульованих вище припущеннях математичну постановку початково-крайової задачі деформування тіл у часі з використанням підходу Лагранжу можливо представити такою системою рівнянь:

$$\begin{aligned} \sigma_{ij,j} &= \rho \dot{v}_i, \quad \varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i} + u_{k,i}u_{k,j}), \quad x_i \in V; \\ \sigma_{ij}n_j &= p_i, \quad x_i \in S_1; \quad i, j = 1, 2, 3; \\ \varepsilon_{ij} &= \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^c; \quad \sigma_{ij} = D_{ijkl}(\varepsilon_{kl} - \varepsilon_{kl}^c); \\ u_i|_{S_2} &= \bar{u}_i, \quad u_i(x, 0) = v_i(x, 0) = \varepsilon_{ij}^c(x, 0) = 0; \\ u_N - g &\leq 0; \quad p_N(t)|_{S_C} \leq 0; \quad (u_N - g)p_N = 0. \end{aligned} \quad (1)$$

Тут використано наступні позначення: ρ – масова густина; \mathbf{n} – вектор одиничної зовнішньої нормалі до границі тіла; D_{ijkl} – компоненти тензору пружних властивостей матеріалу, u_N – нормальна складова вектору переміщення в зоні контакту, $p_N(t)$ – постійне або періодично досягнуте значення контактного тиску, g – поточне значення зазору між тілами [15].

В даному підході розглядатимемо матеріали з ізотропією властивостей. Внаслідок наявності підвищеної температури та внутрішнього тиску в матеріалі оболонки твелу виникають деформації повзучості $\boldsymbol{\varepsilon}^c$. Як відомо [3], процеси повзучості та виникаючі внаслідок їхньої дії процеси перерозподілу напружень обумовлюють накопичення в матеріалі прихованих пошкоджень, які врешті рещт призводять до виникнення макроскопічних дефектів, або зародків тріщин. Опишемо процеси повзучості та накопичення прихованих пошкоджень в матеріалі наступною системою рівнянь [3]:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{ij}^c &= \frac{3}{2}B(H(A)) \frac{(\sigma_{vM})^n}{(1-\omega)^k} s_{ij}; \\ \dot{\omega} &= D(K(A^\omega)) \frac{(\sigma_{eq})^m}{(1-\omega^0)^l}; \\ \omega(x, t_0) &= \omega_0, \quad \omega(x, t_*) = \omega_*; \\ H(A) &= \int_0^1 (1 + A \sin(2\pi\xi))^n d\xi; \\ K(A^\omega) &= \int_0^1 (1 + A^\omega \sin(2\pi\xi))^m d\xi. \end{aligned} \quad (2)$$

Тут прийнято такі позначення: σ_{vM} – інтенсивність напружень Мізесу; σ_{eq} – еквівалентне напруження, вираз якого одержується за допомогою критерію високотемпературної міцності, отриманого для даного матеріалу; ω – скалярний параметр, який описує накопичення пошкоджень внаслідок дії механізмів повзучості; t_* – значення часу до завершення прихованого руйнування; ω_0 – початкове значення параметру пошкоджуваності; ω_* – 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 теплову повзучість й обумовлене нею накопичення пошкоджень та визначаються експериментально; $A = \frac{\sigma_{vM}^a}{\sigma_{eq}}$ та

$$A^\omega = \frac{\sigma_{eq}^a}{\sigma_{eq}}$$

є коефіцієнтами асиметрії циклу напружень, що обчислюється у точці тіла за умов наявності циклічної складової компонент тензору напружень σ_{ij}^a . Якщо розглядаються процеси чисто статичного навантаження, функції впливу $H(A)$ та $K(A^\omega)$ дорівнюють одиниці та відбувається перехід до класичної моделі Одквіста – Работнова [3, 16].

Далі для розв'язання сформульованої задачі методом скінчених елементів відбувається перехід до її варіаційної постановки. Співвідношення для задачі повзучості при незмінному у часі навантаженні є відомими [17] та реалізованими у програмному комплексі ANSYS, який й було залучено до чисельного моделювання. Далі зосередимось на описі реалізації в даному ПК методу розрахунку повзучості, що супроводжується накопиченням пошкоджуваності при швидкому змінюванні навантажень з частотами, які відповідають вимушеним коливанням. Такий процес отримав назву динамічної повзучості, метод розв'язання даної задачі, побудований на використанні методу асимптотичних розвинень та осереднення на періоді представлено у роботах [3, 18].

Програмний комплекс ANSYS надає можливість

моделювати повзучість за допомогою 13 найбільш розповсюджених моделей [20], але жодна з них не описує вищезазначені процеси.

Для уникнення даного обмеження було реалізовано User Programmable Feature (UPF) usercreep [21], що модифікує похідний код ANSYS під власні потреби. В даній процедурі для кожної точки Гауса на кожному кроці інтегрування обчислюються компоненти тензора деформації повзучості.

У випадку статичного навантаження на деформацію повзучості впливає коефіцієнт пошкоджуваності, який визначається за допомогою еволюційного рівняння з (2). Початкове значення коефіцієнту у всіх точках інтегрування вважаємо рівним 0. Для динамічної повзучості додається розрахунок коефіцієнтів асиметрії A , A^o та функцій впливу $H(A)$, $K(A^o)$. Амплітудні значення напружень для кожної точки визначаються як сума згинальних та ударних напружень, які було попередньо обчислено в окремих розрахунках.

Результати чисельного аналізу повзучості оболонки твелу. Як відомо, одним з найбільш небезпечних явищ виходу з ладу твелів ядерних реакторів є їхнє граничне деформування та подальше руйнування в місцях контакту оболонки твелу з пристроями його фіксації у тепловидільних збірках [13]. У зв'язку з необхідністю оцінювання довговічності твелу в описаних умовах й розглянемо відповідну задачу. У багатьох випадках між оболонкою твелу та елементом фіксації існують зазори невеликої величини. Завдяки циклічній дії внутрішніх потоків або температурних градієнтів подібні зазори можуть зменшуватись, призводячи до контактів поверхонь. У багатьох випадках такі контакти мають динамічний характер, призводячи до ударного навантаження. У зв'язку з цим було розглянуто дві задачі: повзучість оболонки твелу при її циклічному контакті з поверхнею фіксуючого елемента та спрощена задача про статичне деформування без врахування циклічності навантаження. Остання задача є необхідною для визначення характеру впливу циклічності навантаження на характер змінювання напружено-деформованого стану та накопичення пошкоджуваності в матеріалі оболонки.

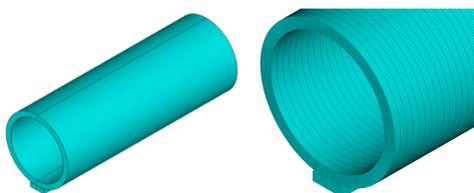


Рис. 1 – Розрахункова схема фрагменту оболонки з елементом фіксації.

Спочатку розглянемо задачу повзучості при незмінному характері навантаження. Аналізується фрагмент оболонки твелу ядерного реактору, що розташований між двома елементами фіксації.

Всередині оболонка контактує з елементом фіксації. На неї діє внутрішній тиск 3 МПа. Внаслідок симетрії розглянуто половину фрагменту. Довжина даної частини оболонки 40 мм, зовнішній діаметр 7.28 мм, внутрішній діаметр 6.176 мм. Ширина елемента фіксації 1.6 мм, довжина 2.7 мм, товщина 0.47 мм. Прийняту розрахункову схему з фрагментом скінченноелементної сітки представлено на рис.1.

Оболонку рівномірно нагріто до температури 300°C. Матеріал оболонки – цирконій, фізико-механічні константи якого при даній температурі складають: модуль пружності $E = 7.1 \cdot 10^4$ МПа, коефіцієнт Пуассона $\nu = 0.36$, $\rho = 6560$ кг/м³. Константи в визначальних співвідношеннях: $B = 4.73 \cdot 10^{-11}$ МПа⁻ⁿ/год, $D = 4.27 \cdot 10^{-8}$ МПа^{-m}/год, $n = 4$, $k = 2$, $m = 2$, $l = 2$ [19]. Матеріал елемента фіксації типу вуглецевої сталі прийнято таким, що деформується пружно та не деформується при повзучості.

При моделюванні виконувалася аналіз збіжності результатів, що отримуються, після чого було обрано скінченноелементну сітку з 120 тис. елементів.

Розрахунками отримано, що за термін приблизно 28000 год. процес накопичення прихованих пошкоджень при повзучості завершується в районі контакту.

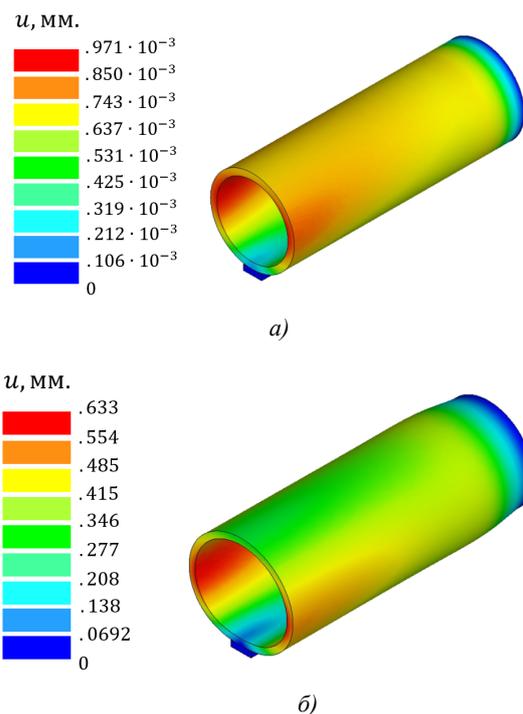


Рис. 2 – Розподіл за моделлю оболонки сумарних переміщень. Статичне навантаження.
а) - $t = 0$; б) - $t = 28000$ год.

Результати аналізу процесів повзучості в оболонці твелу представлено на рис. 2-3. Рис. 2 містить розподіли за оболонкою сумарних переміщень, а рис.3 – параметру пошкоджуваності. На рис 2 надано порівняння даних пружного деформування при $t = 0$ та остаточного розподілу при $t = 28000$ год.

Відмітимо, що з часом деформування

відбувається розширення оболонки, максимальна пошкоджуваність концентрується в районі контакту, але на внутрішній поверхні, де й виникає зародок макроскопічного дефекту.

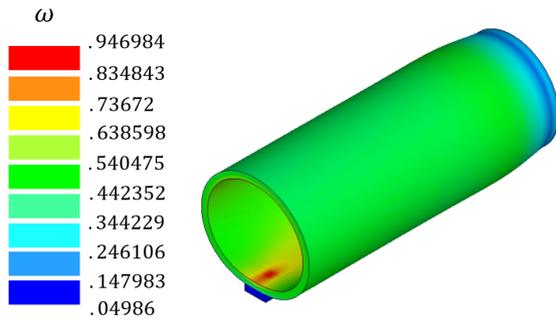


Рис. 3 – Розподіл за моделлю оболонки значень параметру пошкоджуваності. Статичне навантаження. $t = 28000$ год.

Далі проаналізуємо результати, отримані при чисельному моделюванні процесів повзучості та накопичення прихованої пошкоджуваності при циклічному навантаженні. В розрахунковій схемі було прийнято, що при нестационарному змінюванні потоку, що омиває твєл, має місце ударна контактна взаємодія поверхні оболонки з елементом фіксації. Аналіз ударного деформування як окрема задача проводився з використання програмного засобу LS Дуна, що входить до ПК ANSYS. Знайдений розподіл амплітудних напружень в місті контакту та внаслідок загального згину оболонки у часі використовувався при аналізі динамічної повзучості для підрахунку функцій впливу у виразах (2).

Задача повзучості конструктивного елемента при періодичному, або циклічному, навантаженні відноситься до розділу так званої циклічної повзучості, а саме її різновиду при швидкому змінюванні напружень – динамічної повзучості, математичний опис цього процесу представлено у попередньому розділі. Далі розглянемо результати розв'язання задачі динамічної повзучості оболонки.

При чисельному моделюванні було проаналізовано розв'язки з використанням чотирьох різних скінченноелементних моделей. Це було пов'язано з тим, що при циклічному деформуванні процес перерозподілу напружень відбувається інтенсивніше, та для його адекватного відтворення є необхідним перехід до потрібної розмірності моделі та значень кроків за часом. Після досліджень збіжності було обрано модель з 190 тис. елементів. Розрахунками встановлено, що час завершення прихованого руйнування складає $t = 21000$ год., що є значно меншим у порівнянні з випадком суто статичної дії навантаження. Цей факт демонструє істотну інтенсифікацію процесу повзучості за наявності циклічного навантаження. При цьому місце руйнування не змінюється та відповідає тому, що мало місце при статичному навантаженні – на внутрішній поверхні проти елемента фіксації. Розподіл параметру пошкоджуваності за оболонкою у момент, що передує

завершенню прихованого накопичення пошкоджень, надано на рис. 4.

Додавання циклічної складової при чисельному моделюванні також призводить до інтенсифікації деформування. Про це свідчить порівняння даних з рис. 5, де представлено розподіл сумарних переміщень перед завершенням прихованого руйнування в оболонці, з даними рис.2, б. За менший проміжок часу повзучість розвивається істотно інтенсивніше. На рис.6 як ілюстрація наведено графік залежності максимального значення переміщень від часу.

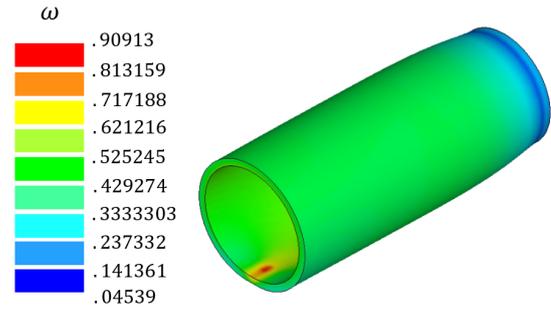


Рис. 4 – Розподіл за моделлю оболонки значень параметру пошкоджуваності. Циклічне навантаження, $t = 21000$ год.

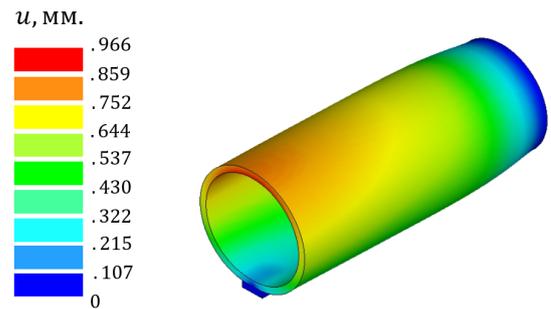


Рис. 5 – Розподіл за моделлю оболонки сумарних переміщень. Циклічне навантаження, $t = 21000$ год.

Рис.7 містить порівняння значень відносних нормальних переміщень на внутрішній (крива 1) та зовнішній (крива 2) поверхнях оболонки в залежності від часу. З графіку видно, що зростання переміщень має місце практично тільки на внутрішній поверхні, сягаючи максимального значення 0.14 мм., що складає приблизно 15% від товщини оболонки. На зовнішній поверхні при її контакті з фіксуючим елементом вони є незначними. Розвиток тріщини, що утворюється після завершення процесу накопичення прихованих пошкоджень, й має оцінити у подальшому час повного руйнування оболонки.

Дані, що отримуються з оглядів при експлуатації твєлів, свідчать, що час їхнього виходу з ладу завдяки руйнуванню у місці контакту з елементом фіксації, є значно меншим отриманого при розрахунках та складає приблизно півроку. У зв'язку з цим для більш адекватного оцінювання довготривалої міцності оболонки твєлу є необхідною побудова визначальних рівнянь з урахуванням зношування при контакті з

поверхню, а також радіаційного впливу, та перехід до моделювання з використанням уточненої постановки задачі.

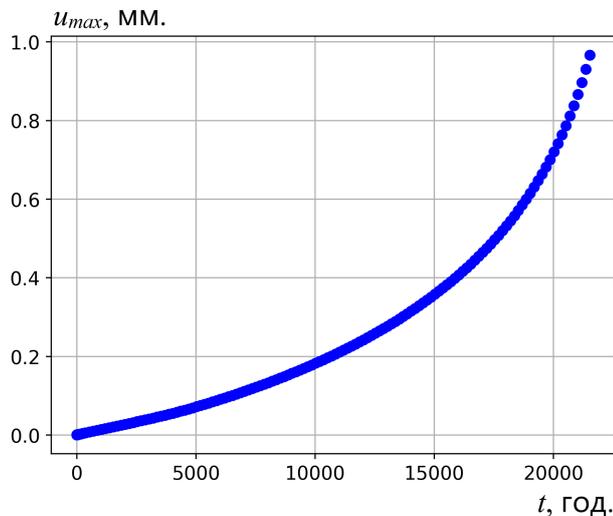


Рис. 6 – Залежність максимального значення переміщень в оболонці від часу. Циклічне навантаження.

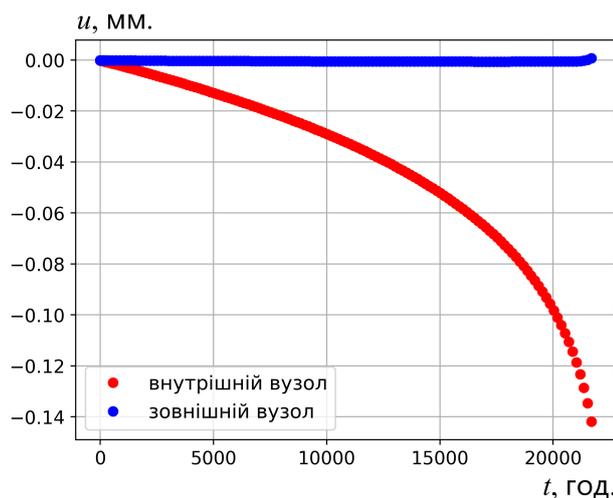


Рис. 7 – Залежність нормальних переміщень на внутрішній та зовнішній поверхні оболонки від часу. Циклічне навантаження.

Висновки. Статтю присвячено викладенню підходу, методу та результатів розрахунку повзучості оболонки твєлу ядерного реактору з умов його контактної взаємодії з фіксуєчим елементом. Розглядаються випадки незмінного у часі та циклічного навантаження, яке обумовлено дією потоку, що омиває твєл. Задачу розв'язано на основі повної тривимірної постановки з використанням методу скінченних елементів. У випадку аналізу циклічного деформування враховуються амплітудні контактні напруження та напруження, що виникають при вимушених коливаннях твєлу. Для врахування процесів накопичення прихованих пошкоджень внаслідок повзучості використано спеціально розроблену користувацьку процедуру, в якій у випадку

врахування циклічного навантаження визначаються функції асиметрії циклу напружень для кожної точки інтегрування скінченноелементної моделі.

Отримано результати чисельного моделювання повзучості оболонки твєлу при її контакті з елементом фіксації для випадку статичної та динамічної повзучості. У випадку врахування циклічного навантаження продемонстровано суттєве прискорення процесів повзучості та накопичення прихованих пошкоджень та зменшення часу до виникнення макроскопічного дефекту. Визначено місце його виникнення, яке відповідає внутрішній поверхні оболонки твєлу навпроти розташування елемента фіксації. У подальшому є необхідність вивчити експериментальні й експлуатаційні дані з метою визначення наявності анізотропії повзучості та пошкоджуваності матеріалу, що розглядається.

Список літератури

1. Lee J. C. Nuclear reactor physics and engineering / J. C. Lee. – John Wiley & Sons. – 2024. <https://doi.org/10.1002/9781394283583>
2. Wagih M. Fuel performance of chromium-coated zirconium alloy and silicon carbide accident tolerant fuel claddings / M. Wagih, B. Spencer, J. Hales, K. Shivran // Annals of Nuclear Energy. – 2018. – Т. 120. – С. 304-318. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2018.06.001>
3. Брєславський Д. В. Деформування та довготривала міцність конструктивних елементів ядерних реакторів. / Д. В. Брєславський. – Монографія. – Харків, Друкарня Мадрид. – 2020. – 249 с.
4. Pandey M. D. Understanding the mechanics of creep deformation to develop a surrogate model for contact assessment in CANDU® fuel channels / M. D. Pandey, F. J. Tallavo, N. C. Christodoulou, B. Leitch, G. A. Bickel // Nuclear Engineering and Design. – 2018. – Т. 330. – С. 141-156. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2018.01.032>
5. Spencer B. W. Improved LWR fuel rod mechanics models / B. W. Spencer, R. J. Gardener // Idaho National Lab. (INL), Idaho Falls, ID (United States), 2018. – №. INL/EXT-18-44749-Rev000. <https://doi.org/10.2172/1467423>
6. Capps N. Characterization of modeling and experimental data inconsistencies from burst testing for high-burnup commercial fuel rod applications / N. Capps, R. Sweet // Journal of Nuclear Materials. – 2022. – Т. 563. – С. 153621. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2022.153621>
7. Yadav A. K. Experimental and numerical investigation on thermo-mechanical behavior of fuel rod under simulated LOCA conditions / A. K. Yadav, C. H. Shin, S. U. Lee, H. C. Kim // Nuclear Engineering and Design. – 2018. – Т. 337. – С. 51-65. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2018.06.023>
8. Ghasabian M. A steady-state performance analysis of fuel rods with accident tolerant claddings for a WWER reactor / M. Ghasabian, S. Talebi, O. Safarzadeh // Progress in Nuclear Energy. – 2025. – Т. 185. – С. 105782. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2025.105782>
9. Patra A. Finite element simulation of gap opening between cladding tube and spacer grid in a fuel rod assembly using crystallographic models of irradiation growth and creep / A. Patra, C. N. Tomé // Nuclear Engineering and Design. – 2017. – Т. 315. – С. 155-169. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2017.02.029>
10. Lee A. K. Finite Element Analysis of an Empty 37-Element CANDU® Fuel Bundle to Study the Effects of Pressure Tube Creep / A. K. Lee, D. Wolk, P. Chan // CNL Nuclear Review. – 2021. Т. 10(1). – С. 39-51. <https://doi.org/10.12943/CNR.2020.00003>
11. Lys S. S. Calculation of Fuel Rod Strength Under Steady-State Operating Condition / S. S. Lys // Materials Science. – 2024. – Т. 59. – №. 5. – С. 585-590. <https://doi.org/10.1007/s11003-024-00814-6>
12. Ding M. A review of the development of nuclear fuel performance analysis and codes for PWRs / M. Ding, X. Zhou, H. Zhang, H. Bian, Q. Yan // Annals of Nuclear Energy. – 2021. – Т. 163. – С. 108542. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2021.108542>
13. Wang H. The effect of coupled wear and creep during grid-to-rod

- fretting / H. Wang, Z. Hu, W. Lu, M. D. Thouless // *Nuclear Engineering and Design*. – 2017. – Т. 318. – С. 163-173. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2017.04.018>
14. Бреславський Д. Комп'ютерне моделювання повзучості циліндра при його контакті зі стрижнями напівциліндричного перерізу / Д. Бреславський, П. Паламарчук // Вісник НТУ "ХПІ": Серія "Динаміка та міцність машин". – 2023. – № 1. – С. 57-63. <https://doi.org/10.20998/2078-9130.2023.1.286192>
 15. Breslavsky D. Creep and Fretting Wear Modelling for Rod-Cylinder Periodical Contacts / D. Breslavsky, P. Palamarchuk, H. Altenbach // *Advanced Structured Materials. State of the Art and Future Trends in Materials Modelling 2*. – Springer, Cham. – 2024. vol 200. – С. 75-98. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2017.04.018>
 16. Lemaitre J. Mechanics of Solid Materials / J. Lemaitre, J. L. Chaboche // – Cambridge University Press. – 1990. – 556 c. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139167970>
 17. Zienkiewicz O. C. The Finite Element Method for Solid and Structural Mechanics / O. C. Zienkiewicz, R. L. Taylor, D. Fox // – Butterworth-Heinemann. – 2014.
 18. Breslavskii D. V. Nonlinear creep and the collapse of flat bodies subjected to high-frequency cyclic loads / D. V. Breslavskii, O. K. Morachkovskii // *International Applied Mechanics*. – 1998. – vol. 34(3). – pp. 287–292.
 19. Морачковський О. К. Розробка методів розрахунку на повзучість анізотропних елементів машинобудівних конструкцій / О. К. Морачковський // Дис. докт. техн. наук. – Х.: «ХПІ», 1985. – 409 с.
 20. ANSYS® Academic Research, Release 24.2, Help System, ANSYS Mechanical APDL Theory Reference, ANSYS, Inc.
 21. ANSYS® Academic Research, Release 24.2, Help System, ANSYS Mechanical APDL Programmer's Reference, ANSYS, Inc.
- References (transliterated)**
1. Lee J. C. Nuclear reactor physics and engineering. John Wiley & Sons, 2024. <https://doi.org/10.1002/97811394283583>
 2. Wagih M., Spencer B., Hales J., Shivran K. Fuel performance of chromium-coated zirconium alloy and silicon carbide accident tolerant fuel claddings // *Annals of Nuclear Energy*. 2018, vol. 120, p. 304-318. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2018.06.001>
 3. Breslavsky D. Deformuvannya ta dovohtryvala mitsnist konstruktivnykh elementiv yadernykh reaktoriv. Monography. Kharkiv, Drukarnia Madryd, 2020. 249 p.
 4. Pandey M. D., Tallavo F. J., Christodoulou N. C., Leitch B., Bickel G. A. Understanding the mechanics of creep deformation to develop a surrogate model for contact assessment in CANDU® fuel channels // *Nuclear Engineering and Design*. 2018, vol. 330, p. 141-156. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2018.01.032>
 5. Spencer B. W., Gardener R. J. Improved LWR fuel rod mechanics models. Idaho National Lab. (INL), Idaho Falls, ID (United States). 2018, №. INL/EXT-18-44749-Rev000 <https://doi.org/10.2172/1467423>
 6. Capps N., Sweet R. Characterization of modeling and experimental data inconsistencies from burst testing for high-burnup commercial fuel rod applications // *Journal of Nuclear Materials*. 2022, vol. 563, #153621. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2022.153621>
 7. Yadav A. K., Shin C. H., Lee S. U., Kim H. C. Experimental and numerical investigation on thermo-mechanical behavior of fuel rod under simulated LOCA conditions // *Nuclear Engineering and Design*. 2018, vol. 337, p. 51-65. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2018.06.023>
 8. Ghasabian M., Talebi S., Safarzadeh O. A steady-state performance analysis of fuel rods with accident tolerant claddings for a WWER reactor // *Progress in Nuclear Energy*. 2025, vol. 185, #105782. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2025.105782>
 9. Patra A., Tomé C. N. Finite element simulation of gap opening between cladding tube and spacer grid in a fuel rod assembly using crystallographic models of irradiation growth and creep // *Nuclear Engineering and Design*. 2017, vol. 315, p. 155-169. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2017.02.029>
 10. Lee A. K., Wowk D., Chan P. Finite Element Analysis of an Empty 37-Element CANDU® Fuel Bundle to Study the Effects of Pressure Tube Creep // *CNL Nuclear Review*. 2021, vol. 10, issue 1, p. 39-51. <https://doi.org/10.12943/CNR.2020.00003>
 11. Lys S. S. Calculation of Fuel Rod Strength Under Steady-State Operating Condition // *Materials Science*. 2024, vol. 59, issue 5, p. 585-590. <https://doi.org/10.1007/s11003-024-00814-6>
 12. Ding M., Zhou X., Zhang H., Bian H., Yan Q. A review of the development of nuclear fuel performance analysis and codes for PWRs // *Annals of Nuclear Energy*. 2021, vol. 163, #108542. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2021.108542>
 13. Wang H., Hu Z., Lu W., Thouless M. D. The effect of coupled wear and creep during grid-to-rod fretting // *Nuclear Engineering and Design*. 2017, vol. 318, p. 163-173. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2017.04.018>
 14. Breslavsky D., Palamarchuk P. Komp'uterne modelivuvannya povzuchosti tsylindra pry yoho kontakti zi stryzhniamy napivtsylindrychnoho pererizu // *Visnyk NTU "KhPI" [Bulletin of the National Technical University "KhPI"]*: Seriya "Dynamika ta mitsnist mashyn". 2023, vol. 1, p. 57-63. <https://doi.org/10.20998/2078-9130.2023.1.286192>
 15. Breslavsky D., Palamarchuk P., Altenbach H. Creep and Fretting Wear Modelling for Rod-Cylinder Periodical Contacts // *Advanced Structured Materials. State of the Art and Future Trends in Materials Modelling 2*. Springer, Cham. 2024, vol 200, p. 75-98. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2017.04.018>
 16. Lemaitre J., Chaboche J. L. Mechanics of Solid Materials. Cambridge University Press. 1990. 556 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139167970>
 17. Zienkiewicz O. C., Taylor R. L., Fox D. The Finite Element Method for Solid and Structural Mechanics. Butterworth-Heinemann. 2014.
 18. Breslavsky D. V., Morachkovskii O. K. Nonlinear creep and the collapse of flat bodies subjected to high-frequency cyclic loads // *International Applied Mechanics*. 1998, vol. 34, issue 3, p. 287–292.
 19. Morachkovskii O. K. Rozrobka metodiv rozrakhunku na povzuchist anizotropnykh elementiv mashynobudivnykh konstruktiv. Dissertation of the Dr. Sc. Kharkiv: NTU "KhPI". 1985. 409 p.
 20. ANSYS® Academic Research, Release 24.2, Help System, ANSYS Mechanical APDL Theory Reference, ANSYS, Inc.
 21. ANSYS® Academic Research, Release 24.2, Help System, ANSYS Mechanical APDL Programmer's Reference, ANSYS, Inc.

Надійшла (received) 23.06.2025

Прийнята до друку (accepted) 20.10.2025

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

Паламарчук Павло Ігорович (Palamarchuk Pavlo) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри комп'ютерного моделювання процесів та систем; м. Харків, Україна; тел.: (057)-707-64-54; ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-7788-3707>; e-mail: Pavlo.Palamarchuk@infiz.khpi.edu.ua

Морачковський Олег Костянтинович (Morachkovsky Oleg) – 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/0000-0001-5466-5110>; e-mail: Oleg.Morachkovyi@khpi.edu.ua