

УДК 539.375

ВИЗНАЧЕННЯ ТРІЩИНОСТІЙКОСТІ РОТОРА ПАРОВОЇ ТУРБИНИ ПРИ ДІЇ ОБ'ЄМНИХ СИЛ

С.О. Пискунов¹,
д-р техн. наук

О.О. Шкриль²,
д-р техн. наук

Ю.В. Максим'юк²,
д-р техн. наук

¹Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут
ім. Ігоря Сікорського", м.Київ-56, просп. Перемоги 37, 03056

²Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ
Повітрофлотський просп., 31, м. Київ. 03680

DOI: 10.32347/2410-2547.2019.103.57-62

Проведена оцінка напружено-деформованого стану ротора парової турбіни з початковою напівеліптичною тріщиною при дії об'ємних сил, викликаних відцентровим навантаженням. Отриманий розподіл коефіцієнтів інтенсивності напружень вздовж фронту тріщини. Проведено порівняння з результатами оцінки тріщиностійкості ротора за спрощеними підходами.

Ключові слова: метод скінченних елементів (МСЕ), еліптична тріщина, коефіцієнт інтенсивності напружень, ротор парової турбіни, об'ємні сили.

Вступ. Визначення тріщиностійкості деталей конструкцій з тріщинами потребує обчислення параметрів механіки руйнування. Значна частина таких об'єктів використовується в машинобудуванні та енергетиці, до яких, зокрема, відносяться елементи та деталі турбін. В даній роботі проведено визначення тріщиностійкості диска ротора парової турбіни з початковою напівеліптичною тріщиною. Ротор знаходиться в умовах дії об'ємних сил, що викликані відцентровим навантаженням. В умовах лінійного деформування ротора оцінку тріщиностійкості доцільно виконувати на основі коефіцієнтів інтенсивності напружень (КІН). Розв'язання таких задач виконується переважно чисельними методами, серед яких найбільшого поширення здобув метод скінченних елементів. Для розрахунку кругових тіл ефективного застосування здобув напіваналітичний метод скінченних елементів (НМСЕ) [1, 3, 4]. Для визначенні КІН широко використовується прямий метод. Методика визначення КІН прямим методом в просторових тілах із застосуванням НМСЕ достатньо повно відображена в роботах [1, 3, 4]. Отже питання визначення тріщиностійкості диска ротора парової турбіни є актуальним на сьогоднішній день.

Розрахунок диска ротора турбіни. Диск ротора парової турбіни є масивним вісесиметричним тілом із центральним наскрізним отвором та ободом для закріплення бандажу з лопатками (рис. 1). Сили, що впливають на диск, обумовлені його обертанням із частотою $n_o=3000$ об/хв і складаються з рівномірно розподіленого по площині бандажного обода

поверхневого навантаження інтенсивністю 68 МПа, що моделює вплив лопаток, і масових сил, що розподілені по об'єму диска.

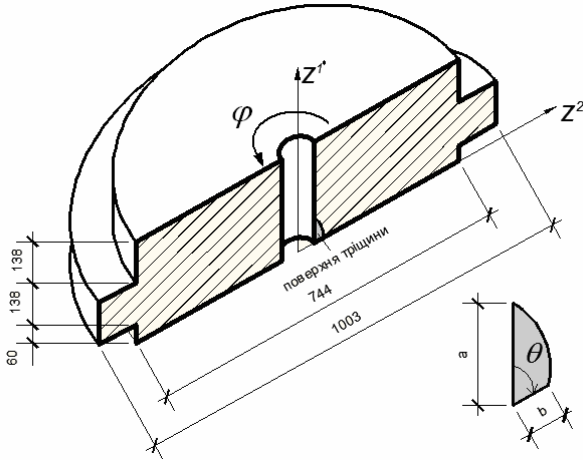


Рис. 1. Ротор парової турбіни

Масова сила dP , яка діє на елементарний об'єм матеріалу dV , що обертається навколо осі зі швидкістю n_o і розташований на відстані $R = z^2$ від осі обертання, обчислюється за формулою:

$$dP = \rho w^2 R dV,$$

де $\rho = 7850 \text{ кг/м}^3$ – щільність матеріалу диска, $w = \pi n_o / 30$ – кутова швидкість обертання диску. Фізико механічні характеристики матеріалу $E = 1.86 \text{ МПа}$, $\nu = 0.3$.

На першому етапі було визначено розподіл параметрів напружено-деформованого стану (НДС) диска ротора без тріщини. Дискретна модель диска, при якій досягнуто умови збіжності НДС при поступовому згущенні сітки СЕ в поперечному перерізі, наведена на рис. 2. Напружено-деформований стан суцільного ротора є вісесиметричним, а максимальні напруження виникають в області внутрішнього отвору, яка є найближчою до початку прийнятої системи координат (рис. 3).

На наступному етапі проводилось дослідження тріщиностійкості диска ротора з тріщиною, яка може з'явитися в місці найбільшого рівня напружень (рис. 1). Конфігурація тріщини має вигляд еліпсу із розмірами $b=1 \text{ см}$, $a=2 \text{ см}$. Дискретна модель диска ротора з тріщиною показана на рис. 4.

Наявність тріщини призводить до порушення вісесиметричності напруженого стану. Зважаючи на необхідність моделювання граничних умов на берегах тріщини для побудови дискретної моделі використані кругові незамкнені скінченні елементи. Розрахункова модель – сектор ротора, відсічений двома площинами, розташованим на відстані φ (рис. 1). В площині при $\varphi = 0$ розташована тріщина. Граничні умови на обидвох площинах відповідають площинам симетрії за виключенням області

поверхні тріщини, яка вільна від закріплень. Виходячи з необхідності ефективної і достовірної апроксимації НДС в околі вершини тріщини і загального зменшення обчислювальних витрат, були проведені дослідження зі зменшення розміру дискретної моделі вздовж окружної координати ($z^{3'} = \varphi$), що, в свою чергу, дозволяє зменшити кількість поліномів при використанні незамкненого кільцевого СЕ [1,3]. Як видно з отриманих розподілів колових напружень уздовж колової координати в точці їх найбільших значень, збурення напружень, пов'язані із наявністю тріщини швидко згасають, а величини колових напружень, отримані при $\varphi = 45^\circ$ (штрихова лінія) і $\varphi = 90^\circ$ (суцільна лінія), практично збігаються (рис. 5). Відповідно подальші дослідження проводились із використанням дискретної моделі при $z^{3'} = \varphi = 45^\circ$ (1/8 частина ротора).

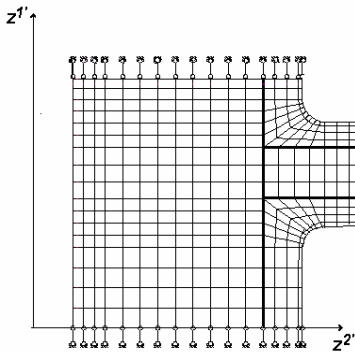


Рис. 2. Поперечний переріз дискретної моделі диска ротора парової турбіни

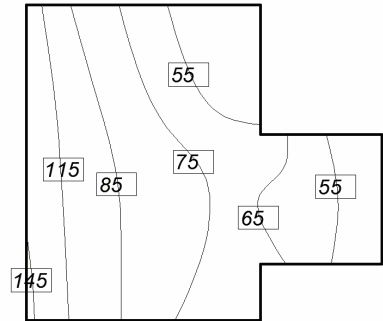


Рис. 3. Розподіл інтенсивності напружень в поперечному перерізі диска ротора без тріщини (МПа)

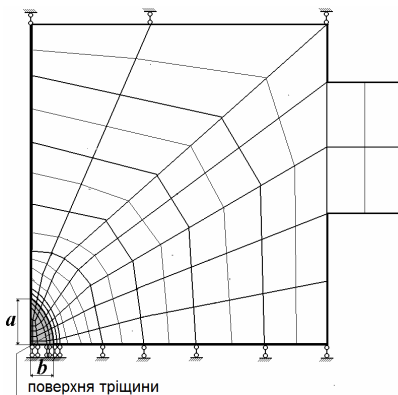


Рис. 4. Поперечний переріз дискретної моделі диска ротора з тріщиною

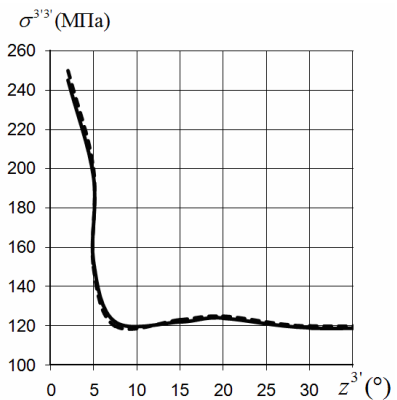


Рис. 5. Розподіл колових напружень уздовж колової координати

Отриманий розподіл вздовж фронту тріщини показує, що КІН

набувають максимальних значень при $\theta = 90^\circ$ (рис. 6). Результати обчислення КІН для тріщин різної еліптичності для точки фронту $\theta = 90^\circ$, отримані на основі НМСЕ, показані на рис. 7.

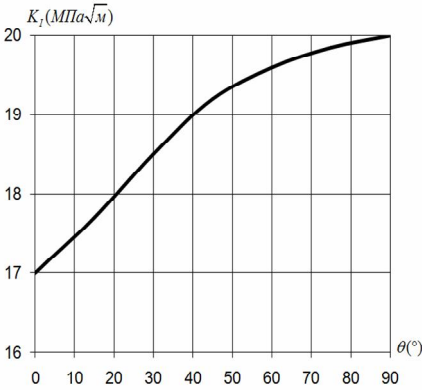


Рис. 6. Розподілення КІН вздовж фронту тріщини

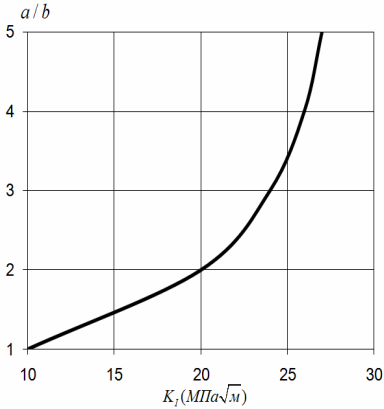


Рис. 7. Значення КІН при різній еліптичності

В інженерній практиці оцінку КІН виконують за формулою для пластини з бічним надрізом [2]:

$$K = 1,12\sigma^H \sqrt{\pi l_{\text{тр}}}, \quad (1)$$

де σ^H – номінальне напруження.

В якості номінальних напружень в (1) використовувались величини колових напружень, що були визначені в диску ротора без тріщини. Результати, позначені штриховою лінією отримані за величинами напружень в СЕ перед фронтом майбутньої тріщини (точка А на вставці рис. 8), а позначені суцільною лінією - за величинами напружень в СЕ за фронтом майбутньої тріщини (точка В на вставці рис. 8). Розрахунок проведений для тріщин різної еліптичності, що потребувало побудови відповідних дискретних моделей в поперечному перерізі ротора. Порівняння

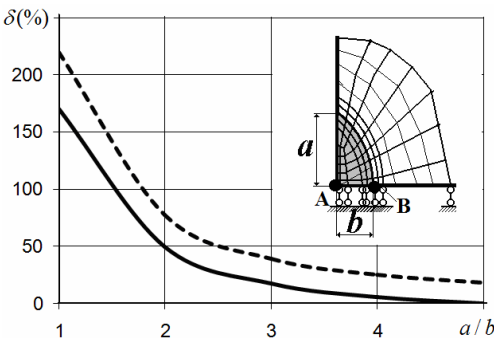


Рис. 8. Похибка КІН, обчислених за наближеною формулою (1)

цих результатів показує, що при еліптичності тріщин $a/b \leq 4$ значення КІН, обчислені за формулою (1), значно відрізняються від результатів просторового розрахунку, що урахує наявність еліптичної тріщини (рис. 8).

Виконані дослідження тріщиностійкості диска ротора парової турбіни в просторовій постановці на

основі НМСЕ, дали змогу отримувати розподіл КІН вздовж фронту напівеліптичної тріщини. Отримані результати просторового розрахунку дозволили встановити межу можливості застосування використовуваних на практиці наближених підходів до достовірного визначення КІН.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Баженов В.А., Гуляр О.І., Пискунов С.О., Сахаров О.С.* Напіваналітичний метод скінченних елементів в задачах руйнування просторових тіл: Монографія – К.: КНУБА, 2005. – 298с.
2. *Когаев В.П., Махутов Н.А., Гусенков А.П.* Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность / М.: Машиностроение, 1985. – 223 с.
3. *Напіваналітичний метод скінчених елементів у задачах руйнування тіл з тріщинами* / [Баженов В. А., Пискунов С. О., Шкріль О. О.] – Київ: Вид-во "Каравела", 2017. – 208 с.
4. *Пискунов С.О. Шкріль О.О., Мицюк С.В.* Прямий метод визначення коефіцієнтів інтенсивності напружень в призматичних та просторових незамкнених тілах обертання при статичному навантаженні // Опір матеріалів і теорія споруд. – 2016. – Вип. 97. – С. 3-14.

REFERENCES

1. *Bazhenov V.A., Gulyar A.I., Piskunov S.O., Saharov A.S.* Napivanalitchniy metod skinchennih elementiv v zadachah ruynuvannya prostorovih til (Semianalitic finite element method in problems of fracture spatial bodies): Monografiya – K.: KNUBA, 2005. – 298 p.
2. *Kogayev V.P., Makhutov N.A., Gusenkov A.P.* Rascheti detaley mashin i konstruksiy na prychnost' i dolgovechnost' / M.: Mashinostroyeniye, 1985. – 223 s.
3. *Napivanilitchniy metod skinchennikh yelementiv u zadachi ruynuvannya til z trishchinami* / [Bazhenov V. A., Piskunov S. O., Shkril' O. O.] - Kіv: Vid-vo "Karavela", 2017. - 208 s.
4. *Piskunov S.O. Shkril' O.O., Mityuk S.V.* Pryamiy metod viznachennya koyefitsientiv intenzivnosti napruzhen' v prizmatichnikh ta prostorovikh nezamknennikh tilakh obertannya pri staticheskom navantazheni // Opir materialiv i teoriya sporud. - 2016. - Vip. 97. - S. 3-14.

Стаття надійшла 03.09.2019 р.

Piskunov S.O., Shkril' A.A., Maksimuk Yu.V.

DETERMINATION OF CRACK RESISTANCE OF A STEAM TURBINE ROTOR UNDER THE VOLUME FORCES ACTION

The problem of the crack resistance of a steam turbine rotor disk with an initial semi-elliptical crack is investigated in this paper. The forces affecting the disk are due to its rotation and consist of a load uniformly distributed of the surface rim, modeling the impact of the blades, and mass forces distributed over the volume of the disk. It is assumed that the process of deformation of the rotor disk is linear. The stress intensity factor (CIF) are used to evaluate the fracture resistance. The steam turbine rotor disc is a massive axisymmetric body, which is why a semi-analytic finite element method is used to model the stress-strain state, which has been proven in a number of work for objects of this type. In the first stage, the distribution of stress-strain state of the rotor disc without crack is determined. The obtained results showed that maximum stresses occur in the region of the inner hole of the rotor disk. The following was to determine the fracture resistance of the rotor disc with a crack that may appear under the highest stress level. The configuration of the crack front is elliptical. The obtained results shows that the CIF attains the maximum value at the point furthest from the inner hole. The influence of ellipticity on the maximum values of CIF was investigated. The maximum CIN values for the rotor disc were determined using the approximate method used in the design of such objects. It involves the results of the known formula used to determine the CIF in the plate with a lateral crack. Comparison of results shows the necessity of calculate such objects in the spatial formulation. There are significant limitations to the use of the two-dimensional approach to determine CIF in such objects.

Keywords: finite element method (FEM), stress intensity factor, steam turbine rotor, elliptical crack, volume forces.

Пискунов С.О., Шкріль А.А., Максимюк Ю.В.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ РОТОРА ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ ПРИ ДЕЙСТВИИ ОБЪЕМНЫХ СИЛ

Проведена оцінка напружено-деформованного станю ротора парової турбини с начальнй полуеліптичеської тріщиной при действии обьємных сил, вызванных центробежными нагрузками. Получено распределение коэффициентов интенсивности

напружений вдоль фронта трещины. Проведено сравнение с результатами оценки трещиностойкости ротора по упрощенным подходам.

Ключевые слова: метод конечных элементов (МКЭ), коэффициент интенсивности напряжений, ротор паровой турбины, эллиптическая трещина, объемные силы

УДК 539.375

Пискунов С.О., Шкриль О.О., Максим'юк Ю.В. Визначення тріщиностійкості ротора парової турбіни при дії об'ємних сил // Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-тех. збірн. – К.: КНУБА, 2019. – Вип. 103. – С. 57-62.

Проведена оцінка напружено-деформованого стану ротора парової турбіни з початковою напівеліптичною тріщиною при дії об'ємних сил, викликаних відцентровим навантаженням. Отриманий розподіл коефіцієнтів інтенсивності напружень вздовж фронту тріщини. Проведено порівняння з результатами оцінки тріщиностійкості за спрощеними підходами.

Табл. 0. Іл. 8. Бібліогр. 4 назв.

UDC 539.375

Piskunov S.O., Shkriil' A.A., Maksymyuk Yu.V. Determination of crack resistance of a steam turbine rotor under the volume forces action // Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-&Technical collected articles – Kyiv: KNUBA, 2019. – Issue 103. – P. 57-62. – Ukr

The stress-strain state of a steam turbine rotor with an initial semi-elliptical crack under the action of volumetric forces caused by centrifugal loading was evaluated. The distribution of stress intensity factors along the crack front was obtained. The comparison with the results of the simplified approaches to crack resistance evaluation was made.

Tabl. 0. Fig. 8. Ref. 4.

УДК 539.375

Пискунов С.О., Шкриль А.А., Максимюк Ю.В. Определение трещиностойкости ротора паровой турбины при действии объемных сил // Сопротивление материалов и теория сооружений: науч.-тех. сборн. – К.: КНУСА, 2019. – Вып. 103. – С. 57-62. – Укр.

Проведена оцінка напружено-деформованого стану ротора парової турбіни з початковою напівеліптичною тріщиною при дії об'ємних сил, викликаних відцентровим навантаженням. Отриманий розподіл коефіцієнтів інтенсивності напружень вздовж фронту тріщини. Проведено порівняння з результатами оцінки тріщиностійкості за спрощеними підходами.

Табл. 0. Іл. 8. Библіогр. 4 назв.

Автор (вчена ступень, вчене звання, посада): професор, доктор технічних наук, завідувач кафедри динаміки і міцності машин та опору матеріалів НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського» Пискунов Сергій Олександрович.

Адреса: 03056 Україна, м. Київ, просп. Перемоги 37, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», кафедра динаміки і міцності машин та опору матеріалів.

Мобільний тел.: +38(050) 962-66-14

Імейл: s.piskunov@ua.fm

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3987-0583>

Автор (вчена ступень, вчене звання, посада): доцент, доктор технічних наук, професор кафедри будівельної механіки КНУБА Шкриль Олександрович.

Адреса: 03680 Україна, м. Київ, Повітрофлотський проспект 31, Київський національний університет будівництва і архітектури, кафедра будівельної механіки.

Мобільний тел.: +38(050) 307-61-49.

Імейл: shkryl.oo@knuba.edu.ua

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0851-4754>

Автор (вчена ступень, вчене звання, посада): доцент, доктор технічних наук, доцент кафедри будівельної механіки КНУБА Максим'юк Юрій Всеволодович.

Адреса: 03680 Україна, м. Київ, Повітрофлотський проспект 31, Київський національний університет будівництва і архітектури, кафедра будівельної механіки.

робочий тел.: +38(044) 241-55-38.

Мобільний тел.: +38(067) 230-94-72.

Імейл: maksymiuk.iuv@knuba.edu.ua

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5814-6227>