

*Д.В.БРЕСЛАВСЬКИЙ*, докт.техн.наук, проф., НТУ «ХП»;  
*Ю.М.КОРИТКО*, аспірант, НТУ «ХП»

## **РОЗРАХУНКОВЕ ОЦІНЮВАННЯ ДОВГОТРИВАЛОЇ МІЦНОСТІ ЛОПАТОК ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ ПРИ ЦИКЛІЧНИХ ТЕПЛОЗМІНАХ**

У статті описані постановка задачі, метод розв'язання та результати розрахунків повзучості й тривалої міцності лопаток газотурбінних двигунів, які перебувають під дією термосилових навантажень, що циклічно змінюються. Для верифікації методу використані результати експериментального вивчення моделей лопаток. Наводяться результати розрахунків.

The problem statement, method of solution and numerical results of creep – damage simulation of gas turbine blades, which are cyclically loaded by thermal and mechanical loading, are described in the paper. The results of experimental studying of blade models had been used for the method verification. The numerical results are presented.

**Аналіз стану проблеми.** Умови роботи великої кількості елементів конструкцій сучасного енергетичного та хімічного машинобудування характеризуються істотним впливом температурних та силових полів. Часто температурно-силове навантаження є циклічним, що обумовлено повторно-змінним характером роботи енергетичних та хімічних установок. Є добре відомим, що навантаження металевих матеріалів при підвищених температурах призводить до суттєвого зростання незворотних деформацій повзучості та накопичення прихованої пошкоджуваності. Циклічне прикладення напружень та циклічна зміна температури зазвичай прискорюють ці процеси [1]. Це необхідно враховувати при розрахунках, необхідних при проектуванні нової техніки, а також при визначенні остаточного ресурсу.

Як відомо [2], моделювання складних фізико-механічних процесів, що відбуваються в конструктивних елементах, потребує формулювання відповідних рівнянь стану та подальшої їхньої перевірки з залученням експериментальних даних. Сучасний стан розвитку теоретичного опису фізичних залежностей теорії повзучості та руйнування циклічно навантажених тіл забезпечено суттєвим внеском таких вчених, як Ю.М.Работнов, Л.М.Качанов, Ю.М.Шевченко, Г.С.Писаренко, Ж.Леметр, Ж.-Л.Шабош, Дж.Хейхерст, М.Хжановські, М.С.Можаровський, М.І.Бобир та багатьох інших. Багато робіт присвячено циклічній повзучості та руйнуванню матеріалів при дії напружень, що істотно перевершують границю пропорційності. Між іншим, велика кількість елементів машин та конструкцій проектується виходячи з того, що початкові пластичні деформації мають бути відсутніми, хоча розвиток деформацій повзучості та пов'язаної з нею пошкоджуваності запобігти не вдається. Таким чином, актуальним та практично важливим є створення рівнянь стану повзучості та пошкоджуваності матеріалів при циклічному наванта-

женні.

На сьогоднішній час вже майже стандартним стало розрахункове оцінювання деформування та руйнування конструкцій за допомогою методів аналізу, що використовують метод скінчених елементів (МСЕ) для розв'язання крайових задач.

Отже, сучасний метод розрахунку повзучості та руйнування відповідальних конструктивних елементів машин, які знаходяться під впливом циклічно змінного теплового та силового навантаження має базуватись на точних рівняннях стану, що є придатними до моделювання в розрахунках при складному напруженому стані, та на чисельних методах скінчених елементів для крайових задач та різницевому для початкових.

**Постановка задачі та метод розв'язку.** В роботах [3, 4] наведено математичну постановку задачі повзучості та руйнування під дією циклічно прикладених силових та температурних навантажень. Для довільного тіла записано повну систему рівнянь теорії повзучості. Зовнішні об'ємні сили вважаються незмінюваними у часі, а поверхневі сили у загальному випадку мають постійну та циклічно змінювану складові. Припускається, що змінювання температури за часом також є циклічним. Поверхневі сили та функції змінювання температури за часом представлено у вигляді рядів Фур'є. Фізичні рівняння побудовані на базі рівнянь Бейлі-Нортон, Работнова-Качанова та експоненціальній залежності швидкості деформацій повзучості від температури.

Для одержання співвідношень методу розрахунку застосовано метод багатьох масштабів часу, згідно якого основні невідомі представлено розкладанням у ряд за ступенями малого параметру, який введено як відношення періоду циклу навантаження до часу до руйнування тіла, що розглядається. Після перетворень, з застосуванням осереднення отриманих рівнянь на періоді циклу, з базової системи рівнянь отримують дві. Перша описує рух системи у масштабі «повільного» часу, а друга – «швидкого» [4]. Отримані системи не є незалежними, бо до першої з них входять значення інваріантів тензорів амплітудних напружень, визначених за розв'язком другої задачі. Ці інваріанти використовуються в рівняннях стану повзучості з урахуванням пошкоджуваності при циклічному температурно-силовому навантаженні.

За останні роки такі рівняння стану створено для випадку частот навантаження, які відповідають вимушеним коливанням, з урахуванням пошкоджуваності внаслідок динамічної повзучості, що відбувається при цьому, та пошкоджуваності внаслідок багатоциклової втоми [5], а також для випадку повільного, квазістатичного змінювання напружень та температур у циклі, що характерно для процесів, які відбуваються у двигунах, енергетичному та хімічному обладнанні при їхньому виході на робочий режим, довгій роботі, її припиненні та деякому очікуванні нового циклу [4, 6]. Запропоновано також спосіб оцінювання спільної дії багато- та малоциклових процесів повзучості

та накопичення пошкоджуваності в матеріалах при циклічному навантаженні.

В цій роботі застосовано другий варіант рівнянь стану, процеси динамічної повзучості та багатоциклової втоми не розглядаються. Таке припущення спрямовано на виявлення характерних рис тих фізичних явищ, що відбуваються в конструктивних елементах при складному напруженому стані при циклічному змінюванні температури та пов'язаному з цим циклічному змінюванні напружень.

Розглядаються двовимірні задачі теорії повзучості, які представляють досить вагомий клас розрахункових схем елементів конструкцій сучасного машинобудування. З застосуванням відомих підходів, що залучають МСЕ до розв'язання фізично нелінійних задач [8], отримуємо основні співвідношення методу. Скінчено-елементне формулювання задачі розрахунку повзучості з урахуванням накопичення пошкоджуваності при циклічному навантаженні отримуємо у наступному вигляді:

$$[K]\{\dot{u}\} = \{\dot{F}\} + \{\dot{F}^C\}; \quad (1)$$

$$\{\dot{F}\} = \sum_{N_\beta} \int_{S_3^e} [N^p]^T \{\dot{p}\} dS \Big|_{t=0} + \sum_{N_\beta} \int_{V_\beta} [N^p]^T \{\dot{p}\} dV \Big|_{t=0} + \sum_{N_\beta} \int_{V_\beta} [\bar{B}]^T [C] \{\dot{\varepsilon}^T\} dV;$$

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

$$\{\dot{c}\} = \frac{3}{2} \frac{B(\sigma_i)^{n-1} g_n g_n^T}{(1-\omega)^k} [\hat{C}] \{\sigma\}; \quad (2)$$

$$\dot{\omega} = D g_r g_r^T \frac{(\sigma_e)^r}{(1-\omega)^k}, \quad \omega(0) = \omega_0, \quad \omega(t_*) = \omega_*. \quad (3)$$

Тут  $K$  – матриця жорсткості;  $u$  – глобальний вектор вузлових переміщень;  $F$  – вектор вузлових навантажень, що містить поверхневі й об'ємні сили;  $F^C$  – сили, обумовлені деформаціями повзучості;  $\bar{B}$  – матриця деформування;  $C$  – матриця пружних констант;  $N$  – матриця форм;  $p$  і  $P$  – поверхневі й об'ємні навантаження відповідно;  $c$  – незворотні деформації повзучості;  $\varepsilon^T$  – температурні деформації;  $\beta$  – номер скінченного елемента;  $V_\beta$  – об'єм скінченного елемента;  $\sum_{N_\beta}$  – підсумовування за всіма скінченими елементами;  $S$  – площа поверхні скінченного елемента, який знаходиться під дією розподіленого навантаження;  $\omega$  – параметр пошкоджуваності;  $t_*$  – час до завершення прихованого руйнування;  $\sigma_i$  – еквівалентне напруження Мізеса (інтенсивність напружень);  $\sigma_e$  – еквівалентне напруження, що визначається за залученим критерієм руйнування;  $g_n, g_r$  – функції коефіцієнтів амплітуди циклічного навантаження;  $g_n^T, g_r^T$  – функції коефіцієнтів амплітуди циклічного нагрі-

ву, які описано в роботі [4];  $B, D, n, r, l, k$  – константи, що визначаються за експериментальними даними про повзучість та руйнування матеріалу при заданій температурі. Розподіл температури за часом та об'ємом визначається розв'язанням задачі нестационарної теплопровідності.

Зауважимо, що рівняння стану (2)- (3) побудовано для випадку циклічної дії навантажень та температур, але завдяки застосуванню при їхньому одержанні асимптотичних методів та осереднення на періоді циклу вони перерформульовані для виконання розрахунків виключно при дії незмінних навантажень при фіксованій температурі. Вплив циклічності навантаження та нагріву / охолодження відбивається завдяки наявності в рівняннях стану функцій коефіцієнтів амплітуди.

Система диференціальних рівнянь (1)-(3) розв'язується з застосуванням різнищевого методу прогнозу-корекції третього порядку. Інтегрування проводиться доти, доки параметр пошкоджуваності не прийме свого критичного значення  $\omega_*$ .

Створений метод розрахунку дозволяє проводити набагато більш швидке чисельне дослідження різних варіантів, ніж при прямому інтегруванні часто дуже великої кількості циклів напружень та температури, що є вкрай необхідним при проектуванні.

**Розрахункове дослідження моделі лопатки ГТД.** Дослідження циклічної міцності виконано для одного з найпоширеніших типів конструктивних елементів енергетичного обладнання – лопаток газотурбінних двигунів (ГТД). Причина їхнього руйнування – екстремальні умови термічного та механічного навантаження. Лопатки безпосередньо знаходяться у змінному температурному полі газового потоку при різних режимах роботи двигуна. На довговічності соплових лопаток відбиваються усі нерівномірності температури газового потоку. Робочі лопатки, крім теплових, піддаються значним механічним навантаженням внаслідок дії відцентрових сил.

Проблема не є новою, вона здавна привертала увагу інженерів-проектувальників та вчених-механіків [7]. Проводилась велика кількість експериментів для матеріалів при простому та складному напруженому стані, а також деякі дослідження натурних моделей. В даній роботі результати одного з таких унікальних експериментів, проведених на моделях лопаток ГТД [7], залучено до верифікаційних досліджень розв'язків, які отримують за допомогою створеного розрахункового методу та програмного комплексу.

В монографії [7] описано серію експериментів, в яких осьове навантаження розтягом було відсутнє. В зв'язку з цим, задачу визначення напружено-деформованого стану лопатки розв'язано за допомогою постановки задачі, що використовує схему плоскої деформації.

Для отримання констант, які входять до рівнянь стану (2)-(3), застосовано дані експериментальних досліджень, описаних в роботі [7]. Для зразків зі жароміцного сплаву ЭИ826 при температурі 1073 °К отримано:

$B = 4,94 \cdot 10^{-10} \text{ (МПа)}^{-n}/\text{с}$ ;  $n = r = 2,048$ ;  $D = 2,11 \cdot 10^{-10} \text{ (МПа)}^{-n}/\text{с}$ ;  $k = 3,1$ . За допомогою отриманого авторами в роботі [4] кінетичного рівняння для параметра пошкоджуваності (3) визначено значення числа циклів до руйнування зразків зі сплаву, що розглядається, при температурі 973, 1073 та 1173 °К. Отримані результати порівнювались з розрахунковими даними роботи [7], при цьому було відмічено цілком достатня ступінь збіжності (до 5 %).

В експериментах моделі лопаток зі сплаву ЭИ826 навантажувались при режимі циклічної зміни температури металу вхідної кромки моделі лопатки в діапазоні 723-1073 °К (5 с нагрів, 10 с охолодження).

Розрахункові дослідження циклічної термоповзучості та пов'язаної з нею пошкоджуваності лопатки ГТД виконано за допомогою розробленого авторами програмного комплексу [9].

На рис. 1 наведено основні геометричні характеристики перерізу лопатки та її скінченноелементна модель, що складається з 1389 трикутних елементів та 770 вузлів.

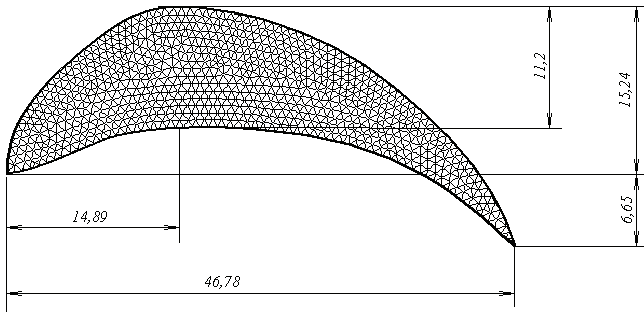


Рисунок 1 – Скінченноелементна модель перерізу лопатки

В розрахунках приймалося, що лопатка знаходиться в циклічно змінному температурному полі з періодом 15 с: 5 с поле є неоднорідним, температура змінюється від 1073 °К на вхідній кромці до 973 °К на вихідній. Останні 10 с циклу лопатка знаходиться в однорідному полі з  $T = 723 \text{ °К}$ . Вважаємо, що нагрів та охолодження відбуваються миттєво. Тиск від газового потоку на вхідній кромці прийнятий рівним 0,65 МПа.

Розрахунками визначені поля температур та напружень, що відповідають термопружним задачам зі знайденим розподілом температур. Отримані розподіли напружень прийнято як початкові умови при інтегруванні задачі циклічної термоповзучості.

За допомогою чисельного моделювання визначені розподіли переміщень, напружень, деформацій та параметру пошкоджуваності для різних значень числа циклів нагріву-охолодження, а також число циклів, що призводить до руйнування лопатки (виникнення макротріщини). Воно складає 21840 циклів. Для моменту закінчення прихованого руйнування розподіл па-

раметра пошкоджуваності за перерізом лопатки наведено на рис. 2. Руйнування, як видно з рисунку, відбувається в районі стику вхідної та вихідної кромки лопатки. На рис. 3 наведено графік залежності параметру пошкоджуваності від часу, побудованої для елемента, в якому відбувається руйнування.

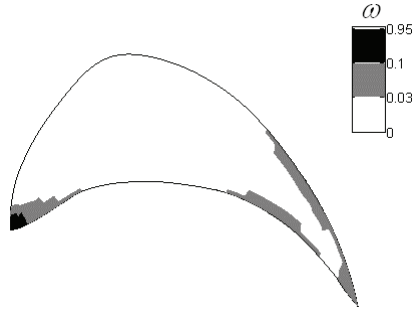


Рисунок 2 – Розподіл параметру пошкоджуваності за перерізом лопатки в момент закінчення прихованого руйнування

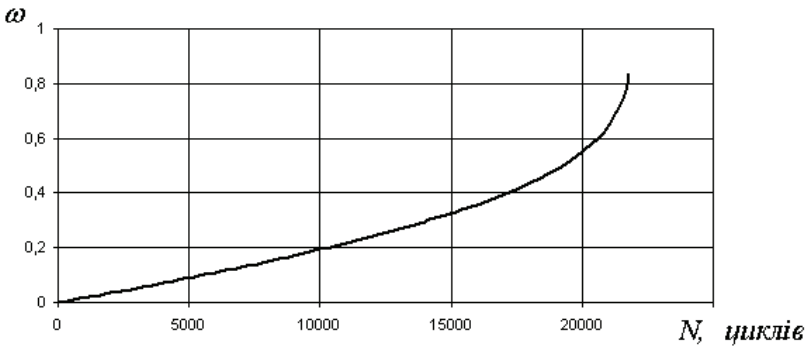


Рисунок 3 – Залежність параметру пошкоджуваності від часу

В монографії [7] наведено експериментально визначене число циклів до руйнування при термоциклічному навантаженню даної лопатки, що дорівнює 22 500 циклів. Отже, порівняння розрахунку та натурального експерименту дає різницю в 5 відсотків, що може вважатись цілком задовільним в інженерних розрахунках. Наголосимо, що такої збіжності вдалося досягнути застосуванням ретельної обробки експериментальних даних, що отримані на зразках з того ж матеріалу та тієї ж партії постачання, що й моделі лопаток. Отже, при розрахунках лопаток, що випускаються серійно, слід намагатись отримати експериментальні дані для матеріалу тієї ж партії, що й буде застосовуватись при виробництві.

**Висновки.** У статті наголошено на актуальності створення методу розрахунку довготривалої міцності елементів конструкцій, які працюють в умовах циклічних навантажень та теплозмін. Описано постановку двовимірних задач розрахунку повзучості та пошкоджуваності та метод їхнього розв'язання, який базується на застосуванні осереднених рівнянь стану циклічних процесів, методі скінчених елементів та різницевих методах інтегрування за часом. Метод верифіковано на задачі термоциклічного деформування лопаток ГТД.

**Список літератури:** 1. *Тайра С., Отани Р.* Теория высокотемпературной прочности материалов. – М.: Металлургия, 1986. – 280 с. 2. *Lemaitre J., Chaboche J.-L.* Mechanics of solid materials. – Cambridge: University press, 1994. – 556 p. 3. *Бреславський Д.В., Корытко Ю.Н.* Ползучесть тел вращения при циклических теплосменах // Методи розв'язування прикладних задач механіки деформівного твердого тіла. Збірник наук. праць / Дніпропетровський національний університет. – Дніпропетровськ: ІМА-прес, 2009. – Вип. 10. – С. 41-47. 4. *Бреславський Д.В., Корытко Ю.М., Морачковський О.К., Татарінова О.А.* Повзучість та пошкоджуваність елементів конструкцій при високотемпературному циклічному навантаженні // Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи його діагностування і прогнозування. Праці Міжнародної науково-технічної конференції, 21-24 вересня 2009 р., Тернопіль (Україна). – Тернопіль: Тернопільський державний технічний університет імені Івана Пулюя, 2009. – С. 40-46. 5. *Breslavsky D., Morachkovsky O.* Cyclic creep constitutive equations with consideration of creep - fatigue interaction // Proc. of 1st International Conference on Mechanics of Time Dependent Materials. – Bethel: SEM. – 1995. – P. 61-66. 6. *Бреславський Д. В., Морачковський О. К., Уварова О. А.* Метод асимптотических разложений в задачах мало- и многоциклового ползучести материалов // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ», 2004. – № 19. – С. 149-152. 7. *Третьяченко Г.Н., Карпинос Б.С., Барило В.Г.* Разрушение материалов при циклических нагревах. – Киев: Наукова думка, 1993. – 287 с. 8. *Breslavsky D., Morachkovsky O.* Dynamic creep continuum damage mechanics: FEM-based design analysis // Computational Plasticity: Fundamentals and Applications. Proc. of the Fifth International Conference on Computational Plasticity held in Barselona, Spain, 17-20 March 1997. – Barselona: IMNE. – 1997. – Part 1. – P. 1071-1076. 9. *Бреславський Д.В., Корытко Ю.Н., Лисак П.Н.* Программные средства для конечноэлементного моделирования двумерных задач теории ползучести // Вісник НТУ «ХПІ» – Харків: НТУ «ХПІ», 2007. – № 38. – С. 24-29.

Надійшла до редколегії 11.11.2009