

Н. В. СМЕТАНКІНА<sup>1</sup>, С. О. МОРГУН<sup>2</sup><sup>1</sup> Інститут енергетичних машин і систем

імені А. М. Підгорного НАН України, Харків, Україна

<sup>2</sup> Національний університет кораблебудування

імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна

## ВИЗНАЧЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ ЛОПАТОК РОТОРА СУДНОВОГО ГАЗОТУРБІННОГО ДВИГУНА

**Предметом** вивчення статті є довговічність лопаток ротора суднового газотурбінного двигуна. **Метою** є визначення максимальних еквівалентних напружень та довговічності лопаток ротора суднового газотурбінного двигуна під дією потоку робочого тіла. Для досягнення мети дослідження необхідно вирішити наступні **задачі дослідження**: розробити високоточну математичну модель для розрахунку втомної міцності роторів суднових ГТД, яка повинна достовірно описувати реальні умови експлуатації ротора, одночасно забезпечуючи точність та достовірність отриманих результатів; визначити вплив температури та тиску газового потоку на довговічність лопатки; визначити вплив конструкції охолоджуючої порожнини лопатки на рівень максимальних еквівалентних напружень в її пері. Використовуваними **методами** є чисельні методи, зокрема метод скінченних елементів. Отримано наступні **результати**: у роботі вирішено задачу визначення еквівалентних динамічних напружень та довговічності лопаток газової турбіни. Отримані числові результати було використано при визначенні довговічності лопаток ротора суднового газотурбінного двигуна. Еквівалентні напруження та термін служби були визначені для найнебезпечніших частот вимушених коливань всіх робочих лопаткових вінців, з яких складається ротор турбіни. Судновий газотурбінний двигун повинен бути максимально компактним. Таким чином, його ротор складається лише з трьох робочих коліс, що викликає досить високі вібраційні та теплові навантаження на лопатки ротора. Встановлено, що найменшу довговічність мають лопатки першого лопаткового вінця, які зазнають впливу найсильніших теплових та вібраційних навантажень. **Наукова новизна** полягає в розробці удосконаленої математичної моделі для визначення довговічності лопаток суднових та стаціонарних газотурбінних двигунів. **Висновки**. Результати розрахунків показують, що для температури поверхні близько 1000 °С максимальні еквівалентні напруження приблизно дорівнюють межі витривалості матеріалу лопатки. Також досліджено вплив геометричних параметрів охолоджуючої порожнини лопатки на величину максимальних еквівалентних напружень. Отримані результати можуть бути використані для наступного етапу досліджень, що стосуються проблем повзучості ротора та появи втомних тріщин на поверхні лопаток.

**Ключові слова**: довговічність; лопатки; судновий газотурбінний двигун; еквівалентні напруження; тиск та температура газового потоку.

### Вступ

#### 1.1. Мотивація

Відповідно до статистичних даних аналізу відмов елементів турбомашин, які використовуються в енергомашинобудуванні, встановлено, що причинами не менше 85% відмов стають руйнування деталей, викликані їх втомою [1]. Більше того, відповідно до статистичних даних, втомне руйнування призводить до значно нижчого рівня довговічності, ніж той, що був розрахований [2]. З іншого боку, відомо, що однією з тенденцій розвитку сучасного енергомашинобудування є значне збільшення потужності турбомашин з одночасним підвищенням їх надійності та

довговічності [3]. Одним із напрямків цього процесу є підвищення температури робочого тіла при його виході з камери згоряння [4]. Існує два основних напрямки досліджень втомної міцності машинобудівних деталей. Перший полягає в розробці методів випробування втомної довговічності на натурних деталях [5]. Другий - це розробка методів розрахункової оцінки втомної довговічності деталей на основі використання результатів випробувань втомних матеріалів стандартних зразків [6].

В процесі роботи ротор суднового газотурбінного двигуна (ГТД) знаходиться під одночасною дією декількох негативних факторів, спричинених впливом на нього високотемпературного потоку робочого тіла. В роботах [7, 8] негативні чинники, що



виникають при роботі ротора, детально розглянуті та наведені поля тиску, температури, механічних та температурних напружень на поверхні ротора. Значення цих параметрів і характер роботи ротора суднового ГТД свідчать про необхідність проведення досліджень щодо його термовтомної міцності. Але для реальних експериментів на лопатках та дисках суднових газотурбінних двигунів потрібна складна, високоточна та високоартісна апаратура. Схеми проведення експериментів часто унікальні та інноваційні у кожному конкретному випадку. Експериментальні дослідження втомної міцності лопаткового апарату суднових ГТД вкрай утруднені не тільки через високу температуру і тиск, а й через обертання ротора під час роботи [9]. Також лопатки є конструктивно неоднорідними твердими тілами складної криволінійної геометричної форми, що, в свою чергу, ускладнює розміщення тензодатчиків та термометричної апаратури [10].

## 1.2. Сучасний стан проблеми

Втомна міцність лопаток та інших деталей роторів турбомашин, як правило, визначається або методами випробувань натурних деталей, або методами розрахунку на основі використання результатів випробувань на втомну міцність стандартних зразків матеріалів.

У першому випадку для достовірного визначення параметрів втомної довговічності (межа витривалості, параметри кривої втоми) деталей роторів суднових ГТД необхідно провести повні втомні випробування 50 - 100 натурних зразків [11]. Враховуючи розміри, конфігурацію та вартість натурних зразків лопаток та дисків у багатьох випадках випробування у повному обсязі не проводяться. Як правило, проводять випробування 5 - 10 натурних деталей, виявляють зони втомного руйнування, після чого вносять зміни в конструкцію і знову проводять втомні випробування [11].

Для лопаток ГТД при розгляді їх умов роботи під дією термомеханічних навантажень, у роботі [12] розроблено методику випробувань. При цьому термовтомну міцність турбінних лопаток визначають на газодинамічних стендах, піддаючи впливу циклічних змін температури нерухомі лопатки турбомашин та фіксуючи число циклів змін температури до появи в лопатках тріщин певної довжини. Така методика дозволяє проводити в основному порівняльні випробування, оцінювати опір термоциклічним навантаженням лопаток з різних матеріалів, різної технології виготовлення та в умовах певних температурних циклів. В роботі [13] для моделювання впливу відцентрових сил на робочу лопатку в процесі експлуатації

при випробуваннях на газодинамічному стенді статична складова розтягуючого навантаження прикладається до моделей лопаток без закрутки, тобто з постійним по висоті профілем за допомогою навантажувального пристрою. Для збільшення точності експериментальних результатів у роботі [14] наведено метод випробувань з урахуванням деформації лопаток від нерівномірного нагріву та відцентрових сил.

На відміну від першого напряму дослідження, коли втомна міцність визначається методами випробувань на натурних деталях, і для цього потрібно виготовляти спеціальні випробувальні стенди, іншим напрямком досліджень є визначення втомної міцності методами розрахунку на основі використання результатів досліджень втоми матеріалів із стандартних зразків [15]. У процесі розрахунку втомної довговічності натурних деталей турбомашин потрібно провести етап перенесення результатів випробувань характеристик втомної довговічності (гранича витривалості, параметри кривої втоми) малих зразків на натурні деталі. Для реалізації цього процесу можуть бути використані статистична теорія подібності втомного руйнування Серенсена-Когаєва [16] або розрахункові методи та випробування, представлені в роботах [17, 18]. Однак для деталей складної геометричної форми типу лопаток турбомашин зручніше доцільніше використовувати чисельні методи [19], зокрема метод скінченних елементів. Наступним етапом процесу розрахунку втомної довговічності буде визначення втомної довговічності натурних деталей (у вигляді числа циклів навантаження, або кількості годин роботи) з використанням тієї чи іншої гіпотези накопичення пошкоджень.

## 1.3. Мета та задачі дослідження

Метою роботи є визначення максимальних еквівалентних напружень та довговічності лопаток ротора суднового газотурбінного двигуна під дією потоку робочого тіла.

Для досягнення мети дослідження необхідно вирішити наступні задачі дослідження:

– розробити високоточну математичну модель для розрахунку втомної міцності роторів суднових ГТД; ця методика повинна достовірно описувати реальні умови експлуатації ротора, одночасно забезпечуючи точність та достовірність отриманих результатів;

– визначити вплив температури та тиску газового потоку на довговічність лопатки;

– визначити вплив конструкції охолоджуючої порожнини лопатки на рівень максимальних еквівалентних напружень в її пері.

## 2. Матеріали дослідження

Відповідно до теорії Серенсена-Когаєва залежність розподілу ймовірності руйнування лопатки:

$$F(\sigma_{\max}) = 1 - \exp\left(-\int_{\sigma_{\max}f(X,Y,Z)>0} \left[\frac{\sigma_{\max}f(X,Y,Z)}{\sigma_0}\right]^{\alpha_f} \frac{dV}{V_0}\right) \quad (1)$$

де  $V_0$  – одиничний об'єм зразка матеріалу лопатки,  $m^3$ ;  $\sigma_0$  – границя міцності матеріалу лопатки, МПа;  $\sigma_{\max}$  – напруження, що викликає руйнування лопатки, МПа;  $0 \leq f(X, Y, Z) \leq 1$  – безрозмірна функція координат лопатки;  $\alpha_f$  – параметр розподілу.

Математичне очікування напруження руйнування має наступний вигляд:

$$\bar{\sigma}_{\max} = \sigma_0 \left(\frac{V_0}{V^*}\right)^{1/\alpha_f} \Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha_f}\right), \quad (2)$$

де  $V^* = \int_V [f(X, Y, Z)]^{\alpha_f} dV$  – приведений об'єм;

$\Gamma$  – гамма-функція.

Відношення математичних очікувань для реальної лопатки та еталонного зразка матеріалу має наступний вигляд:

$$\frac{\bar{\sigma}_{\max 1}}{\bar{\sigma}_{\max 2}} = \left(\frac{V_2^*}{V_1^*}\right)^{1/\alpha_f}, \quad (3)$$

де  $\bar{\sigma}_{\max 1}$  – це середнє значення границі витривалості ( $\sigma_{-1}$ ) еталонного зразка матеріалу лопатки;  $\bar{\sigma}_{\max 2}$  – це середнє значення границі витривалості ( $\sigma_{-1}$ ) матеріалу реальної лопатки.

Для скінченно-елементної апроксимації елементів ротора використовується тривимірний криволінійний скінченний елемент гексагонального типу [7, 8]. Тоді приведений об'єм скінченного елемента визначається наступним чином:

$$V_e = \int_{-1}^1 [f_e(X, Y, Z)]^{\alpha_f} \det[J(P\Gamma\Theta)] dPd\Gamma d\Theta, \quad (4)$$

$e = 1, \dots, j,$

де  $V_e$  – приведений об'єм скінченного елемента;

$J$  – якобіан.

Безрозмірна функція координат скінченного елемента визначається за допомогою наступної залежності:

$$f_e(X, Y, Z) = \sum_{i=1}^n N_i \frac{\sigma_i}{\sigma_{\max}}, \quad (5)$$

$e = 1, \dots, j; \quad i = 1, \dots, 8,$

де  $f_e(X, Y, Z)$  – функція координат скінченного елемента;  $N_i$  – функції форми в вузлах скінченного елемента;  $\sigma_i$  – напруження в  $i$ -му вузлі скінченного елемента;  $\bar{\sigma}_{\max}$  – максимальне динамічне напруження в лопатці.

## 3. Дискусія

Під час проведення дослідження було визначено, що найбільш значний вплив на довговічність та втомну міцність лопаток мають високі температури та тиск турбулентного потоку робочого тіла. Вплив температури потоку робочого тіла наведено в табл. 1.

Аналізуючи результати розрахунків довговічності лопаток першого вінця, можна дійти висновку, що збільшення температури робочого тіла призводить до стрімкого підвищення рівня максимальних еквівалентних напружень та не менш стрімкого зниження довговічності лопаток. Особливо це проявляється при температурах потоку, що знаходяться в діапазоні 800 – 1000<sup>o</sup>C. Однак, наведені в табл. 1 дані, не враховують температуру охолоджуючого повітря. Повітря для охолодження лопаток надходить з компресора високого тиску. Саме тому його температура знаходиться в діапазоні від 300<sup>o</sup>C до 450<sup>o</sup>C.

Таблиця 1

Залежність максимальних еквівалентних напружень в лопатках першого лопаткового вінця та їх довговічності від температури на поверхні лопаток

Номер гармоніки моди вимушених коливань, k	Частота вимушених коливань f, Гц	Максимальні еквівалентні напруження $\bar{\sigma}_{\max}$ , МПа	Довговічність N, циклів
Температура на поверхні лопатки T = 300 <sup>o</sup> C			
k = 2	1139,6	127,9	0,154x10 <sup>9</sup>
k = 3	2574,2	196,4	
k = 4	2718,5	327,9	
Температура на поверхні лопатки T = 550 <sup>o</sup> C			
k = 2	1065,9	267,4	0,997x10 <sup>8</sup>
k = 3	2312,8	296,4	
k = 4	2456,9	327,9	
Температура на поверхні лопатки T = 800 <sup>o</sup> C			
k = 2	992,6	384,2	0,582x10 <sup>8</sup>
k = 3	2184,6	497,9	
k = 4	2275,3	520,4	

Вплив температури охолоджуючого повітря на довговічність охолоджуваних лопаток першого вінця при температурі робочого тіла  $1000^{\circ}\text{C}$  наведено на рис 1.

Аналіз діаграми, наведеної на рис. 2, свідчить, що зі зростанням тиску потоку робочого тіла довговічність лопаток значно зменшується. Також слід відзначити той факт, що тиск потоку на лопатках першого вінця у  $800\text{ кПа}$  є робочим і він призводить до появи найбільших еквівалентних напружень та частот його вимушених коливань.

Також були проведені дослідження впливу геометричних параметрів пера лопатки та охолоджуючих каналів на її втомну міцність. Підтверджено гіпотезу, що стінки охолоджуючих каналів можуть розг-

лядатися як ребра жорсткості стрингерного типу аналогічно даному підходу для оболонки (рис. 3).

Виходячи з аналізу рис. 8 можна зробити висновок, що збільшення висоти та товщини стінок в охолоджуючій порожнині лопатки призводить до зниження максимальних напружень. Але слід зазначити, що зміна геометричних параметрів пера лопатки також може призвести до збільшення температурних напружень в ньому через зміни параметрів теплообміну, що відбувається в процесі охолодження. Тому, виходячи з задачі підтримки оптимальних параметрів охолодження, для суднових ГТД товщина стінки охолоджуючих каналів не повинна перевищувати  $5\text{ мм}$ , а довжина стінки –  $15\text{ мм}$ .

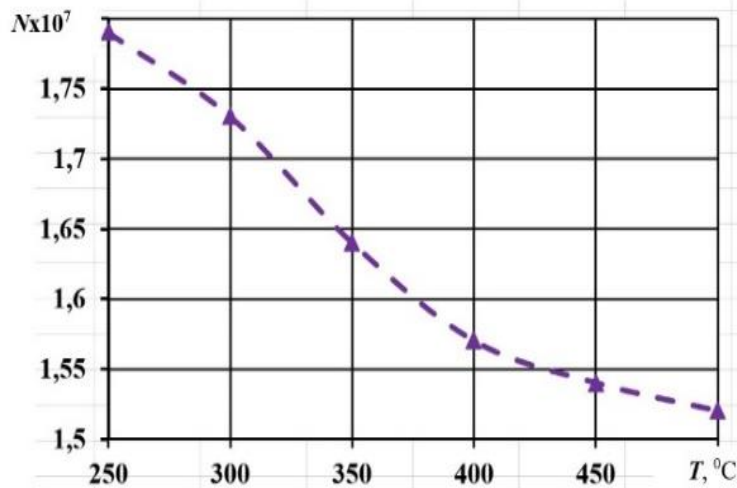


Рис. 1. Залежність довговічності лопаток першого лопаткового вінця від температури охолоджуючого повітря

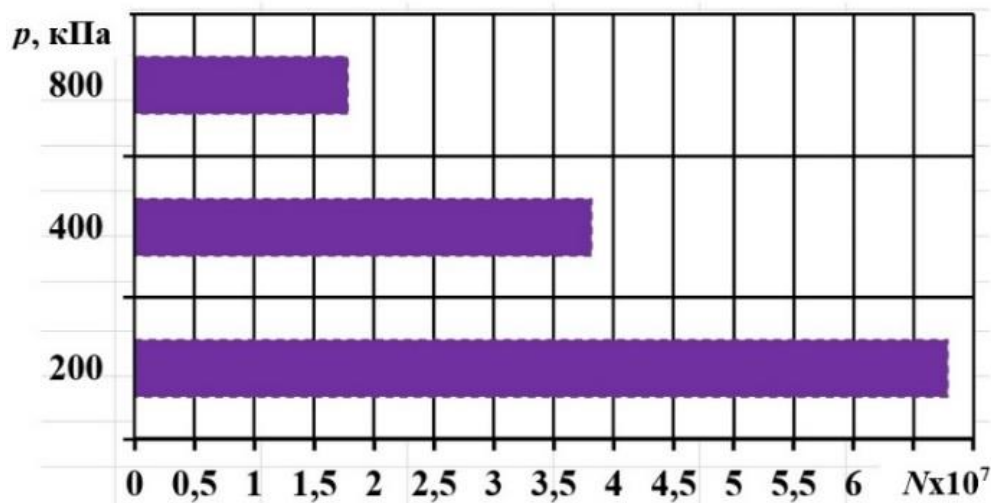
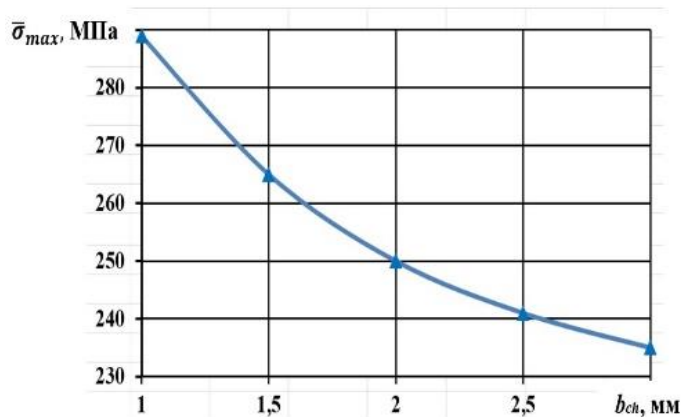
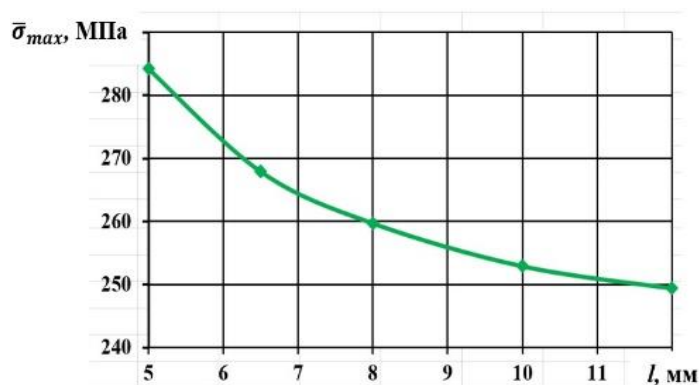


Рис. 2. Залежність довговічності лопаток вінців ротора суднового ГТД від тиску потоку на поверхні лопаток



а



б

Рис. 3. Залежність максимальних еквівалентних напружень в лопатковому вінці від: а) товщини стінок охолоджуючих каналів  $b_{ch}$ ; б) висоти стінок охолоджуючих каналів  $l$

## Висновки

В роботі розглянуті питання втомної міцності та довговічності лопаток ротора з урахуванням комплексного впливу тиску та високої температури турбулентного газового потоку. Розроблена математична модель з використанням гіпотези накопичення втомних пошкоджень Серенсена – Когаєва та рівняння Багсі поєднує в собі високу точність отриманих результатів та простоту розрахункової методики. Також були проведені дослідження впливу геометричних параметрів пера лопатки та охолоджуючих каналів на її втомну міцність. Підтверджено гіпотезу, що стінки охолоджуючих каналів можуть розглядатися як ребра жорсткості стрингерного типу.

Отримані в роботі результати в подальшому можуть бути використані в якості вихідних даних під час досліджень довговічності лопаток, що знаходяться під дією деформації повзучості, та при розрахунках довговічності лопаток з тріщинами.

**Внесок авторів:** формулювання проблеми, аналіз результатів дослідження – **Н. В. Сметанкіна**;

огляд та аналіз інформаційних джерел, розробка математичної моделі, проведення розрахунків, аналіз результатів дослідження – **С.О. Моргун**.

## Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що немає конфлікту інтересів щодо цього дослідження, фінансового, особистого, авторського чи іншого, який міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в цій статті.

## Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

## Наявність даних

Рукопис немає супутніх даних.

## Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що вони не використовували методи штучного інтелекту при створенні представленої роботи.

Усі автори прочитали та погодились з опублікованою версією рукопису.

### Література

1. *The role of stress-strain state of gas turbine engine metal parts in predicting their safe life [Text]* / Z. A. Duriagina, V. V. Kulyk, O. S. Filimonov, & et al. // *Progress in Physics of Metals*. – 2021. – Vol. 22, iss. 4. – P. 643–677. DOI:10.15407/ufm.22.04.643.
2. Guz, A. N., *Basic principles of fracture mechanics of materials loaded along cracks [Text]* / A. N. Guz, V. L. Bogdanov, & V. M. Nazarenko // *Advanced Structured Materials*. – 2020. – Vol. 138. – P. 61–148. DOI:10.1007/978-3-030-51814-1\_2.
3. Guz, A. N. *Nonclassical problems of fracture/failure mechanics: on the occasion of the 50th anniversary of the research [Text]* / A. N. Guz // *International Applied Mechanics*. – 2019. – Vol. 55, iss. 4. – P. 343–415. DOI:10.1007/s10778-019-00960-4.
4. Bogdanov, V. *Analysis of the beam approximation applicability in problems on compression of bodies along closely spaced cracks [Text]* / V. Bogdanov, M. Dovzhyk, & V. Nazarenko // *Advanced Structured Materials*. – 2024. – Vol. 204. – P. 59–80. DOI:10.1007/978-3-031-54063-9\_5.
5. Maktouf W. *Multiaxial high-cycle fatigue criteria and life prediction: application to gas turbine blade [Text]* / W. Maktouf, K. Ammar, I. Ben Naceur, & K. Sai // *International Journal of Fatigue*. – 2016. – Vol. 92. – P. 25–35. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2016.06.24.
6. Valeev, S. *Life test optimization for gas turbine engine based on life cycle information support and modeling [Text]* / S. Valeev, & N. Kondratyeva // *Energies*. – 2022. – Vol. 15. – P. 68–74. DOI:10.3390/en15196874.
7. Morhun, S. *Gas dynamic analysis of the modern single shaft gas turbine engine flow path [Text]* / S. Morhun, & S. Vilkul // *International Journal of Turbo and Jet Engines*. – 2023. – Vol. 40, iss. 1. – P. s271–s278. DOI:10.1515/tjj-2022-0019.
8. Morhun, S. *Determination of the modern single shaft gas turbine rotor thermal stresses [Text]* / S. Morhun // *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*. – 2024. – Vol. 54, iss. 1. – P. 46–60. DOI:10.55787/jtams.24.54.1.046.
9. *Development of top-down and bottom-up methodology using risk functions for systems with multiplicity of solutions [Text]* / A. Zagorodny, V. Bogdanov, Yu. Ermoliev, & M. Kulyk // *Studies in Systems, Decision and Control*. – 2023. – Vol. 454. – P. 3–23. DOI:10.1007/978-3-031-22464-5\_1.
10. *Life assessment of large turbine blades [Text]* / S. B. Narasimbachary, K. Smith, R. S. Schinde, & et al. // *Proceedings of ASME Turbo Expo 2019: Turbomachinery Technical Conference and Exposition*. – 2019. – Article no. V07AT31A015. DOI:10.1115/GT2019-91630.
11. *Thermal fatigue behavior of a fourth-generation Ni-based single crystal superalloy at 1000°C [Text]* / R. Na, Z. Tan, Sh. Dong, & et al. // *Materials Characterization*. – 2025. – Vol. 310. – P. 1–14. DOI:10.1016/j.matchar.2025.115682.
12. Bogdanov, V. L. *Fracture of highly elastic and composite materials in compression along near-surface crack [Text]* / V. L. Bogdanov, M. V. Dovzhyk, & V. M. Nazarenko // *Mechanics of Composite Materials*. – 2023. – Vol. 59, iss. 2. – P. 411–418. DOI: 10.1007/s11029-023-10105-x.
13. *Blade excitation alleviation of nozzleless radial turbine by causing treatment based on reduced-order model [Text]* / M. Yang, Zh. Lu, W. Sato, & T. Kuwata // *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. – 2025. – Vol. 147, iss. 8. – P. 1–12. DOI:10.1115/1.4067064.
14. Chondrakis, G. *Root cause analysis of turbo-prop engine Inconel 713LC turbine blades failure [Text]* / G. Chondrakis, A. Tzanis, E. Georgiou, & A. Koutsomichalis // *Engineering Failure Analysis*. – 2025. – Vol. 176. – P. 1–14. DOI: 10.1016/j.eng-failanal.2025.109609.
15. Guz, A. N. *Three-dimensional problems on loading of bodies along cracks [Text]* / A. N. Guz, V. L. Bogdanov, & V. M. Nazarenko // *Advanced Structured Materials*. – 2020. – Vol. 138. – P. 249–439. DOI:10.1007/978-3-030-51814-1\_4.
16. Zhang, X. *A multiaxial probabilistic fatigue life prediction method for nickel based single crystal turbine blade considering mean stress correction [Text]* / X. Zhang, H. Z. Huang, & K. Zhang // *Quality and Reliability Engineering International*. – Vol. 39, iss. 5. – P. 1735–1755. DOI: 10.1002/qre.3297
17. Kondratiev, A. V. *Optimization of design parameters of the main composite fearing of the launch vehicle under simultaneous force and thermal loading [Text]* / A. V. Kondratiev, & V. O. Kovalenko // *Space Science Technologies*. – 2019. – Vol. 25, iss. 4(119). – P. 3–21. DOI: 10.15407/knit2019.04.003.
18. Bogdanov, V. L. *Fracture of materials loaded along cracks: approach and results [Text]* / V. L. Bogdanov, A. N. Guz, & V. M. Nazarenko // *Advanced Structured Materials. Advances in Mechanics*. – 2023. – Vol. 191. – P. 51–89. DOI: 10.1007/978-3-031-37313-8-4.
19. Chirkov, A. *Mixed FEM implementation of three-point bending of the beam with an edge crack within strain gradient elasticity theory [Text]* / A. Chirkov, L. Nazarenko, & H. Altenbach // *Continuum Mechanics and Thermodynamics*. – 2025. – Vol. 37, iss. 1. – P. 1–14. DOI: 10.1007/s00161-024-01333-0.

### References

1. Duriagina, Z. A., Kulyk, V. V., Filimonov, O. S., Trostianchyn, A. M., & Sokulska, N. B. The role of stress-strain state of gas turbine engine metal parts in predicting their safe life. *Progress in Physics of Metals*, 2021, vol. 22, iss. 4, pp. 643–677. DOI: 10.15407/ufm.22.04.643.
2. Guz, A. N., Bogdanov, V. L., & Nazarenko, V. M. Basic principles of fracture mechanics of materials loaded along cracks. *Advanced Structured Materials*, 2020, vol. 138, iss. 4 pp. 61–148. DOI: 10.1007/978-3-030-51814-1\_2.
3. Guz, A. N. Nonclassical problems of fracture/failure mechanics: on the occasion of the 50th anniversary of the research. *International Applied Mechanics*, 2019, vol. 55, iss. 4, pp. 343–415. DOI: 10.1007/s10778-019-00960-4.
4. Bogdanov, V., Dovzhyk, M., & Nazarenko, V. Analysis of the beam approximation applicability in problems on compression of bodies along closely spaced cracks. *Advanced Structured Materials*, 2024, vol. 204, pp. 59–80. DOI: 10.1007/978-3-031-54063-9\_5.
5. Maktouf, W., Ammar, K., Ben Naceur, I., Sai, K. Multiaxial high-cycle fatigue criteria and life prediction: application to gas turbine blade. *International Journal of Fatigue*, 2016, vol. 92, pp. 25–35. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2016.06.24.
6. Valeev, S., & Kondratyeva, N. Life test optimization for gas turbine engine based on life cycle information support and modeling. *Energies*, 2022, vol. 15, pp. 68–74. DOI: 10.3390/en15196874.
7. Morhun, S., & Vilkul, S. Gas dynamic analysis of the modern single shaft gas turbine engine flow path. *International Journal of Turbo and Jet Engines*, 2023, vol. 40, iss. 1, pp. s271–s278. DOI: 10.1515/tjj-2022-0019.
8. Morhun, S. Determination of the modern single shaft gas turbine rotor thermal stresses. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2024, vol. 54, iss. 1, pp. 46–60. DOI: 10.55787/jtams.24.54.1.046.
9. Zagorodny, A., Bogdanov, V., Ermoliev, Yu., & Kulyk, M. Development of top-down and bottom-up methodology using risk functions for systems with multiplicity of solutions. *Studies in Systems, Decision and Control*, 2023, vol. 454, pp. 3–23. DOI: 10.1007/978-3-031-22464-5\_1.
10. Narasimbachary, S. B., Smith, K., Schinde, R. S., Amann, C., Kadau, K., & Iyer, S. Life assessment of large turbine blades. *Proceedings of ASME Turbo Expo 2019: Turbomachinery Technical Conference and Exposition*, 2019, article no. V07AT31A015. DOI: 10.1115/GT2019-91630.
11. Na, R., Tan, Z., Dong, Sh., Liang, Zh., & Guo, H. Thermal fatigue behavior of a fourth-generation Ni-based single crystal superalloy at 1000°C. *Materials Characterization*, 2025, vol. 310, pp. 1–14. DOI: 10.1016/j.matchar.2025.115682.
12. Bogdanov, V. L., Dovzhyk, M. V., & Nazarenko, V. M. Fracture of highly elastic and composite materials in compression along near-surface crack. *Mechanics of Composite Materials*, 2023, vol. 59, iss. 2, pp. 411–418. DOI: 10.1007/s11029-023-10105-x.
13. Yang, M., Lu, Zh., Sato, W., & Kuwata, T. Blade excitation alleviation of nozzleless radial turbine by causing treatment based on reduced-order model. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2025, vol. 147, iss. 8, pp. 1–12. DOI: 10.1115/1.4067064.
14. Chondrakis, G., Tzanis, A., Georgiou, E., & Koutsomichalis, A. Root cause analysis of turboprop engine Inconel 713LC turbine blades failure. *Engineering Failure Analysis*, 2025, vol. 176, pp. 1–14. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2025.109609.
15. Guz, A. N., Bogdanov, V. L., & Nazarenko, V. M. Three-dimensional problems on loading of bodies along cracks. *Advanced Structured Materials*, 2020, vol. 138, pp. 249–439. DOI: 10.1007/978-3-030-51814-1\_4.
16. Zhang, X., Huang, H. Z., & Zhang, K. A multi-axial probabilistic fatigue life prediction method for nickel based single crystal turbine blade considering mean stress correction. *Quality and Reliability Engineering International*, vol. 39, iss. 5, pp. 1735–1755. DOI: 10.1002/qre.3297.
17. Kondratiev, A. V., & Kovalenko, V. O. Optimization of design parameters of the main composite fearing of the launch vehicle under simultaneous force and thermal loading. *Space Science Technologies*, 2019, vol. 25, iss. 4(119), pp. 3–21. DOI: 10.15407/knit2019.04.003.
18. Bogdanov, V. L., Guz, A. N., & Nazarenko, V. M. Fracture of materials loaded along cracks: approach and results. *Advanced Structured Materials. Advances in Mechanics*, 2023, vol. 191, pp. 51–89. DOI: 10.1007/978-3-031-37313-8-4.
19. Chirkov, A., Nazarenko L., & Altenbach, H. Mixed FEM implementation of three-point bending of the beam with an edge crack within strain gradient elasticity theory. *Continuum Mechanics and Thermodynamics*, 2025, vol. 37, iss. 1, pp. 1–14. DOI: 10.1007/s00161-024-01333-0.

**DETERMINATION OF THE DURABILITY OF MARINE GAS TURBINE ENGINE BLADES***Natalia Smetankina, Serhii Morhun*

The research **focuses on** the durability of the rotor blades of a marine gas turbine engine. **The goal** of the research is to determine the maximum equivalent stresses and the durability of the rotor blades of a ship gas turbine engine under the action of the working fluid flow. To achieve the aim of the research, the **following research tasks** were addressed: developing a high-precision mathematical model for calculating the fatigue strength of marine gas turbine engine rotors, which reliably reflects the actual operating conditions while ensuring the accuracy of the results; determining the influence of the gas flow temperature and pressure on blade durability; and analyzing the influence of blade's cooling cavity design on the level of maximum equivalent stresses. **The methods** employed include numerical methods, in particular the finite element method. **The following results** were obtained: the problem of determining the equivalent dynamic stresses and durability of gas turbine blades was solved in the work. The numerical results were used to determine the operational lifespan of the rotor blades. Equivalent stresses and service life were determined for the most critical frequencies of forced oscillations across all turbine stages, that constitute the rotor. A marine gas turbine engine must be as compact as possible. Thus, its rotor consists of only three stages, which results in considerable vibration and thermal loads on the rotor blades. It was established that the blades of the first stage, which are exposed to the highest thermal and vibration loads, have the lowest durability. **The scientific novelty** lies in the development of an improved mathematical model for determining the durability of blades of marine and stationary gas turbine engines. **Conclusions.** The calculation results show that at a surface temperature of approximately 1000 °C, the maximum equivalent stresses are approximately equal to the endurance limit of the blade material. The influence of the geometric parameters of the blade cooling cavity on the value of the maximum equivalent stresses was also investigated. The results obtained can be used for subsequent research related to rotor creep and the initiation of fatigue cracks on the blades surfaces.

**Keywords:** durability; blades; marine gas turbine engine; equivalent stresses; gas flow pressure and temperature.

**Сметанкіна Наталя Володимирівна** – д-р техн. наук, проф., зав. відділу вібраційних і термоміцнісних досліджень, Інститут енергетичних машин і систем імені А.М. Підгорного НАН України, Харків, Україна.

**Моргун Сергій Олександрович** – канд. техн. наук, доц., доц. каф. інженерної механіки та технології машинобудування, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна

**Natalia Smetankina** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Vibration and Thermostability Studies, Anatolii Pidhornyi Institute of Power Machines and Systems of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv, Ukraine,

e-mail: nsmet@ipmach.kharkov.ua, ORCID: 0000-0001-9528-3741, Scopus Author ID: 7801574244.

**Serhii Morhun** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Engineering Mechanics and Mechanical Engineering Technology, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine,

e-mail: serhii.morhun@nuos.edu.ua, ORCID: 0000-0003-2881-7541, Scopus Author ID: 7801574244.