

УДК 539.3

Наталія Сметанкіна¹, д.т.н., проф.; Сергій Моргун², к.т.н., доц.

¹Інститут енергетичних машин і систем імені А.М. Підгорного, НАН України, Україна

²Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Україна

КОНТАКТНІ НАПРУЖЕННЯ В РОТОРІ СУДНОВОГО ГАЗОТУРБІННОГО ДВИГУНА

Викладено основні положення удосконаленої моделі напружено-деформованого стану ротора компактного одновального газотурбінного двигуна з урахуванням контактної взаємодії між лопатками та диском у лопатковому вінці, а також між самими лопатками. Модель враховує комплексний вплив механічної та температурної контактної взаємодії між частинами ротора на рівень динамічних напружень в ньому. Від існуючих запропонована математична модель відрізняється використанням варіаційного принципу Лагранжа для врахування контактної взаємодії між частинами лопаткового вінця, пов'язавши потенційну енергію деформації при контактній взаємодії твердих тіл із роботою зовнішніх сил у зоні контакту. За допомогою двовузлових скінчених контактних елементів вдалося виконати моделювання зон контакту елементів лопаткового вінця.

Ключові слова: контактні напруження, ротор, контактні скінчені елементи, контактний тиск, вимушені коливання

Natalia Smetankina, Serhii Morhun

CONTACT STRESSES IN THE ROTOR OF A MARINE GAS TURBINE ENGINE

The main provisions of a compact single-shaft gas turbine engine rotor contact stress-strain state mathematical model are presented, taking into account the contact interaction between the blades and the disk in the impeller. The model takes into account the complex influence of mechanical and temperature contact interaction between the rotor parts on the level of dynamic stresses in it. The proposed mathematical model differs from the existing ones in using the Lagrange variational principle to take into account the contact interaction between the parts of the blade crown, linking the potential energy of deformation during the contact interaction of solids with the work of external forces in the contact zone. Using two-node finite contact elements, it was possible to simulate the contact zones of the blade crown elements.

Key words: contact stresses, rotor, contact finite elements, contact pressure, forced vibration

При вирішенні контактної задачі для елементів ротора турбіни використовувався принцип стаціонарності або мінімуму зміни віртуальної роботи. Тобто сума потенційної енергії деформації зони контакту та роботи зовнішніх сил в зоні контакту дорівнюють нулю. Відповідно до варіаційного принципу Лагранжа [1]:

$$\delta L = 0$$

$$L = \Pi + W \quad (1)$$

де L – функція Лагранжа; Π – потенційна енергія деформації зони контакту; W – робота зовнішніх сил в зоні контакту.

Скориставшись методом енергетичного балансу замінемо (2) наступним варіаційним рівнянням:

$$\delta L = \delta(\Pi - W) = 0 \quad (2)$$

та проведемо мінімізацію енергетичного функціоналу зони контакту L на узагальненому переміщенні δ :

$$\frac{\partial L}{\partial \delta} = 0 \quad (3)$$

де $\{\delta\}$ – вектор узагальнених переміщень.

Для коректного моделювання зон контакту твердих тіл елементів лопаткових вінців вважатимемо, що між контактуючими поверхнями лопаток і дисків, а також бандажними полицями сусідніх лопаток розташовано шар спеціальних двовузлових контактних скінчених елементів (рис. 1) [2].

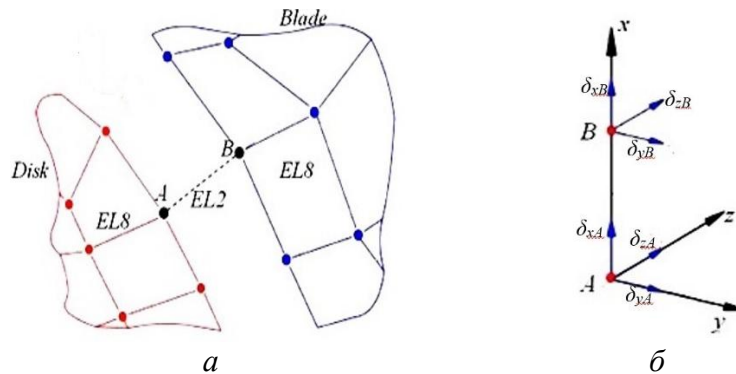


Рисунок 1. Контактна зона між елементами лопаткового вінця:

a – скінченоелементна апроксимація зони контакту лопатки і диску; *б* – скінчений контактний елемент в локальній декартовій системі координат; *Blade* – лопатка; *Disk* – диск

Розроблена математична модель враховує комплексний вплив механічної та температурної контактної взаємодії між частинами ротора на рівень динамічних напружень в ньому. рівняння енергетичного балансу контактного скінченного елемента в матричному вигляді матиме вигляд [3]:

$$\begin{aligned} [K]\{\delta\} &= \{F\} \\ [\Lambda]\{T\} &= \{Q\} \end{aligned} \quad (4)$$

де $[K]$ – матриця жорсткості контактного скінченного елемента; $\{\delta\}$ – вектор узагальнених переміщень вузлів контактного скінченного елемента; $\{F\}$ – вектор контактних сил; $[\Lambda]$ – матриця теплопроводності контактного скінченного елемента; $\{T\}$ – вектор температур контактного скінченного елемента; $\{Q\}$ – вектор теплового потоку.

Розглянуто вплив контактного тиску на величину контактної теплопередачі стику в зоні контакту елементів лопаткового вінця (рис. 2).

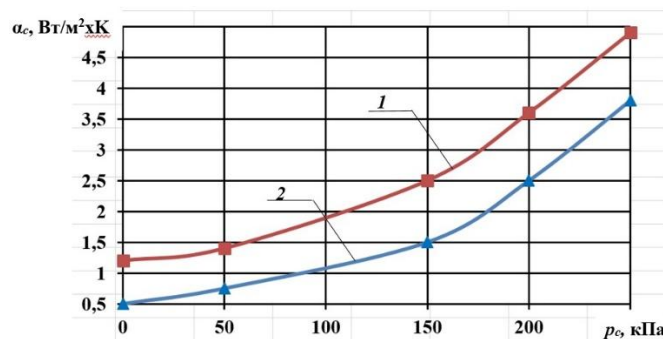


Рисунок 2. Вплив контактного тиску на коефіцієнт теплопередачі стику в зоні контакту елементів лопаткового вінця:

1 – зона контакту лопаток та диску; 2 – зона контакту лопаток

Враховуючи наявність конструкційного демпфірування в бандажних полицях лопаток та незначну шорсткість контактуючих поверхонь відповідно до технологічної документації механічної обробки лопаток, була визначена залежність контактного тиску від частоти вимушених коливань лопаткового вінця (табл. 1).

Таблиця 1. Залежність контактного тиску від частот вимушених коливань першого лопаткового вінця

Номер гармоніки моди коливань, k	Частота вимушених коливань f , Гц	Контактний тиск p , кПа
1*	821,43	250,2
1	868,27	214,1
2	1876,70	176,7
3	2090,82	150,8
4	3175,40	139,6

* позначає зонтину форму коливань лопаткового вінця

Аналіз наведених в табл. 1 даних свідчить про оберненопропорційну залежність між контактним тиском та частотою вимушених коливань вінця. Зі збільшенням частоти величина контактного тиску зменшується. Тобто зі зростанням частоти вимушених коливань вінця збільшується і величина проковзування по бандажним полицям, що, в свою чергу, приводить до зменшення контактного тиску. Але відповідно до розділу 3 величина проковзування, що залежить від геометричних параметрів бандажних полиць, також впливає і на частоту вимушених коливань вінця. Особливу увагу при проведенні дослідження треба приділити моді з коефіцієнтом гармоніки $k = 4$, яка відповідає найбільш небезпечній з точки зору входу в резонанс частоті вимушених коливань вінця $f = 3175,40$ Гц.

Визначено, що контактна теплопередача стику зростає зі збільшенням контактного тиску як в зоні контакту лопаток з диском, так і в зоні контакту бандажних полиць сусідніх лопаток. Враховуючи наявність конструкційного демпфірування в бандажних полицях лопаток та незначну шорсткість контактуючих поверхонь відповідно до технологічної документації механічної обробки лопаток, була визначена залежність контактного тиску від частоти вимушених коливань найбільш навантаженого першого лопаткового вінця. Отримані результати розрахунків можуть бути використані в подальшому при формуванні технологічної документації для проведення операцій монтажу лопаткових вінців.

Література

1. Smetankina N., Morhun S. The modern single-shaft gas turbine rotor stress-strain state determination taking into account the contact thermoelasticity problem. *Tehnicki vjesnik*. 2024. Is. 31. P. 551-556. <https://doi.org/10.17559/TV-20230628000770>
2. Smetankina N., Morhun S., Melnychenko O. Influence on creep on the modern single shaft gas turbine rotor blades durability. 2026. Vol. 43. Is. 1. P. 41-48. <https://doi.org/10.1515/tjj-2025-0069>
3. Smetankina N., Morhun S., Melnychenko O. Influence of contact stresses in impellers joints on the marine gas turbine rotor stress-strain state. *International Journal of Turbo and Jet Engines*. 2026. <https://doi.org/10.1515/tjj-2026-0018>