

УДК 539.375

В.А. Баженов, д-р техн. наук,
О.І. Гуляр, д-р техн. наук,
С.О. Пискунов, д-р техн. наук,
О.О. Криль, канд. техн. Наук,
Д.В. Богдан

ВИЗНАЧЕННЯ ТРІЩИНОСТІЙКОСТІ ЛОПАТКИ ГАЗОВОЇ ТУРБІНИ З НАПІВЕЛІПТИЧНОЮ ТРІЩИНОЮ

Розглянута реалізація методики визначення J-інтеграла модифікованим методом реакцій в призматичних тілах з поперечними тріщинами на прикладі дослідження тріщиностійкості лопатки газової турбіни.

На сьогоднішній день в енергетиці та інших галузях промисловості можуть експлуатуватися елементи конструкцій з тріщинами. Значну частину таких об'єктів можна віднести до класу призматичних тіл. Розрахунок таких задач потребує обчислення параметрів механіки руйнування. Найбільшого застосування серед них здобув J-інтеграл Черепанова-Райса. Обчислення J-інтеграла в дискретних моделях методу скінченних елементів (МСЕ) доцільно виконувати методом реакцій [1,2]. Його використання дозволило отримати інваріантні величини J-інтеграла в задачах пружного та, в часткових випадках, пружнопластичного деформування [3].

В даній роботі методика визначення J-інтеграла методом реакцій була застосована при розв'язанні задачі про визначення тріщиностійкості лопатки газової турбіни з напівеліптичною тріщиною від дії експлуатаційного навантаження. Для досягнення цієї мети використовується модифікований метод реакцій із представленням дискретної моделі за допомогою напіваналітичного методу скінченних елементів (НМСЕ).

Складний характер профілю лопатки турбіни моделюється шляхом задання набору скінченних елементів, поперечний переріз яких може змінюватися вздовж утворюючої Z^3 . Кожний поперечний переріз СЕ вздовж цієї осі знаходиться в стані позacentрового розтягу (рис. 1).

При формуванні розрахункової моделі лопатки враховані раніше виконані дослідження [4], присвячені розвитку початкової тріщини в лопатці турбіни при дії циклічного навантаження.

Проведені раніше дослідження по континуальному руйнуванні лопатки показали, що утворення тріщини виникає в перерізах в межах $0,94R_0$ - $1,06R_0$, де R_0 – небезпечний поперечний переріз лопатки, в якому комбінація усередненого напруження σ_0 і усередненої температури T_0 призводить до найбільш інтенсивного накопичення деформацій повзучості.

Розрахункова модель лопатки наведена на рис. 2.

Моделювання верхньої частини лопатки ($R > 1,06 R_0$) здійснюється шляхом прикладення до перерізу $R = 1,06 R_0$ нерівномірно розподіленого навантаження q . Крім того, фрагмент завантажений розподіленим за об'ємом відцентровим навантаженням p .

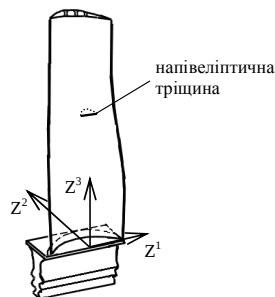


Рис. 1. Загальний вигляд лопатки газотурбінного двигуна (ГТД) з напівеліптичною тріщиною

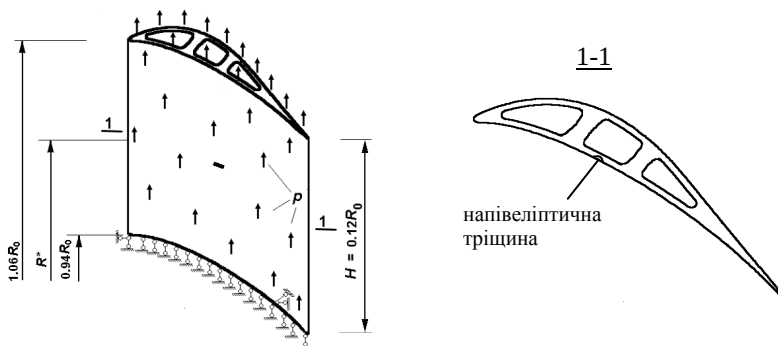


Рис. 2. Розрахункова модель лопатки з тріщиною

Розглядуваний фрагмент лопатки може бути віднесений до неоднорідних призматичних тіл. Відповідна дискретна модель НМСЕ, що утворена із використанням неоднорідних призматичних СЕ, наведена на рис. 3.

Отримані на основі 3D-МСЕ розподілення інтенсивності нормальних напружень σ_i , віднесеної до усередненої величини інтенсивності напружень σ_0 в небезпечному перерізі R_0 , по радіусу в характерних точках поперечного перерізу (рис. 3, б) свідчать, що напружено-деформований стан фрагмента лопатки має суттєво тривимірний характер: величини інтенсивності напружень в межах поперечного перерізу відрізняються більше ніж в 2,5 рази в точках 1 і 8 перерізу

$R = 0,94R_0$ (рис. 3,а). В точці 1 (рис. 3,б) відмінність в напруженнях σ_i досягає 1,5 разів.

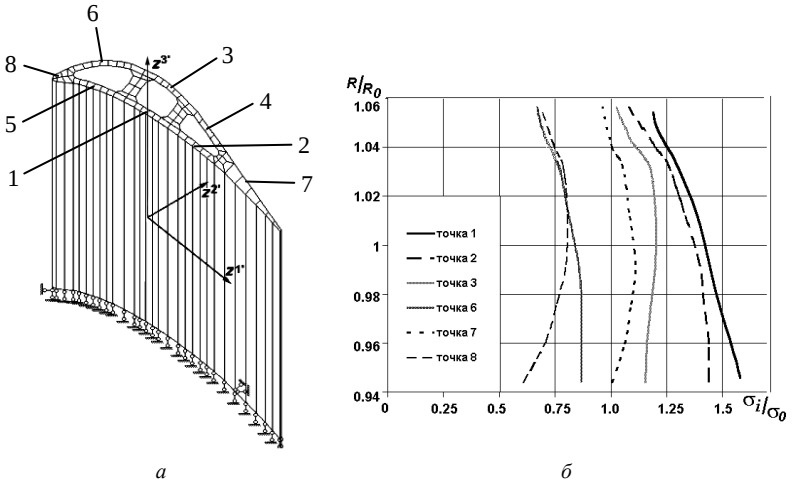


Рис. 3. Дискретна модель лопатки на основі НМСЕ з характерними точками поперечного перерізу (а), розподіл безрозмірної інтенсивності напружень по висоті лопатки (б)

Результат розрахунку, виконаний із використанням неоднорідних призматичних СЕ засвідчив суттєві відмінності в розподіленні параметрів напружено-деформованого стану по висоті лопатки.

Порівняння отриманого розподілення безрозмірної інтенсивності нормальних напружень σ_i/σ_0 по висоті фрагмента лопатки з розв'язком, отриманим на основі 3D-МСЕ при пружному деформуванні в зазначених характерних точках перерізу (рис. 3, а) засвідчило добре узгодження цих результатів [5].

Дослідження збіжності розподілення КІН вздовж фронту початкової тріщини, обчислення яких виконувалось за методикою описаною в [4], засвідчило, що розподіл КІН, отриманий на різних сітках, є майже однаковим, тобто для опису розподілення КІН достатньо СЕ моделі, що апроксимує половину фронту напівеліптичної тріщини 12 елементами (рис. 4). Вибір трьох конфігурацій тріщин проводився із умови, що глибина тріщини не перевищує 1/4 товщини стінки лопатки.

На рис. 5 показані результати обчислення J-інтеграла вздовж фронту тріщини за допомогою модифікованого методу реакцій.

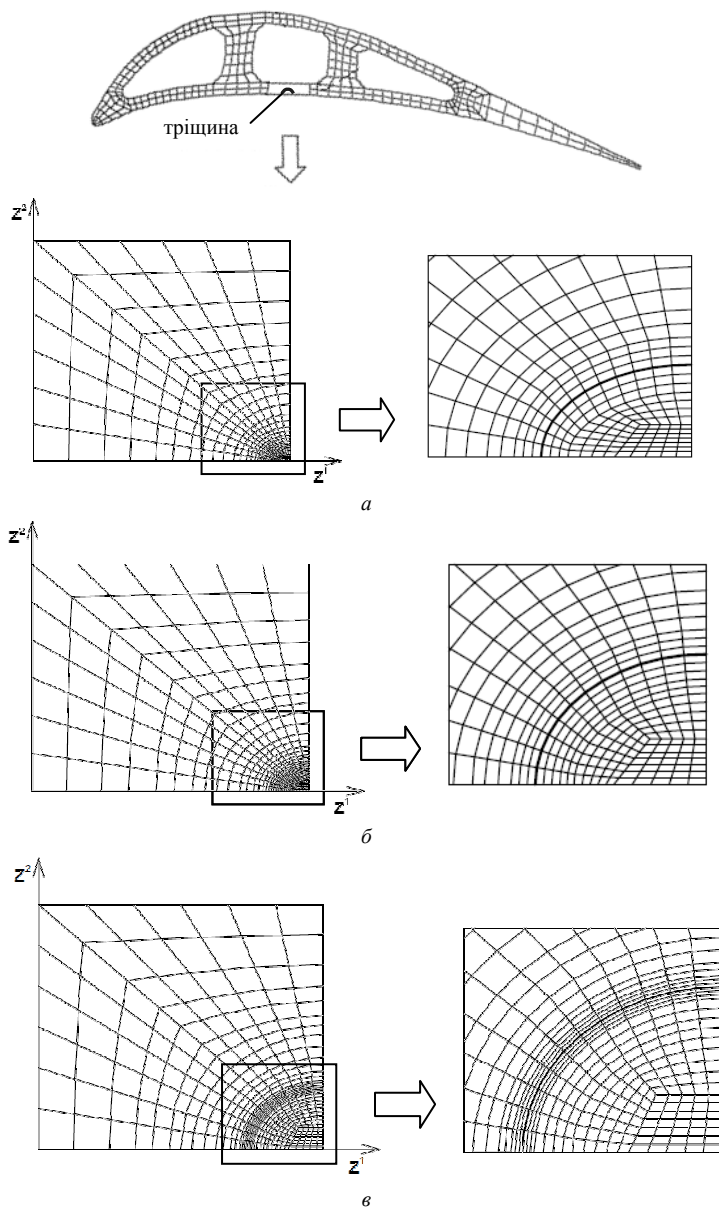


Рис. 4. Поперечний переріз лопатки та фрагмент дискретної моделі з розмірами напівосей тріщини: а – 0,5 та 0,3 мм; б – 0,63 та 0,47 мм; в – 1,53 та 1,3 мм

Порівняння остаточних результатів розрахунку показали, що застосування модифікованого методу реакцій забезпечує хорошу збіжність результатів навіть на одному кроці навантаження в порівнянні з покроковим завантаженням.

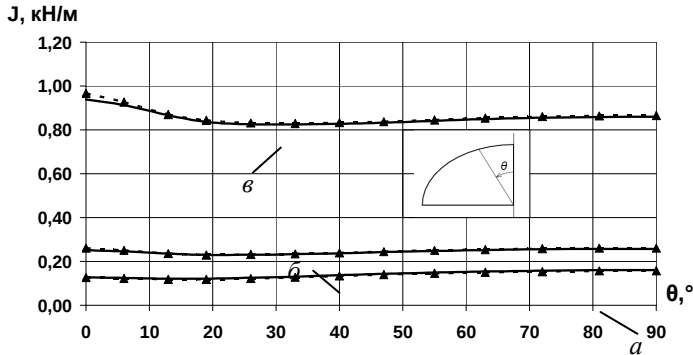


Рис. 5. Розподіл J-інтеграла вздовж фронту тріщини (суцільна лінія – пластична постановка; штрихова з трикутниками – пружна постановка) для напівеліптичних тріщин з розмірами напівосей: a – 0,5 та 0,3 мм; b – 0,63 та 0,47 мм; c – 1,53 та 1,3 мм

На рис. 6 показано залежність J-інтеграла як функції від навантаження P (кН) у вузлі розташованому в точці на малій напівосі для різних розмірів тріщин, що досліджувалися при розв'язанні даної задачі.

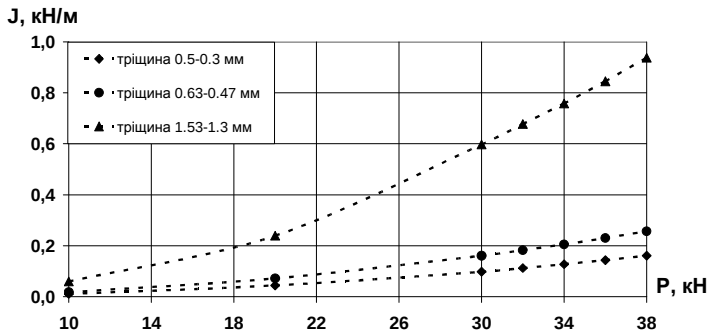


Рис. 6. Графік залежності J-інтеграла від величини прикладеного навантаження P , кН.

Максимальне значення J-інтеграла складає $J = 0,94$ кН/м, якому відповідає величина коефіцієнта інтенсивності напружень $K_I = 13,06$ МПа·м^{0,5} обчислена за формулою:

$$K_I = \sqrt{\frac{J_I \cdot E}{k}},$$

де модуль пружності $E = 1,7 \cdot 10^5$ МПа, $k = 1 - \nu^2$, коефіцієнт Пуассона $\nu = 0,25$.

Отримана величина K_I значно менша гранично допустимих критичних значень K_{IC} для розповсюджених марок сталі [6]. Так для сталі 20X13, отриманої із використанням термообробки $K_{IC} = 32$ МПа·м^{0,5}.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Баженов В.А., Гуляр О.І., Пискунов С.О., Сахаров О.С., Шкриль О.О. Особливості визначення J-інтеграла для дискретних моделей метода скінченних елементів// Опір матеріалів і теорія споруд, № 77, 2005, С.43–64
2. Баженов В.А., Гуляр О.І., Пискунов С.О., Сахаров О.С., Шкриль О.О., Богдан Д.В. Ефективність методу реакцій для призматичних тіл з поперечними тріщинами// Опір матеріалів і теорія споруд, № 87, 2011, С.3–12
3. Баженов В.А., Пискунов С.О., Сахаров О.С., Шкриль О.О. Богдан Д.В. Ефективність визначення J-інтеграла в задачах пружнопластичного деформування// Опір матеріалів і теорія споруд.– К.: КНУБА, 2010.- Вип. 86.- С. 3-17.
4. Напіваналітичний метод скінченних елементів в задачах руйнування просторових тіл: Монографія / В.А. Баженов, О.І. Гуляр, С.О. Пискунов, О.С. Сахаров. – К.: КНУБА, 2005. – 298 с.
5. Баженов В.А., Гуляр А.И., Пискунов С.О., Шкриль А.А. Определение ресурса лопатки газовой турбины в условиях ползучести на основе континуальной механики разрушения // Проблемы прочности. – 2006. – №4. – С. 87-93.
6. Механика разрушения и прочность материалов. Справочное пособие, в 4-х томах / под ред. Панасюка В.В. - Киев: Наукова думка, 1988: т. 3 Характеристики кратковременной трещиностойкости материалов и методы их определения / Ковчик С.Е., Морозов Е.М., 1988 - 436с.

Стаття надійшла до редакції 27.11.2012 р.

Баженов В.А., Гуляр А.И., Пискунов С.О., Шкриль А.А., Богдан Д.В.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ЛОПАТКИ ГАЗОВОЙ ТУРБИНЫ С ПОЛУЭЛЛИПТИЧЕСКОЙ ТРЕЩИНОЙ

Рассмотрена реализация методики определения J-интеграла методом реакций в призматических телах с поперечными трещинами на задаче по определению трещиностойкости лопатки газовой турбины.

Bazhenov V., Gulyar A., Piskunov S., Shkriľ A., Bogdan D.

DETERMINATION OF CRACK GROWTH RESISTANCE OF THE GAS TURBINE BLADE WITH A SEMI-ELLIPTICAL CRACK

An implementation of the procedure for J-integral estimation by the method of reactions in prismatic bodies with transversal cracks was considered for the problem of determining crack growth resistance of the gas turbine blade.