

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»**

**Коритко Юлія Миколаївна**



**УДК 539.3**

**РОЗРОБКА МЕТОДУ РОЗРАХУНКУ ДОВГОВІЧНОСТІ ЕЛЕМЕНТІВ  
КОНСТРУКЦІЙ ПРИ ПЕРІОДИЧНІЙ ЗМІНІ ТЕМПЕРАТУР І  
НАВАНТАЖЕНЬ**

05.02.09 – динаміка та міцність машин

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків – 2011

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі систем і процесів управління Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор  
**Бреславський Дмитро Васильович**,  
Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»,  
декан інженерно-фізичного факультету

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
**Шукаєв Сергій Миколайович**,  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут»,  
професор кафедри динаміки,  
міцності машин та опору матеріалів

доктор технічних наук, професор  
**Шульженко Микола Григорович**,  
Інститут проблем машинобудування  
ім. А.М. Підгорного НАН України,  
керівник відділу вібраційних та  
термоміцносних досліджень

Захист відбудеться « 6 » квітня 2011 р. о 14<sup>30</sup> на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.10 в Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».

Автореферат розісланий « 22 » лютого 2011 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради



В.Г. Сукіасов

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Одним з найважливіших питань сучасного машинобудування є оцінка довговічності та залишкового ресурсу конструктивних елементів. Трубопроводи, лопатки газотурбінних двигунів, сосуди високого тиску, корпуси двигунів внутрішнього згоряння працюють переважно в умовах сумісної дії температурних і силових полів. Для таких відповідальних елементів конструкцій є характерним достатньо високий рівень навантажень, при якому в їхньому матеріалі за умов високих температур розвиваються незворотні деформації повзучості та процеси прихованого руйнування. Експлуатаційні вимоги для достатньо широкого класу конструктивних елементів передбачають періодичний характер процесів нагрівання та навантаження. Це пов'язано з особливостями призначення та функціонування – початком та припиненням роботи, виходом на стаціонарний режим, варіюванням потужністю газотурбінного двигуна, підводом і відводом теплоносіїв у трубопроводах тощо. Періодичне зміння температур та навантажень може суттєво впливати на повзучість і накопичення пошкоджуваності та внаслідок цього на ресурс конструкції. Вплив періодично змінюваного неоднорідного температурного поля на характеристики довговічності залишається недостатньо розглянутим в науковій літературі.

Серед актуальних питань забезпечення необхідного ресурсу відповідальних конструктивних елементів виділяються проблеми розробки моделей, що дозволяли б опис поведінки матеріалів при повзучості за умов періодичної зміни температурних і силових полів, та були б придатні до застосування у прикладних інженерних методах аналізу. Відомі на теперішній час визначальні співвідношення для опису повзучості та накопичення пошкоджуваності внаслідок повзучості розроблено для випадків дії незмінних за часом робочих температур. Недостатньо розвинутими є також методи аналізу, які дозволяли б врахувати вплив періодично змінюваного температурного поля на швидкість деформування конструктивних елементів, накопичення пошкоджень та характеристики довговічності.

Отже, розробка рівнянь стану та методу розрахунку довговічності, що враховують вплив періодично змінюваних робочих температур і навантажень, та виявлення закономірностей такого впливу є завданнями, що мають актуальність у галузі динаміки та міцності машин. Вирішення вказаних задач визначило напрямок досліджень дисертаційної роботи.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційну роботу виконано на кафедрі систем і процесів управління НТУ «ХПІ» у рамках завдань фундаментальних держбюджетних НДР МОН України: «Створення методів аналізу нелінійної динаміки і повзучості деформованих тіл та дискретних систем» (№ 0106U001465), «Розробка методів забезпечення ресурсу елементів конструкцій та систем управління космічних літальних апаратів» (№ 0110U001245), де здобувач була виконавцем окремих розділів.

**Мета і завдання дослідження.** *Мета дослідження* – розробка розрахункового методу оцінки довговічності та довготривалої міцності

конструктивних елементів в умовах спільної дії періодично змінюваних робочих температур і навантажень при повзучості, що супроводжується процесами накопичення пошкоджуваності.

Для досягнення зазначеної мети розв'язані наступні задачі:

- розробка визначальних співвідношень повзучості та пошкоджуваності внаслідок повзучості в умовах періодичної зміни температур і навантажень, доведення достовірності та придатності до застосування отриманих рівнянь;
- створення методу розрахункового оцінювання довговічності та довготривалої конструкційної міцності, що враховує вплив спільної дії статичних та періодично змінюваних температурно-силових полів;
- виявлення закономірностей впливу періодично змінюваних неоднорідних температурних розподілів на характеристики довговічності елементів конструкцій;
- визначення часу закінчення прихованого руйнування та області локалізації максимальної пошкоджуваності ніпелів трубчастого повітророзподільника установки реакторного блоку каталітичного крекінгу;
- встановлення впливу періодичних змін температурного поля на довготривалу конструкційну міцність вигородки атомного реактору при радіаційній повзучості її матеріалу;
- отримання розрахункових оцінок впливу експлуатаційних параметрів на характеристики довговічності лопаток газотурбінних двигунів, що працюють в умовах періодичних теплових змін.

*Об'єкт дослідження* – довговічність та довготривала конструкційна міцність при періодичних змінах температурно-силових полів.

*Предмет дослідження* – елементи конструкцій енергетичного, хімічного та атомного машинобудування, що працюють в умовах періодичних змін температур і навантажень.

*Методи дослідження.* Всі основні теоретичні розробки дисертаційної роботи виконано за використанням методів теорії повзучості та континуальної механіки пошкоджуваності; для створення визначальних співвідношень, що враховують вплив періодичної дії температурно-силових полів, використані асимптотичні методи; для розв'язання задач повзучості застосовано метод скінченних елементів разом з багатокроковим методом прогнозу-корекції інтегрування за часом; для розв'язання систем лінійних алгебраїчних рівнянь – метод Холецького.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає у наступному:

- вперше розроблені та експериментально апробовані рівняння стану повзучості та пошкоджуваності матеріалів конструкцій при періодичній зміні температур;
- отримав подальшого розвитку на випадки спільної дії періодично змінюваних температурно-силових полів метод оцінки довговічності та довготривалої конструкційної міцності;
- вперше встановлено закономірності впливу періодичної зміни температурного поля на швидкість деформування при повзучості, накопичення пошкоджень та час до руйнування елементів конструкцій;

- отримані уточнені розрахункові оцінки довговічності відповідальних конструктивних елементів – вигородки атомного реактору, лопаток турбомашин, ніпелів трубчастого повітророзподільника установки реакторного блоку каталітичного крекінгу.

**Практичне значення одержаних результатів.** Створені при виконанні дисертаційної роботи метод та програмні засоби аналізу довговічності та довготривалої міцності елементів конструкцій можуть використовуватися при проектуванні нових елементів машин у сучасному енергетичному, авіаційному, хімічному, транспортному, атомному машинобудуванні та при оцінці залишкового ресурсу функціонуючих конструктивних елементів.

Розрахункові оцінки ресурсу конструкцій реакторного блоку каталітичного крекінгу та рекомендації щодо забезпечення максимально можливого терміну функціонування обладнання при різних варіантах умов роботи використані у ЗАТ «ЛІНІК» (м. Лисичанськ). Висновки щодо довговічності конструктивних елементів активної зони реакторів використані в Інституті фізики твердого тіла, матеріалознавства та технологій Національного наукового центру «Харківський фізико-технічний інститут» (м. Харків) при аналізі залишкового ресурсу вигородки атомного реактору.

**Особистий внесок здобувача.** Основні результати, що представлені в дисертаційній роботі, здобувачем отримані самостійно. Серед них: рівняння стану повзучості та пошкоджуваності внаслідок повзучості металевих матеріалів при періодичних змінах температури; математична постановка та метод розв'язку задач повзучості в умовах теплосмін для елементів конструкцій, розрахункові схеми яких відповідають двовимірним задачам теорії повзучості: плоскому напруженому стану, плоскій деформації та узагальненому плоскому напружено-деформованому стану, який має місце у осесиметричних тілах обертання при осесиметричному навантаженні; визначення впливу періодичних змін неоднорідних температурних полів на оцінки напружено-деформованого стану та довготривалої міцності конструктивних елементів; аналіз довговічності лопаток газотурбінних двигунів; розрахункові дані щодо накопичення прихованих пошкоджень в ніпелях трубчастого повітророзподільника установки реакторного блоку каталітичного крекінгу при різних умовах роботи; оцінки впливу періодичних змін температурного поля при радіаційній повзучості вигородки атомного реактору.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати дисертаційної роботи доповідалися на: XV, XVI, XVII, XVIII міжнародних науково-практичних конференціях «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (м. Харків, 2007-2010 рр.), 2-й та 3-й Міжнародних конференціях з нелінійної динаміки «Nonlinear Dynamics - 2007», «Nonlinear Dynamics - 2010» (м. Харків, 2007 р., 2010 р.), Міжнародній науково-технічній конференції «Актуальные проблемы прикладной механики и прочности конструкций» (м. Ялта, 2009 р.), Міжнародній науково-технічній конференції «Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи його діагностування і прогнозування» (м. Тернопіль, 2009 р.), 8-й міжвузівській науково-практичній

конференції «Можливості використання методів механіки для розв'язання питань безпеки в умовах надзвичайних ситуацій» (м. Харків, 2009 р.), міжнародній науково-технічній конференції «Міцність матеріалів та елементів конструкцій» (м. Київ, 2010 р.). Робота, в тому числі і в повному обсязі, розглядалась та обговорювалась в НТУ «ХПІ» на семінарах кафедр динаміки та міцності машин, систем і процесів управління (2007-2010 рр.).

**Публікації.** Основний зміст дисертації відображено у 14 наукових публікаціях, з них: 5 статей у наукових фахових виданнях ВАК України, 1 свідоцтво авторського права на твір.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, додатків, списку використаних джерел. Повний обсяг дисертації складає 206 сторінок; з них 15 рисунків та 3 таблиці по тексту, 62 рисунки та 1 таблиця на 31 окремій сторінці, 4 додатки на 5 сторінках, список використаних літературних джерел з 212 найменувань на 24 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність, теоретичну та практичну цінність дисертаційної роботи, показано зв'язок роботи з науковими темами, сформульовано мету та основні завдання, визначено об'єкт, предмет та методи дослідження, окреслено наукову новизну, практичне значення одержаних результатів, наведено дані про особистий внесок здобувача, апробацію результатів роботи та публікації за темою дисертації.

У **першому розділі** проаналізовані наукові роботи, які стосуються задач повзучості та довготривалої міцності матеріалів та конструктивних елементів, в тому числі при періодично змінюваних температурах та навантаженнях.

Розвиток теорії повзучості та континуальної механіки пошкоджуваності був обумовлений видатним внеском І.І. Гольденблатта, В.П. Голуба, Л.М. Качанова, А.Дж. Кеннеді, Ж. Леметра, М.М. Малініна, С. Мураками, Є. Орована, Г.С. Писаренка, Ю.М. Работнова, А.Р. Ржаніцина, К.Р. Содерберга, В.А. Стрижала, Г.М. Третьяченка, В.Т. Троценка, Ж.Л. Шабоша та інших вчених. Значний внесок у розвиток методів розрахункового оцінювання повзучості та довготривалої міцності внесли К.-Ю. Бате, Дж. Бойл, О. Зенкевич, М.М. Малінін, Д.Л. Маріотт, М.С. Можаровський, Р.К. Пенні, А.М. Підгорний, К.М. Рудаков, Д. Спенс, Д. Хейхерст, Ю.М. Шевченко, С.М. Шукаєв та інші. Аналізу довговічності елементів конструкцій присвячені роботи Х. Альтенбаха, Є.О. Антипова, М.І. Бобиря, М.В. Бородія, А.В. Бурлакова, Г.І. Львова, М.С. Можаровського, О.К. Морачковського, Ж.Л. Шабоша, М.Г. Шульженка та інших.

Зроблено висновок, що на сучасному етапі розвитку науки ефективні інженерні методи оцінки довготривалої міцності елементів конструкцій, які зазнають впливу змінюваного температурного поля, залишаються недостатньо розробленими. Створення рівнянь стану, які враховували б вплив періодичної зміни температури, та застосування цих визначальних співвідношень в методі скінченних елементів, є основою для створення інженерного методу розрахунку

довговічності. Такий метод, після всебічної перевірки вірогідності, дозволив би проводити аналіз довготривалої міцності поширених відповідальних елементів конструкцій.

У **другому розділі** запропоновані та експериментально перевірені уточнені рівняння стану повзучості та пов'язаного з нею накопичення пошкоджуваності, що враховують періодичну зміну навантажень та температури, періоди яких у загальному випадку можуть бути різними.

Теоретична основа для розробки рівнянь стану матеріалів, що деформуються внаслідок повзучості, забезпечена термодинамічним обґрунтуванням незворотних процесів на основі припущення про існування потенціалу швидкості деформацій повзучості. Надано метод отримання матеріальних сталих для законів повзучості й пошкоджуваності за експериментальними дослідженнями повзучості та довготривалої міцності при статичному навантаженні та незмінних значеннях температур.

Для високотемпературної повзучості використовується найбільш поширена степенева залежність від напруження  $\sigma$  – закон типу Бейлі-Нортон та експоненціальна – від температури  $T$

$$\dot{c} = b \exp(-Q/T) \sigma^n = B(T) \sigma^n, \quad c(0) = 0, \quad (1)$$

де  $\dot{c}$  – швидкість деформації повзучості;  $Q = H/R$ ,  $H$  і  $R$  – енергія активації процесу повзучості та універсальна газова стала;  $b$ ,  $n$  – матеріальні сталі, що визначають експериментально.

В точці матеріалу діє комбіноване силове та температурне навантаження:  $\bar{\sigma} = \sigma + \sigma^1$ ,  $\bar{T} = T + T^1$ , під одночасною дією незмінних у часі напруження  $\sigma$  ( $\sigma \neq 0$ ) та температури  $T$  ( $T \neq 0$ ), та доданого напруження  $\sigma^1$  і доданої температури  $T^1$ .  $\sigma^1$ ,  $T^1$  змінюються у часі за законами одно-періодичних рядів Фур'є, з періодами –  $T_\sigma$ ,  $T_T$  відповідно (циклічні частоти –  $f_\sigma = 1/T_\sigma$ ,  $f_T = 1/T_T$ ):

$$\bar{\sigma} = \sigma + \sigma^1 = \sigma \left( 1 + \sum_{k=1}^{\infty} M_k \sin \left( \frac{2\pi k}{T_\sigma} t + \beta_k \right) \right), \quad (2)$$

$$\bar{T} = T + T^1 = T \left( 1 + \sum_{i=1}^{\infty} M_i^T \sin \left( \frac{2\pi i}{T_T} t + \beta_i^T \right) \right), \quad (3)$$

де  $M_k = \sigma^{ak} / \sigma$ ,  $M_i^T = T_i^a / T$  – коефіцієнти асиметрії періодичних змін напруження та температури;  $\sigma^{ak}$ ,  $\beta_k$ ,  $T_i^a$ ,  $\beta_i^T$  – амплітудні значення й фази періодично змінюваних складових напруження та температури.

Враховуючи, що час протікання процесу повзучості  $t_* \gg \max(1/f_\sigma, 1/f_T)$ , тобто значно більший ніж періоди циклічних складових напруження й температури, за законами асимптотичних розвинень та після осереднення закону повзучості (1) при періодично змінюваному напруженні, умовно фіксуючи значення температури, отримуємо рівняння стану повзучості матеріалів за умов періодичної зміни напружень. Умовно зафіксувавши значення напруження, отримуємо рівняння стану повзучості матеріалів за умов періодичної зміни напружень та температури.

За гіпотезою Мізеса еквівалентними швидкостями деформацій повзучості та напружень прийняті їхні інтенсивності, які є другими інваріантами відповідних тензорів. Приймаючи при складному напруженому стані  $\dot{c}_i = B(T)\sigma_i^{n+1}$ , отримано узагальнене рівняння стану повзучості за умов періодичної зміни температури і напружень у тензорному вигляді:

$$\dot{\mathbf{c}} = \frac{3}{2} g_T(T) g_n(M_k^{\sigma_i}) \sigma_i^n \mathbf{s}, \quad \mathbf{c}(0) = 0, \quad (4)$$

$$g_T(T) = b \int_0^1 \exp\left(-\frac{Q}{T} \left(1 + \sum_{i=1}^{\infty} M_i^T \sin(2\pi i \xi)\right)^{-1}\right) d\xi, \quad M_i^T = T_i^a / T, \quad (5)$$

$$g_n(M_k^{\sigma_i}) = \int_0^1 \left(1 + \sum_{k=1}^{\infty} M_k^{\sigma_i} \sin(2\pi k \xi)\right)^n d\xi, \quad M_k^{\sigma_i} = \sigma_i^{ak} / \sigma_i. \quad (6)$$

Залежність параметру пошкоджуваності внаслідок високотемпературної повзучості має вигляд:

$$\dot{\omega} = d \frac{\sigma^r}{(1-\omega)^l} \exp\left(-\frac{\bar{Q}}{T}\right) = D(T) \frac{\sigma^r}{(1-\omega)^l}, \quad \omega(0) = \omega_0, \quad \omega(t_*) = \omega_*. \quad (7)$$

Тут позначено:  $\bar{Q} = \bar{H} / R$ ;  $\bar{H}$  – енергія активації процесу пошкоджуваності при повзучості;  $\omega_0$  – значення параметру пошкоджуваності при  $t=0$ ;  $t_*$ ,  $\omega_*$  – значення часу та параметру пошкоджуваності в момент закінчення прихованого руйнування;  $d$ ,  $r$ ,  $l$ ,  $\bar{Q}$  – матеріальні сталі, що визначаються за експериментальними кривими довготривалої міцності матеріалу.

Аналогічно, як і при отриманні рівняння повзучості, після усереднення на періоді спочатку змінюваної складової напруження, при умовно зафіксованому значенні температури, а потім змінюваної складової температури, отримано кінетичне співвідношення для параметру пошкоджуваності при простому напруженому стані. Узагальнення для складного напруженого стану здійснюється введенням еквівалентного напруження.

$$\dot{\omega} = g_r(M_k^{\sigma_e}) g_T^{\omega}(T) \frac{(\sigma_e)^r}{(1-\omega)^l}, \quad \omega(0) = \omega_0, \quad \omega(t_*) = \omega_*, \quad (8)$$

$$g_r(M_k^{\sigma_e}) = \int_0^1 \left(1 + \sum_{k=1}^{\infty} M_k^{\sigma_e} \sin(2\pi k \xi)\right)^r d\xi, \quad M_k^{\sigma_e} = \sigma_e^{ak} / \sigma_e, \quad (9)$$

$$g_T^{\omega}(T) = d \int_0^1 \exp\left(-\frac{\bar{Q}}{T} \left(1 + M^T \sin(2\pi \xi)\right)^{-1}\right) d\xi, \quad M_i^T = T_i^a / T. \quad (10)$$

Постульовано існування потенціалу швидкості деформацій повзучості, за яким, згідно закону градієнтальності, рівняння стану повзучості має вигляд

$$\dot{c}_{ij} = \frac{3}{2} \frac{g_T(T) g_n(M_k^{\sigma_i}) \sigma_i^{n-1}}{(1-\omega)^m} s_{ij}, \quad c_{ij}(0) = 0. \quad (11)$$

Рівняння (11), (8) описують повзучість матеріалів, що пошкоджуються внаслідок повзучості при періодично змінюваних температурах і напруженнях, та мають бути доповнені співвідношеннями (5), (6), (9), (10) для конкретизації виразів функцій асиметрії.



Отримані рівняння стану (11), (8) перевірялися шляхом порівняння розрахункових даних та даних відомих експериментів на повзучість та довготривалу міцність. Досліджено поведінку вуглецевої сталі (експерименти під керівництвом С. Тайра, прямокутний цикл зміни температури), сплаву EI437Б (синусоїдальний цикл зміни температури, рис. 1), сталі 1X18Н9Т (зміна температури за циклом виду трикутника, рис. 2), нержавіючої сталі S-321 (рис. 3) та інконелю «Х» (експерименти Г. Гварнієрі, розглянуті трапецієподібні цикли зміни температури при різних параметрах циклів), сплаву S-816 (експерименти Дж. Міллера, пилкоподібний цикл зміни температури), сплаву інконель 100 (дослідження довготривалої міцності при циклічно змінюваному напруженні при різних рівнях температур).

На рис. 1 кривими 1, 3 позначена залежність деформації повзучості від часу при постійній температурі 973К та 923К, кривою 2 – при постійному напруженні та періодично змінюваній за синусоїдальним циклом температури. На рис. 2 зміна температури розглядалася за трикутним циклом з параметрами  $T = 913\text{К}$ ;  $T^a = 100\text{К}$ , 80К, 60К, 40К, 20К відповідно до нумерації кривих. Крива 1 рис. 3 отримана з врахуванням трапецієподібного циклу зміни температури від 293К до 923К, крива 2 – 293К-1003К. Точками позначені експериментальні дані.

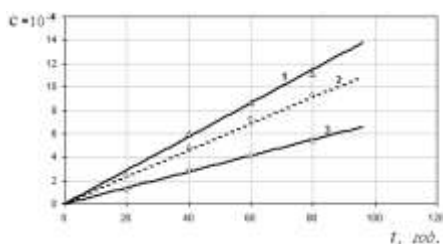


Рис. 1. Криві повзучості сплаву EI437Б

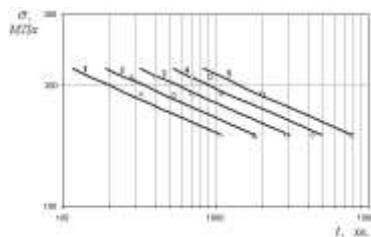


Рис. 2. Криві довготривалої міцності сталі 1X18Н9Т

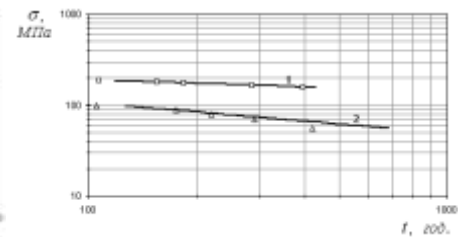


Рис. 3. Криві довготривалої міцності для сталі S-321

Рівень розбіжності розрахункових та експериментальних результатів в усіх випадках не перевершує 10% для деформації повзучості при періодичних змінах температур та становить від 20 до 10% при аналізі накопичення пошкоджуваності внаслідок повзучості за визначеним часом до руйнування.

Таким чином, розроблені рівняння стану, отримані на основі концепції континуальної механіки твердого деформованого тіла та континуальної механіки пошкоджуваності, враховують основні фізико-механічні ефекти термосилового експлуатаційного навантаження та відповідають усім фізичним вимогам до визначальних співвідношень. Створені залежності дозволяють з достатньо високою достовірністю описати нелінійне деформування матеріалу та кінетику параметру пошкоджуваності при сумісній дії статичних і періодично змінюваних складових температури, статичних і періодично змінюваних складових навантаження.

**Третій розділ** присвячено розробці методу розрахункового оцінювання довговічності конструктивних елементів, що експлуатуються при змінних у часі теплових полях та навантаженнях. Надано загальну математичну постановку задач повзучості тіл з урахуванням пошкоджуваності; скінченноелементне формулювання визначених вихідних систем рівнянь повзучості конструкцій;

алгоритми розрахунків та опис програмного забезпечення; результати досліджень з достовірності метода, а також результати проведених досліджень з впливу періодичної зміни температури на характеристики процесу повзучості.

Для формулювання загальної математичної постановки початково-крайової задачі повзучості тіл об'ємом  $V$  з ізотропними властивостями приймемо, що на частині поверхні тіла  $S_1$  задані незмінні у часі переміщення  $u_{i|S_1} = \bar{u}_i$ , на частині поверхні  $S_2$  прикладене поверхневе навантаження (12), що має постійну та періодично змінювану у часі складові. На частині поверхні тіла  $S$  задано значення температури (13) сумою незмінної та періодично змінюваною у часі складових.

$$p_i(x,t) = p_i^0(x) + \Phi_i(x,t), \quad x \in S_2, \quad \Phi_i(x,t) = p_i^a(x) \sum_{k=1}^{\infty} A_k \sin(\Omega_k t + \beta_k^p); \quad (12)$$

$$\tilde{T}(x,t) = T(x) + T^1(x,t), \quad x \in S, \quad T^1(x,t) = T^a(x) \sum_{k=1}^{\infty} A_k^T \sin(\Omega_k^T t + \beta_k^T), \quad (13)$$

де  $p_i^a(x)$ ,  $A_k$ ,  $\Omega_k$ ,  $\beta_k^p$ ,  $T^a(x)$ ,  $A_k^T$ ,  $\Omega_k^T$ ,  $\beta_k^T$  – відомі за значеннями величини.

За законом Дюамеля-Неймана залежність напружень від деформацій та температури має вигляд:

$$\sigma_{ij} = \lambda \varepsilon_0 \delta_{ij} + 2G(\varepsilon_{ij} - c_{ij}) - (3\lambda + 2G)\varepsilon_{ij}^T, \quad \varepsilon_0 = \varepsilon_{km} \delta_{km}, \quad \varepsilon_{ij}^T = \alpha \bar{T} \delta_{ij}, \quad (14)$$

де  $\lambda$ ,  $G$  – параметри Ляме;  $\alpha$ ,  $\delta_{ij}$  – коефіцієнт теплового розширення та символ Кронекера;  $\bar{T} = \bar{T}(x,t)$  – температурне поле тіла.

Зміну у часі поля температури в тілі отримаємо за розв'язанням рівняння нестационарної теплопровідності:

$$a_T^2 \Delta \bar{T} + Q_T = \dot{\bar{T}}, \quad a_T^2 = k_T / (c_T \rho), \quad Q_T = F / (c_T \rho), \quad (15)$$

де  $\Delta$  – оператор Лапласа;  $a_T$ ,  $k_T$ ,  $c_T$  – коефіцієнти теплопровідності, тепловіддачі і теплоємності;  $\rho$ ,  $F$  – густини матеріалу і теплових джерел.

Основну систему рівнянь визначення напружено-деформованого стану тіла при повзучості за умов відомого за розв'язанням (15) поля температури тіла –  $\bar{T}(x,t)$ , представимо у вигляді:

$$\sigma_{ij,j} = \rho \ddot{u}_i, \quad x_i \in V; \quad \sigma_{ij} n_j = p_i^0(x) + \Phi_i(x,t), \quad x_i \in S_2; \quad u_i|_{S_1} = \bar{u}_i, \quad x_i \in S_1; \quad (16)$$

$$\varepsilon_{ij} = (u_{i,j} + u_{j,i}) / 2, \quad x_i \in V; \quad \sigma_{ij} = \lambda \varepsilon_0 \delta_{ij} + 2G(\varepsilon_{ij} - c_{ij}) - (3\lambda + 2G)\alpha \bar{T} \delta_{ij}.$$

Використовуючи методику асимптотичних розвинень для компонентів  $\mathbf{u}$ ,  $\boldsymbol{\varepsilon}$  та  $\boldsymbol{\sigma}$ , обмежуючись першим наближенням та застосувавши процедуру осереднення на періоді, отримано систему рівнянь, що описує процеси повзучості неоднорідно нагрітих тіл у масштабі повільного часу:

$$\sigma_{ij,j} = 0, \quad x_i \in V; \quad \sigma_{ij} n_j = p_i^0, \quad x_i \in S_2; \quad u_i|_{S_1} = \bar{u}_i, \quad x_i \in S_1; \quad (17)$$

$$\varepsilon_{ij} = (u_{i,j} + u_{j,i}) / 2, \quad x_i \in V; \quad \sigma_{ij} = \lambda \varepsilon_0 \delta_{ij} + 2G(\varepsilon_{ij} - c_{ij}) - (3\lambda + 2G)\alpha \bar{T} \delta_{ij}.$$

Система (17) повинна бути доповнена визначальними співвідношеннями (11), 8) з виразами для функцій періодичних складових температури та навантаження (5), (6), (9), (10).

Для конкретизації рівнянь стану (11) та (8) необхідно визначити поля напружень  $\sigma_{ij}^{ak}$  і температур  $\bar{T}_i^a$ . Для визначення амплітудних значень напружень  $\sigma_{ij}^{ak}$  сформульована система рівнянь, яка відповідає рівнянням термопружності тіла при заданих на відповідних частинах поверхні тіла періодично змінюваних функціях тиску та температури. Розглянуто випадки, коли частоти нагріву та навантаження є значно меншими нижчої власної частоти тіла.

У роботі проаналізовані повільні процеси деформування, тому інерційний доданок у розрахунках не враховується. Амплітудні значення періодично змінюваних у швидкому масштабі часу невідомих температур  $\bar{T}^{(1)}$  розраховуються після розв'язання задачі нестационарної теплопровідності для циклу нагріву-охолодження:

$$a^2 \Delta \bar{T}^{(1)} + Q^{(1)} = \bar{T}_{,\xi}^{(1)}, \quad T^{(1)}(\xi) \Big|_{S_3} = \tilde{T}^{(1)}(\xi), \quad 0 \leq \xi \leq 1. \quad (18)$$

Найбільш придатним для розв'язання задачі повзучості елементів конструкцій, що знаходяться в умовах спільної дії періодичного навантаження та нагріву (17), є метод скінченних елементів (МСЕ). В роботі отримано векторно-матричне формулювання задачі за схемою МСЕ:

$$\begin{aligned} & \left( \int_{V^{elem}} [B^{elem}]^T [D] [B^{elem}] dV \right) \{ \dot{u}^{nod} \} = \\ & = \int_{V^{elem}} [B^{elem}]^T [D] \{ \dot{c}^{elem} \} dV + \int_{V^{elem}} [B^{elem}]^T [D] \{ \dot{\varepsilon}^{T elem} \} dV + \int_{S_2^{elem}} [N]^T \{ \dot{p} \} dS; \\ & \{ \dot{c}^{elem} \} = [D] \left( \{ \dot{\varepsilon}^{elem} \} - \{ \dot{c}^{elem} \} - \{ \dot{\varepsilon}^{T elem} \} \right); \quad \{ \dot{\varepsilon}^{elem} \} = [B^{elem}] \{ \dot{u}^{nod} \}. \end{aligned} \quad (19)$$

Індексми *nod* та *elem* позначено величини, які відносяться до вузлів чи елементів скінченноелементних моделей відповідно;  $V^{elem}$  – об'єм СЕ;  $S_2^{elem}$  – частина межі даного СЕ, що належить до поверхні  $S_2$ , на якій задано граничні умови в напруженнях;  $[B^{elem}]$  – матриця деформацій СЕ;  $[D]$  – матриця, що містить пружні характеристики матеріалу (матриця пружності);  $\{ \dot{u}^{nod} \}$  – вектор вузлових переміщень;  $\{ \sigma^{elem} \}$  та  $\{ \varepsilon^{elem} \}$  – вектори напружень та деформацій у скінченному елементі (СЕ);  $\{ \varepsilon^{T elem} \}$  – вектор температурних деформацій у СЕ;  $\{ \dot{c}^{elem} \}$  – вектор деформацій повзучості в СЕ;  $[N]$  – матриця, побудована з допомогою функцій форми СЕ;  $p$  – поверхневі навантаження;

$\int_{V^{elem}} [B^{elem}]^T [D] [B^{elem}] dV$  – матриця жорсткості СЕ.

В роботі скінченноелементну постановку задачі виконано для розрахункових схем, які відповідають двовимірним задачам теорії повзучості: плоскому напруженому стану, плоскій деформації та узагальненому плоскому напружено-деформованому стану. Для розв'язання задач за всіма трьома схемами застосовано трикутний трьохвузловий СЕ.

Загальна скінченноелементна постановка задачі повзучості

для елементів конструкцій, що розглядаються, при періодичній зміні напружень та температури має вид:

$$[K]\{\dot{u}\} = \{\dot{F}\} + \{\dot{F}^T\} + \{\dot{F}^C\}; \quad (21) \quad \{\dot{F}\} = \sum_{N_{elem} S_2} \int [N]^T \{\dot{p}\} dS; \quad (22)$$

$$\{\dot{F}^T\} = \sum_{N_{elem} V_{elem}} \int [B^{elem}]^T \cdot [D] \cdot \{\dot{\epsilon}^T\} dV; \quad (23) \quad \{\dot{F}^C\} = \sum_{N_{elem} V_{elem}} \int [B^{elem}]^T \cdot [D] \cdot \{\dot{c}\} dV. \quad (24)$$

Співвідношення (21)–(24) записано для глобального вектору вузлових переміщень  $\{u\}$  та векторів вузлових сил  $\{F\}$ , обумовлених поверхневими навантаженнями;  $\{F^T\}$ , обумовлених температурними деформаціями;  $\{F^C\}$ , обумовлених деформаціями повзучості,  $[K]$  – глобальна матриця жорсткості SE моделі. Значення компонентів вектору  $\{\dot{c}\}$  розраховуються за рівняннями:

$$\{\dot{c}\} = g_n (M_k^{elem}) g_T (T) \frac{(\sigma_i)^{n-1}}{(1-\omega)^m} [C] \{s\}, \quad \{c\}(0) = 0; \quad (25)$$

$$\dot{\omega} = g_r (M_k^{elem}) g_T^\omega (T) \frac{(\sigma_e)^r}{(1-\omega)^l}, \quad \omega(0) = 0, \quad \omega(t_*) = 1. \quad (26)$$

Загальна постановка задачі потребує розв'язку системи диференційних рівнянь (21) з початковими умовами  $\{u\}|_{t=0} = \{u^{elast}\}$  відносно вектору невідомих вузлових переміщень у вузлах кожного SE  $\{u\}$ . Після знаходження  $\{u\}$  у визначених моментах часу відбувається перехід до локального рівня кожного SE та проводиться визначення значень переміщень  $\{u^{elem}\}$ , деформацій  $\{\epsilon^{elem}\}$  та напружень  $\{\sigma^{elem}\}$  в елементі, а також параметру пошкоджуваності  $\omega$ . Інтегрування проводиться до того часу, доки параметр пошкоджуваності у будь-якому елементі не досягне свого критичного значення (26).

Для розв'язання системи типу (21) в роботі застосовано процедуру методу прогнозу–корекції з використанням даних розв'язку задачі пружного деформування  $\{u^{elast}\}$  та задачі повзучості в наступний момент часу, які отримують використанням методу Ейлера. Розв'язання задач (21) відносно вектору швидкостей вузлових переміщень на кожному кроці інтегрування, а також термопружних задач, виконується застосуванням методу Холецкого.

Запропонований у роботі метод розрахунку повзучості та пошкоджуваності періодично навантажених елементів конструкцій реалізовано у вигляді програмного комплексу, в якому закладено можливості розв'язання двовимірних задач теорії повзучості за допомогою МСЕ. На препроцесорну частину комплексу – програму «Divider 2.6с», призначену для створення геометричної моделі та генерації скінченноелементної сітки, отримане свідоцтво авторського права на твір.

Визначення вірогідності розроблених методів, алгоритмів та програмного комплексу у цілому проводилось шляхом порівняння результатів розв'язання окремих задач з відомими аналітичними – точними чи приблизними даними. Було розглянуто задачі пружності та повзучості циліндру під дією внутрішнього тиску, повзучості пластини з круговим отвором під дією

розтяжної сили, термопружності циліндру під внутрішнім тиском у постановці плоскої деформації, повзучості труби під дією внутрішнього тиску в неоднорідному температурному полі. В усіх розглянутих задачах розбіжність розрахункових з аналітичними або експериментальними даними не перевищує 15%.

Отримані оцінки впливу періодичної зміни однорідного та неоднорідного температурного поля на час та характер перерозподілу компонент напруженого стану циліндру. Аналіз проводився вивченням процесу повзучості у товстостінних трубах. Розглянуто повзучість циліндру при постійній за часом та нерівномірно розподіленій по радіусу температурі. Показано можливість використання наближених оцінок повзучості при значеннях матеріальних сталих матеріалу у рівняннях (11), (8), визначених для середньої при розподілу за логарифмічним законом температури.

Досліджено повзучість циліндру при періодично змінюваній рівномірно розподіленій за перерізом температурі. Проведений аналіз показує значний вплив періодичної зміни температури в циліндрі, навантаженому внутрішнім тиском, на час закінчення процесу перерозподілу напружень внаслідок повзучості. Періодична зміна температури у випадку швидкого нагрівання та охолодження у циклі не змінює характеру перерозподілу напружень, але час цього процесу суттєво змінюється порівняно зі значеннями, отриманими в задачах з постійним за часом температурним полем.

Проаналізовано вплив періодичної зміни неоднорідної за перерізом температури на час та характер перерозподілу напружень при повзучості. Розглянуто задачу, в якій температура газового потоку усередині товстостінної труби періодично змінюється за прямокутним циклом з періодом 12 хвилин: 753K – перші 6 хвилин; 613K – друга половина циклу. Температура навколишнього середовища на її зовнішній поверхні залишається постійною весь час циклу і становить 613K. Циліндр знаходиться під дією внутрішнього тиску в 5 МПа. За результатами рішення конвективної нестационарної задачі теплопровідності знайдено розподіли температури за радіусом циліндра для різних моментів часу. Ці дані прийнято як вихідні для розв'язання

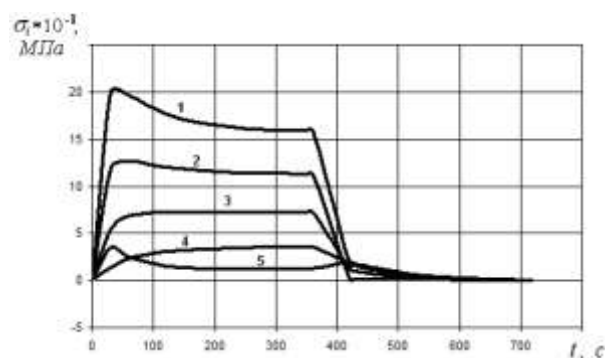


Рис. 4. Цикли зміни інтенсивності напружень у точках від внутрішнього радіуса до середини циліндра

послідовності задач термопружності. Для кожної точки дискретизації за допомогою інтерполяційної процедури отримано цикли зміни кожного компонента тензора напружень, а також інтенсивності напружень (рис. 4). Криві 1–5 рис. 4 відповідають точкам, координати яких змінюються від внутрішнього радіуса до середини циліндра з кроком 3 мм.

Отримані залежності температури та напружень від часу в різних точках радіуса було використано для одержання функцій асиметрії циклів напружень і температури. Проведені розрахунки з використанням знайдених функцій показали, що періодична зміна температури приводить до значного зменшення

часу закінчення процесу перерозподілу напружень внаслідок повзучості та зміни його характеру. Це обумовлено в першу чергу циклічною зміною напружень, що виникають у результаті нерівномірного нагрівання циліндра по радіусу. Врахування поступового нагрівання та охолодження в циклі не приводить до істотної зміни характеру перерозподілу напружень і змінення часу закінчення перерозподілу напружень внаслідок повзучості. Врахування різних значень температури в кожному скінченному елементі також не вносить істотних змін у результати розрахунку. У даній задачі це обумовлено середнім розкидом температур у циклі і по радіусу циліндра. Однак для випадків більших розкидів значень температур по радіусу матимуть місце значні термічні напруження у циліндрі, що приведе до його швидкого руйнування.

Проведено аналіз повзучості циліндру при періодичній зміні неоднорідної температури з відмінними від попередньої задачі даними. Циліндр знаходиться під дією внутрішнього тиску у 15 МПа, під час першої години циклу він нерівномірно нагрітий по радіусу за логарифмічним законом від 673 К на внутрішній поверхні до 723 К на зовнішній поверхні, під час другої половини циклу – знаходиться в однорідному температурному полі у 673 К. На кожному циклі на напружений стан, викликаний дією внутрішнього тиску, накладаються напруження, що виникають внаслідок нагрівання циліндра, нерівномірного за товщиною. Періодичне додавання напружень призводить до значної зміни часу їх перерозподілу (від 7000 годин в задачі при постійній дії температурного поля до 3000 годин в задачі при періодично змінюваному температурному полі). При цьому розподіл окружних напружень має явний пік у центральних областях по товщині циліндру. На рис. 5 криві 1, 3, 5 – розподіл радіального, окружного та осьового напружень відповідно при  $t = 0$ , а криві 2, 4, 6 – розподіл радіального, окружного та осьового напружень відповідно при усталеній повзучості.

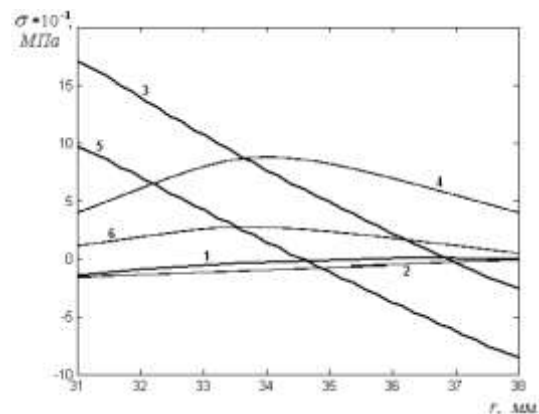


Рис. 5. Розподіл компонент напружень при усталеній повзучості ( $T = 673\text{K} - 723\text{K}$ )

Загалом за результатами комплексних досліджень з впливу періодичної зміни температури на характеристики процесу повзучості встановлено, що при періодичній зміні температурних полів в елементах конструкцій відбувається інтенсифікація процесу перерозподілу та змінення характеру розподілу напружень. Ці закономірності суттєво впливають на оцінку напружено-деформованого стану та довготривалої міцності елементів машинобудівних конструкцій в умовах повзучості.

У **четвертому розділі** представлені результати розв'язання прикладних задач конструкційної та довготривалої міцності елементів конструкцій за розрахунковими схеми двовимірних задач теорії повзучості. Наводяться рішення задач аналізу циклічної довговічності товстостінного циліндру корпусу автоклаву та лопаток газотурбінних двигунів (ГТД), результати яких порівнювалися з відомими у літературі експериментальними даними.

Проведено аналіз довговічності елементів конструкцій типу циліндрів, патрубків, охолоджуваних та неохолоджуваних лопаток ГТД, вигородки атомного реактору, що працюють за умов високотемпературної повзучості при періодичних змінах температури.

Проведені дослідження довговічності товстостінного циліндру корпусу автоклаву гідротермального синтезу мінералів. Такі автоклави за час роботи зазнають впливу сотень циклів навантаження та зміни температури. Була розглянута задача повзучості при циклічній зміні неоднорідного температурного поля. Проведені дослідження показали, що критична кількість циклів зміни температурного поля, при якій настає руйнування циліндру, складає приблизно 43 000 циклів. Отримані результати добре узгоджуються з експериментальними, похибка сягає близько 10%.

На довговічність лопаток ГТД впливають всі нерівномірності температури газового потоку по колу і висоті проточної частини. В роботі проведені дослідження лопатки ГТД, результати розрахунків порівнюються з експериментальними даними, отриманими при дослідженні моделей натурних незакручених неохолоджуваних лопаток без осьового навантаження розтягом. Розбіжність розрахункових з експериментальними даними знаходиться в діапазоні до 10-12%.

Для розрахунків на довготривалу міцність охолоджувальної лопатки необхідне проведення теплового розрахунку, який виконувався за небезпечним

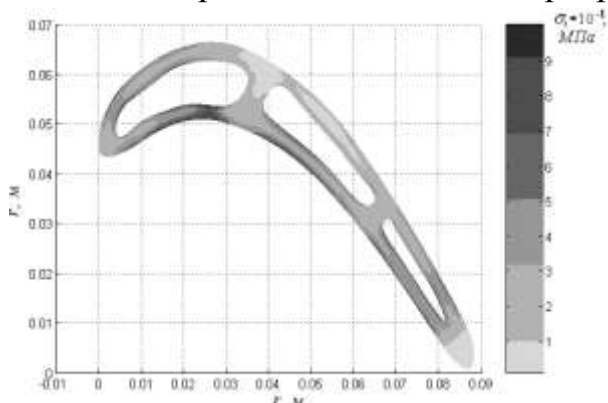


Рис. 6. Розподіл інтенсивності напружень при 3000 годин та значенні тиску 0.5 МПа

перерізом, розташованим приблизно на середині висоти лопатки. При перехідних режимах роботи ГТД (підвищення швидкості, змінення потужності, повернення на номінальний режим тощо) температура нерівномірно розподілена за перерізом лопатки. В роботі проведено аналіз напружено-деформованого стану охолоджувальної трьохканальної лопатки в умовах повзучості при періодичній зміні

температурного поля та різних значеннях тиску газового потоку (рис. 6). Встановлено, що врахування періодичної зміни напружень, викликаних дією неоднорідного температурного поля, та самого періодичного змінення температури суттєво прискорює швидкість деформування при повзучості та швидкість накопичення прихованих пошкоджень, що призводить до значного зменшення часу до руйнування лопаток.

При експлуатації установки реакторного блоку каталітичного крекінгу Г-43-107М/1 ЗАТ «ЛИНІК» (м. Лисичанськ) були виявлені недоліки в роботі низки вузлів, регулярно помічалися численні тріщини, ерозійне спрацювання поверхонь труб та ніпелів з утворенням наскрізних отворів. Метою даного дослідження було встановлення можливих причин руйнування внутрішніх поверхонь ніпелів трубчастого повітророзподільника. В роботі проведені розрахунки для різних температурних режимів функціонування ніпелів, що

знаходяться на різному рівні віддалення від центрального колектора, результати представлені в табл. 1.

Таблиця 1

**Час закінчення прихованого руйнування ніпелів**

Температура на зовнішній поверхні ніпеля	Температура на внутрішній поверхні ніпеля		
	823К	833К	843К
903К – 943К	3.3 місяця		
898К – 948К	2.82 місяця	5.28 місяця	
893К – 953К		4.26 місяця	
888К – 958К		3.45 місяця	6.48 місяця
883К – 963К			5.09 місяця
Постійна температура на зовнішній поверхні, T = 923 К			
	4.78 місяця	10.65 місяця	24.65 місяця

За результатами досліджень довготривалої міцності ніпелів трубчастого повітророзподільника установки реакторного блоку каталітичного крекінгу визначено, що за достатньо короткий час їх роботи (часто такий, що не перевищує півроку) відбувається руйнування ніпелів тільки внаслідок дії механізмів високотемпературної повзучості при періодичній зміні температурного поля. Дані з залишкового ресурсу елементів конструкцій та рекомендації щодо забезпечення максимально можливого терміну функціонування обладнання при різних варіантах умов роботи використовуються у практиці проектування технологічних процесів у ЗАТ «ЛИНІК».

Проведений аналіз впливу періодичної зміни температури на напружено-

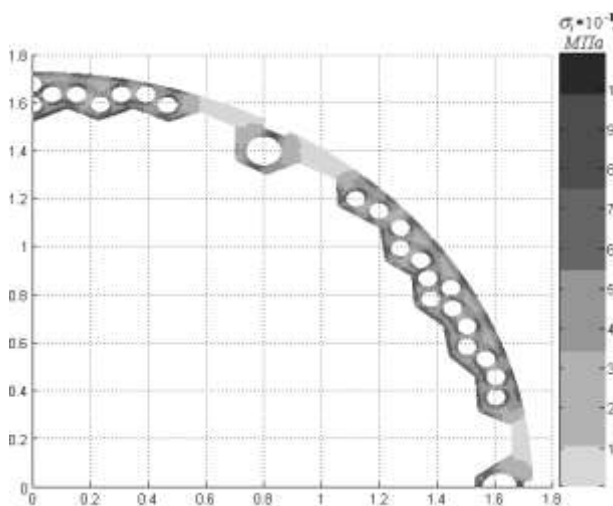


Рис. 7. Розподіл інтенсивності напружень після 17 років експлуатації при існуючому режимі роботи

деформований стан вигородки атомного реактору ВВЕР-1000. Неоднорідне по перерізу вигородки поле енерговиділення є причиною виникнення поля температур, максимальне значення якого складає 723К. Кількість ефективних годин роботи реактора на рік складає приблизно 7000 годин, решту часу температура вигородки рівномірна за перерізом. Проведені розрахунки радіаційної повзучості при циклічній зміні температури вигородки атомного реактору (рис. 7), виявлено істотне прискорення процесів релаксації

напружень порівняно з результатами розрахунків без врахування впливу періодичної зміни температурного поля. Дослідження показали, що неврахування ефектів, викликаних періодичним характером зміни температури, суттєво змінює прогнозований термін безпечної експлуатації елементів атомного машинобудування, а також дає якісно невірну картину напружено-деформованого стану устаткування активної зони реактора. Отримані оцінки та



висновки використані при розробці методології досліджень довготривалої міцності при радіаційній повзучості в Інституті фізики твердого тіла, матеріалознавства та технологій ННЦ «ХФТІ».

## ВИСНОВКИ

Дисертаційну роботу присвячено вирішенню науково-практичної задачі – розробці методу розрахунку довговічності та довготривалої міцності елементів конструкцій, які працюють в умовах періодичних змін температур і навантажень. Основні наукові та практичні результати виконаних досліджень полягають у наступному.

1. Розроблені уточнені рівняння стану повзучості та пошкоджуваності внаслідок повзучості матеріалів при простому та складному напруженому стані, за якими запропоновані методи розрахунку конструктивних елементів машин при періодичній зміні температур і навантажень. Визначено ступінь достовірності запропонованих співвідношень співставленням розрахункових результатів з відомими в науковій літературі експериментальними даними. Доведено придатність отриманих рівнянь до застосування при аналізі довговічності.

2. Надано розвиток методів аналізу конструкційної та довготривалої міцності в динаміці та міцності машин за рахунок розробленого розрахункового методу оцінки довговічності елементів конструкцій, що деформуються при повзучості за умов періодичних змін температурно-силових полів. Запропоновані формулювання узагальненої та скінченноелементної постановок задач для елементів конструкцій, що моделюються за двовимірними схемами, розроблено метод аналізу довговічності при періодичній зміні температур і навантажень та програмне забезпечення, яке його реалізує.

3. Встановлені закономірності впливу періодичної зміни температури при простому напруженому стані та неоднорідного температурного розподілу в елементах конструкцій на швидкість деформування при повзучості, швидкість накопичення пошкоджень, еволюцію напружено-деформованого стану, час до руйнування тощо.

4. Виявлені причини прискорення ерозійного спрацювання ніпелів трубчастого повітророзподільника установки реакторного блоку каталітичного крекінгу, визначено час закінчення прихованого руйнування та місця виникнення макродефектів в зазначених конструктивних елементах хімічного машинобудування.

5. Розрахунковий метод оцінки довговічності конструкцій поширено на задачі аналізу радіаційної повзучості при періодичних змінах температурного поля елементів активної зони реакторів, встановлено оцінки впливу зміни робочої температури на процеси релаксації напружень.

6. Отримані розрахункові оцінки конструкційної міцності та довговічності елементів енергетичного машинобудування: охолоджуваних та неохолоджуваних лопаток газотурбінних двигунів, виявлено вплив дії неоднорідно розподіленої змінюваної температури на процеси накопичення

прихованих пошкоджень.

7. Результати дисертаційної роботи – розрахунки, рекомендації та висновки – використано при проектуванні обладнання у ЗАТ «ЛІНІК» за технологічними умовами роботи та при аналізі залишкового ресурсу вигородки атомного реактору в Інституті фізики твердого тіла, матеріалознавства та технологій ННЦ «ХФТІ».

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Корытко Ю.Н. Программные средства для конечноэлементного моделирования двумерных задач теории ползучести / Д.В. Бреславский, Ю.Н. Корытко, П.М. Лысак // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2007. – №38. – С. 24-29.

*Здобувачем розроблені програмні модулі та перевірена достовірність роботи програмного комплексу у цілому.*

2. Корытко Ю.Н. Анализ повреждаемости бронзовых заготовок, получаемых в процессах непрерывного литья / Д.В. Бреславский, Ю.Н. Корытко, О.А. Татарина, О.Н. Хорошилов // Механіка та машинобудування. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2008. – №1. – С. 234-243.

*Здобувачем розроблено метод розв'язку задачі повзучості у двовимірній постановці.*

3. Корытко Ю.Н. Ползучесть металлов при циклически изменяющейся температуре / Д.В. Бреславский, Ю.Н. Корытко, О.К. Морачковский // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2008. – №47. – С. 31-37.

*Здобувачем розроблені рівняння стану при періодичній зміні температури, проведено співставлення розрахункових та експериментальних даних.*

4. Корытко Ю.Н. Ползучесть тел вращения при циклических теплосменах / Д.В. Бреславский, Ю.Н. Корытко // Методи розв'язування прикладних задач механіки деформівного твердого тіла. – Дніпропетровськ: ДНУ імені Олеся Гончара. – 2009. – №10. – С. 41-47.

*Здобувачем розроблено алгоритми розрахунку повзучості товстостінної труби в умовах періодичної зміні неоднорідного температурного поля та виконано розрахунки.*

5. Корытко Ю.М. Розрахункове оцінювання довготривалої міцності лопаток газотурбінних двигунів при циклічних теплосмінах / Д.В. Бреславський, Ю.М. Корытко // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2009. – №42. – С. 18-24.

*Здобувачем виконано постановку задачі та розроблено метод розв'язку, виконані розрахункові дослідження моделі лопатки ГТД.*

6. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір. № 34779. Україна. Комп'ютерна програма «Divider 2.6с» : комп'ютерна програма / Д.В. Бреславський, П.М. Лисак, Ю.М. Корытко. – Дата реєстрації 2.09.2010.

*Здобувачем розроблені модулі програми, проведено тестування*

*програмного засобу.*

7. Korytko Yu. Software and numerical simulation of cyclic 2D creep-damage problems / D. Breslavsky, A. Chuprynin, Yu. Korytko, O. Tatarinova // Nonlinear dynamics – 2007: proceedings of the Second International Conference, September 25-28, 2007. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2007. – P. 45-48.

*Здобувачем виконано геометричне та скінченноелементне моделювання елементів конструкцій та розв'язання задачі повзучості товстостінної труби.*

8. Коритко Ю.М. Розв'язок двовимірних задач теорії повзучості за допомогою спеціалізованих програмних засобів / Коритко Ю.М. // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: матеріали XVI міжнар. наук. - практ. конфер., 4-6 червня 2008р.: у 2 ч. – Ч.1. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2008. – С. 50.

*Здобувач виконала розрахунки задач повзучості елементів конструкцій, що моделюються за двовимірними схемами.*

9. Коритко Ю.М. Розробка методів розв'язку двовимірних задач циклічної термоповзучості / Ю.М. Коритко // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: матеріали XVII міжнар. наук.-практ. конф., 20-22 травня 2009 р.: у 2 ч. – Ч.1. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2009. – С. 60.

*Здобувачем розроблені нові рівняння стану для опису циклічної термоповзучості та проведено їх верифікацію.*

10. Коритко Ю.М. Повзучість та пошкоджуваність елементів конструкцій при високотемпературному циклічному навантаженні / Д.В. Бреславський, Ю.М. Коритко, О.К. Морачковський, О.А. Татарінова // Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи його діагностування і прогнозування: праці міжнародної науково-технічної конференції, 21-24 вересня 2009 р. – Тернопіль: Тернопільський державний технічний університет імені Івана Пулюя. – 2009. – С. 40-46.

*Здобувачем проведені дослідження циклічної термоповзучості циліндру.*

11. Корытко Ю.Н. Разрушение сосудов высокого давления при циклических теплосменах / Д.В. Бреславский, Ю.Н. Корытко, В.Н. Конкин // Можливості використання методів механіки для розв'язання питань безпеки в умовах надзвичайних ситуацій: матеріали 8-ї міжвузівської науково-практичної конференції, 11 грудня 2009 р. – Харків: Університет цивільного захисту України. – 2009. – С. 3.

*Здобувачем розроблений метод розрахунку високотемпературної повзучості та пошкоджуваності.*

12. Коритко Ю.М. Розв'язок практичних задач довготривалої міцності при циклічній термоповзучості / Ю.М. Коритко // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: матеріали XVIII міжнар. наук.-практ. конф., 12-14 травня 2010 р.: у 4 ч. – Ч.1. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2010. – С. 64.

*Здобувачем виконані дослідження довготривалої міцності лопаток газотурбінних двигунів та товстостінного циліндру автоклаву.*

13. Korytko Yu. High temperature creep and damage accumulation in cyclically loaded axisymmetrical bodies of revolution / D. Breslavsky, Yu. Korytko, O. Morachkovsky // Nonlinear dynamics - 2010: proceedings of the Third International Conference, September 21-24, 2010. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2010.

– Р. 467-472.

*Здобувачем виконані розрахунки довговічності ніпелів трубчастого повітророзподільника установки реакторного блоку каталітичного крекінгу.*

14. Корытко Ю.Н. Длительная прочность и ползучесть элементов конструкций при циклическом изменении температурно-силовых полей / Д.В. Бреславский, Ю.Н. Корытко, О.К. Морачковский, О.А. Татарина // Міцність матеріалів та елементів конструкцій: тези доповідей міжнародної науково-технічної конференції, 28-30 вересня 2010 р. – Київ: Ін-т проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України. – 2010. – Т. 1. – С. 54-55.

*Здобувачем розроблена методика розрахунку циклічної термоповзучості та довготривалої міцності для використання при рішенні прикладних задач.*

## АНОТАЦІЇ

**Коритко Ю.М. Розробка методу розрахунку довговічності елементів конструкцій при періодичній зміні температур і навантажень. Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.09 – динаміка та міцність машин. Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2011.

Дисертаційну роботу присвячено розробці методу оцінки довговічності та довготривалої міцності конструктивних елементів, які зазнають періодичних нагрівів та навантажень та набувають незворотного деформування при повзучості.

Розроблені нові визначальні співвідношення повзучості та пошкоджуваності внаслідок повзучості. Створено метод розрахунку довготривалої конструкційної міцності, що враховує вплив періодичної зміни температур і навантажень, виявлені закономірності такого впливу на характеристики довговічності елементів конструкцій, отримані розрахункові оцінки довговічності елементів хімічного, енергетичного та атомного машинобудування.

Оцінки, висновки, результати розрахунків, рекомендації використані при проектуванні технологічних умов роботи обладнання у ЗАТ «ЛІНІК» та при аналізі залишкового ресурсу вигородки атомного реактору в ННЦ «ХФТІ».

*Ключові слова:* довговічність, конструкційна міцність, розрахунковий метод, довготривала міцність, періодична зміна, пошкоджуваність, елементи конструкцій, температура.

**Корытко Ю.Н. Разработка метода расчета долговечности элементов конструкций при периодическом изменении температур и напряжений. Рукопись.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.09 – динамика и прочность машин. Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2011.

Диссертационная работа посвящена разработке метода оценки

долговечности и длительной прочности периодически нагреваемых и нагружаемых конструктивных элементов, необратимо деформирующихся вследствие ползучести.

Разработаны уточненные уравнения состояния ползучести и повреждаемости вследствие ползучести материалов при периодическом изменении температур и напряжений для случаев простого и сложного напряженного состояния. Термодинамически обоснованы созданные определяющие соотношения для материалов, деформирующихся вследствие ползучести. Представлен метод получения материальных постоянных для законов ползучести и повреждаемости по результатам экспериментальных исследований ползучести и длительной прочности при статических нагружениях и неизменных значениях температур. Определена степень достоверности предложенных соотношений путем сопоставления расчетных результатов с известными в научной литературе экспериментальными данными. Доказана пригодность полученных уравнений для использования при анализе долговечности.

Дано развитие методов анализа конструкционной и длительной прочности в динамике и прочности машин за счет разработанного расчетного метода оценки долговечности элементов конструкций, деформирующихся при ползучести при периодическом изменении температурно-силовых полей.

Сформулирована обобщенная математическая и конечноэлементная постановки задачи ползучести элементов конструкций, расчетные схемы которых отвечают двумерным задачам: плоскому напряженному состоянию, плоской деформации и обобщенному плоскому напряженно-деформированному состоянию, которое имеет место в осесимметричных телах вращения при осесимметричном нагружении. Разработан метод анализа долговечности при периодическом изменении температур и напряжений и программное обеспечение, реализующее данный метод.

Установлены закономерности влияния периодического изменения температуры при простом напряженном состоянии и неоднородного температурного распределения в элементах конструкций на характеристики долговечности. Проведенные расчеты показали, что периодическое изменение температуры приводит к значительному уменьшению времени окончания процесса перераспределения напряжений при ползучести, а также изменению характера перераспределения при периодических изменениях неоднородно распределенной температуры. Установлено, что изменение характера перераспределения напряжений обусловлено в большей степени периодическим изменением силового поля, возникающего в результате неравномерного нагрева. Учет в расчетах постепенного нагревания и охлаждения в цикле оказывает несущественное влияние на значения времени окончания перераспределения напряжений и изменение характера их перераспределения.

Выявлены причины ускорения эрозионного изнашивания ниппелей трубчатого воздухораспределителя установки реакторного блока каталитического крекинга, определено время окончания скрытого разрушения

и места возникновения макродефектов. Установлено, что за достаточно короткий период работы (часто не превышающий полгода) происходит разрушение ниппелей трубчатого воздухораспределителя только вследствие действия механизмов высокотемпературной ползучести при периодическом изменении температурного поля. Данные по остаточному ресурсу и рекомендации по обеспечению максимально возможного срока эксплуатации оборудования при различных вариантах условий работы используются в практике проектирования технологических процессов на ЗАО «ЛИНИК».

Созданный расчетный метод оценки долговечности расширен на задачи анализа радиационной ползучести при периодических изменениях температурного поля, оценено влияние изменения рабочей температуры на процессы релаксации напряжений. Расчетные исследования выгорания атомного реактора ВВЭР-1000 показали, что учёт эффектов, вызванных периодическим изменением температуры, существенно влияет на прогнозируемый срок безопасной эксплуатации и характер перераспределения компонентов напряженно-деформированного состояния. Полученные оценки и выводы использованы при разработке методологии исследований длительной прочности при радиационной ползучести в Институте физики твердого тела, материаловедения и технологий в ННЦ «ХФТИ».

Получены расчетные оценки конструкционной прочности и долговечности элементов энергетического машиностроения: охлаждаемых и неохлаждаемых лопаток газотурбинных двигателей, выявлено влияние действия неравномерно распределенной периодически изменяющейся температуры на процессы накопления скрытых разрушений.

*Ключевые слова:* долговечность, конструкционная прочность, расчетный метод, длительная прочность, периодическое изменение, элементы конструкций, температура.

**Korytko Y.N. Development of the method for calculation of durability of structural members under periodically varying temperatures and loading. Manuscript.**

Thesis for a candidate of technical sciences degree by the speciality 05.02.09 – dynamics and strength of machines. National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, 2011.

The dissertation is devoted to the development of the method for estimation of durability and long-term strength of structural elements, which are working under periodically heating and loading in conditions of irreversible creep deformation.

The new creep-damage constitutive equations were derived. The method, which takes into account the influence of periodically varying temperatures and loading, was developed for estimation of long-term structural strength. The laws of influence of periodically varying temperatures on the durability of structural members were established; the numerical estimations of long-term strength of structural members, used in chemical, power and atomic industry, were obtained.

*Key words:* durability, structural strength, numerical method, long-term strength, periodically varying, structural elements, temperature.



Відповідальний за випуск: к.т.н., доц. Шипуліна Л.В.

Підписано до друку 28.01.2011 р. Формат 60x90/16.  
Папір офсетний. Друк – ризографія. Гарнітура Times New Roman.  
Умовн. друк. арк. 0,9. Наклад 100 прим. Зам. № 323

Надруковано у СПДФО Ізрайлев Є.М.  
Свідоцтво № 24800170000040432 від 21.03.2001р.  
61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 16