

13. Newman M.E.J. Power laws, Pareto distributions and Zipf's law // Contemporary Physics. – 2005. – V.46, No. 5. – P. 323-351.

ВИЗНАЧЕННЯ ВІБРОДІАГНОСТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ НАЯВНОСТІ ТРІЩИНИ В ПЕРІ ЛОПАТКИ З ДИХАЮЧОЮ ТРІЩИНОЮ НОРМАЛЬНОГО ВІДРИВУ НА ВИХІДНІЙ КРОМЦІ ПРИ ОСНОВНОМУ, СУПЕР- ТА СУБГАРМОНІЧНОМУ РЕЗОНАНСАХ

Є.О. Онищенко, А.П. Зіньковський, В.О. Круз

Інститут проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАН України,
Київ, Україна

Abstract. The paper presents the results of numerical investigations on the determination of mechanisms of influence of the parameters of the breathing fatigue crack of the opening mode on the flexural vibration characteristics of the aircraft gas-turbine engine blade airfoil portion. The relations between the amplitudes of dominant harmonics of displacements and accelerations at principal, super- and subharmonic resonances are considered as the vibration diagnostic factors indicating the presence of a crack.

Робочі лопатки турбомашин працюють в жорстких умовах термосилового навантаження та навколишнього середовища, які з часом можуть бути причиною виникнення різного типу поверхневих пошкоджень, таких як забоїни, ерозійні та корозійні язви, тощо [1, 2], а також тріщин втоми.

Для діагностування тріщин в елементах конструкцій використовують різні методи досліджень. Стосовно лопаток турбомашин широко використовуються вібродіагностичні методи, які базуються на встановленні взаємозв'язку між параметрами пошкодження і зміною характеристик коливань, зокрема частоти коливань [3 - 5]. Однак, як показано в [4, 6 - 8], більш чутливими показниками наявності тріщин невеликих глибин в стрижневих елементах конструкцій є параметри, пов'язані з виникненням гармонік, кратних змушувальній частоті коливань, а також зі збудженням нелінійних резонансів, які обумовлені почерговим відкриттям-закриттям берегів тріщини в процесі циклічного деформування об'єкту дослідження.

Мета роботи полягає у визначенні вібродіагностичних показників наявності дихаючої тріщини нормального відриву в пері лопатки авіаційного газотурбінного двигуна при основному, супер- та субгармонічному резонансах.

Об'єкт дослідження - лопатка турбіни середнього тиску авіаційного газотурбінного двигуна АГТД Д 18-Т (рис. 1, а), яка виготовлена з жароміцного сплаву ЖС 26 – ВІ. Його фізико-механічні характеристики такі: модуль пружності $E = 1,9 \cdot 10^{11}$ Па; густина $\rho = 8570$ кг/м³; коефіцієнт Пуассона $\mu = 0,3$; декремент коливань матеріалу $\delta = 0,003$.

Визначення характеристик вимушених коливань лопатки здійснювалося з використанням методу скінчених елементів (МСЕ). Відомо, що першим етапом в цьому випадку є створення СЕ моделі об'єкту дослідження. Зважаючи на те, що розв'язання таких задач для складних елементів конструкцій, як робочі лопатки, потребує великої кількості машинних ресурсів, в роботі розглядалася лише найменш закручена частина пера лопатки, довжина якої $L = 0,086$ м (рис. 1, б). Для побудови СЕ моделі пера лопатки були використані широко апробовані лінійні 8-ми вузлові елементи.

Тріщина нормального відриву була нанесена на вихідній кромці пера лопатки на відстані $x_T = 0,1L$ від торцевого перерізу лопатки зі сторони хвостовика (рис. 1, б). Вигляд тріщини в поперечному перерізі пера лопатки представлено на рис. 1, с більш темним кольором. При побудові моделі вона представляється у вигляді математичного розрізу, а

взаємне непроникнення її берегів забезпечується введенням поверхневих 4-х вузлових контактних елементів та розв'язанням контактної задачі.

Збудження коливань моделювали кінематичним переміщенням амплітудою $Q_0 = 10^{-5}$ м торцевих елементів пера лопатки вздовж осі Oy .

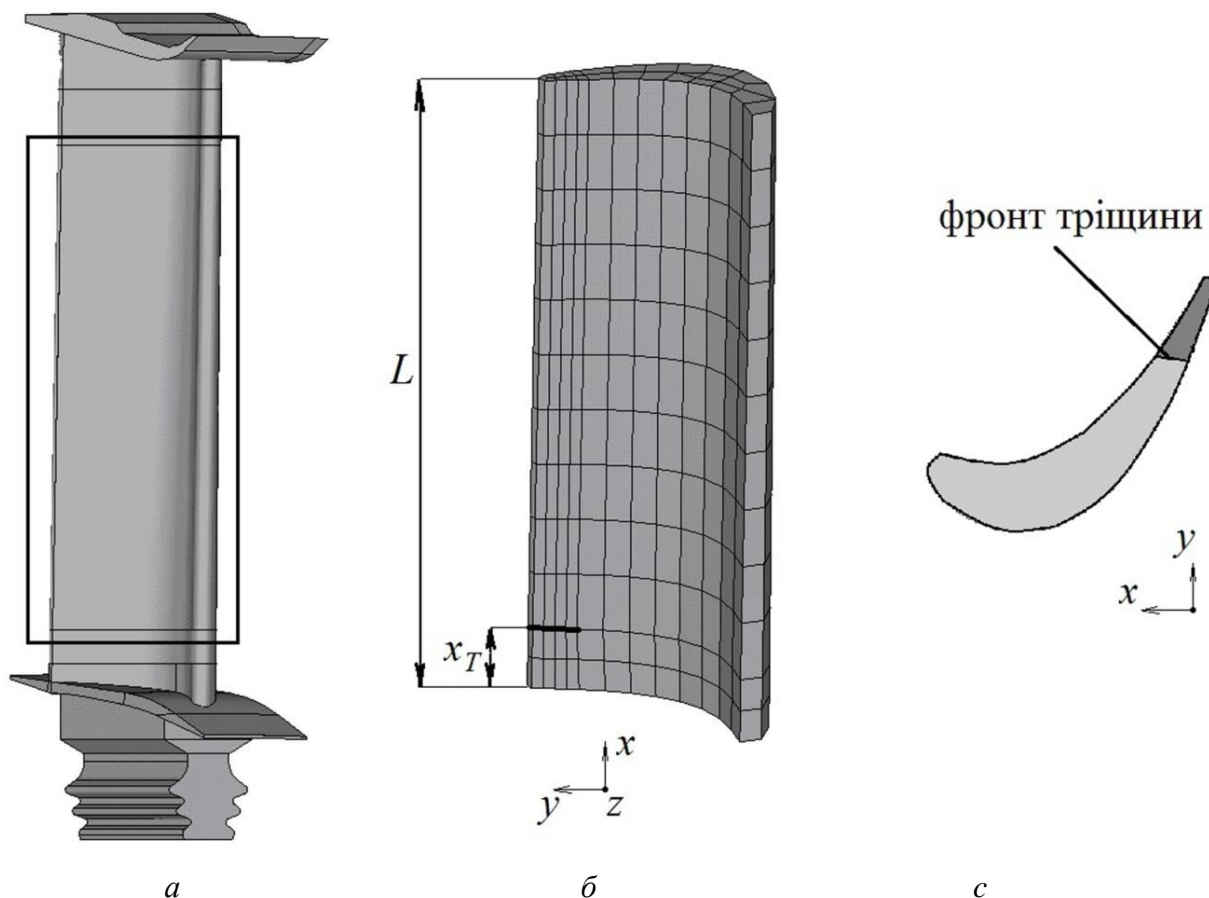


Рис. 1. Лопатка авіаційного газотурбінного двигуна АГТД Д 18-Т (а), СЕ модель досліджуваної частини пера лопатки (б) та її переріз з тріщиною (с)

Вимушені коливання СЕ моделі пера лопатки з дихаючою тріщиною описуються нелінійним диференціальним рівнянням:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [D]\{\dot{u}\} + [C]\{u\} = \{Q(t)\}, \quad (1)$$

де $[M]$, $[D]$ та $[C]$ - інерційна, дисипативна та матриця жорсткості відповідно; $\{u\}$, $\{\dot{u}\}$, $\{\ddot{u}\}$ - вектор-стовпчики переміщення, швидкості і пришвидшення; $\{Q(t)\}$ - вектор-стовпчик зовнішнього гармонічного навантаження.

В процесі коливань об'єкту дослідження внаслідок контактної взаємодії берегів тріщини матриця жорсткості $[C]$ змінюється в часі та знаходиться з рівняння:

$$[C]\{u\} - \{F\} - \{F_1\} = 0, \quad (2)$$

де $\{F\}$ - вектор вузлових сил, а $\{F_1\}$ - вектор вузлових зусиль, які виникають в процесі контактної взаємодії поверхонь тріщини.

Розв'язок нелінійного рівняння (1) здійснювався інтегруванням в часі з використанням методу Ньюмарка [7].

Було проведено комплекс обчислювальних експериментів для двох значень розмірів тріщини, яка займала 5 та 10% площі поперечного перерізу лопатки відповідно. За їх результатами були отримані залежності переміщення вільного кінця пера лопатки від часу. Для усталеного режиму коливань з використанням процедури швидкого перетворення Фур'є (FFT) проводився гармонічний аналіз, на основі якого визначався спектр амплітуд. Як вібродіагностичні показники наявності тріщини використовувалися відношення амплітуд домінуючих гармонік переміщень та пришвидшень при основному (\bar{A}_2 , \bar{A}_2^a), супер- ($\bar{A}_{2/1}$, $\bar{A}_{2/1}^a$) та субгармонічному ($\bar{A}_{1/2}$, $\bar{A}_{1/2}^a$) резонансах.

Розглянемо спочатку амплітудно-частотні характеристики (АЧХ) непошкодженого пера лопатки та при наявності тріщини при основному резонансі (рис. 2), де $\bar{\nu}$ - відношення частоти збудження до резонансної частоти непошкодженого пера, а \bar{A} - відношення амплітуди вимушених коливань до амплітуди коливань непошкодженого пера при основному резонансі.

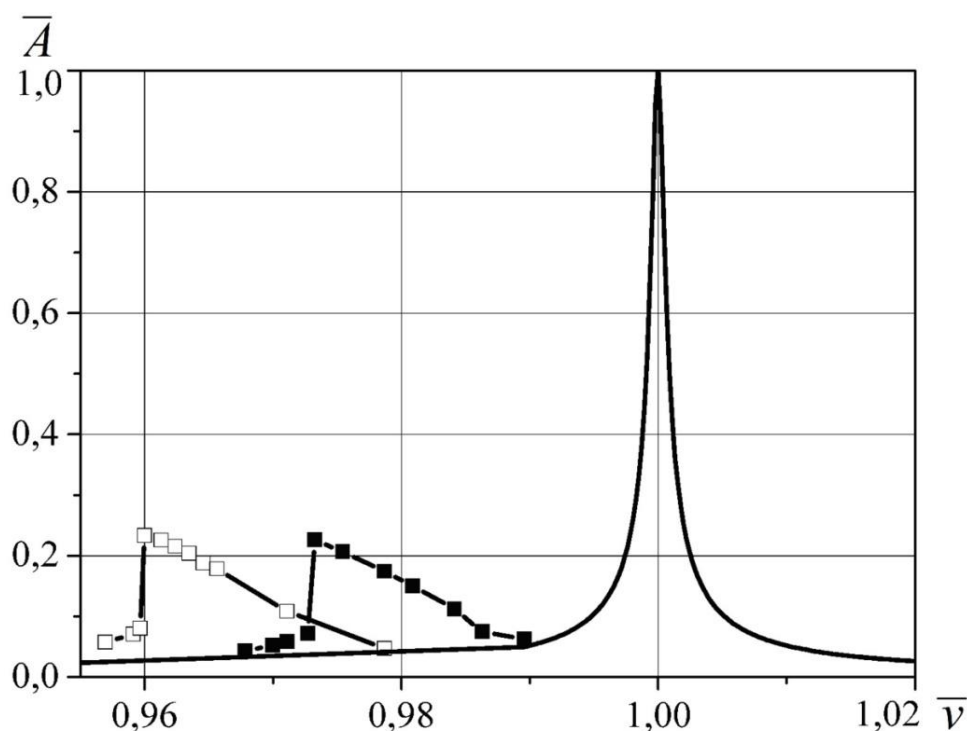


Рис. 2. Амплітудно-частотні характеристики при основному резонансі непошкодженого пера лопатки (штрихова лінія) та з тріщиною на вихідній її кромці, яка займає 5 (■) та 10% (□) площі поперечного перерізу лопатки

Як видно з представлених даних, ширина резонансного піку пера лопатки з тріщиною вибраних розмірів значно більша ніж для непошкодженого пера, що свідчить про суттєве збільшення розсіювання енергії в системі при наявності пошкодження.

Отримані АЧХ також дозволили встановити основну частоту коливань пера лопатки з тріщиною та визначити частоти супер- і субгармонічного резонансів. Знаючи вказані частоти коливань, були проведені обчислювальні експерименти з визначення вибраних вібродіагностичних показників наявності тріщини при основному, суб- та супергармонічному резонансах, значення яких наведені в табл. 1. Для порівняння в таблиці також приведено значення відносної зміни частоти коливань $\Delta\bar{\omega}_0 = 1 - \left(\frac{\omega_0}{\omega} \right)$ пера лопатки з

тріщиною, де ω і ω_0 - власні частоти коливань непошкодженого пера та пера з тріщиною відповідно.

Таблиця 1. Значення вібродіагностичних показників наявності тріщини в пері лопатки

Розмір тріщини	Основний резонанс			Супергармонічний резонанс		Субгармонічний резонанс	
	$\Delta\bar{\omega}_0$	\bar{A}_2	\bar{A}_2^a	$\bar{A}_{2/1}$	$\bar{A}_{2/1}^a$	$\bar{A}_{1/2}$	$\bar{A}_{1/2}^a$
5%	0,024	0,01337	0,05348	0,444	1,776	90	22,5
10%	0,04	0,01587	0,06348	0,727	2,91	102	25,5

Аналіз отриманих результатів розрахунків дозволяє зробити висновки, що найбільш ефективними показниками наявності тріщини при основному резонансі є параметри $\Delta\bar{\omega}_0$ та \bar{A}_2^a . Проте, навіть при достатньо великій тріщині, яка становить 10% площі поперечного перерізу лопатки, зазначені характеристики слабо чутливі для виявлення тріщин. Більш ефективними є вібродіагностичні показники при супер- та субгармонічному резонансі $\bar{A}_{2/1}^a$ та $\bar{A}_{1/2}$, що узгоджується з результатами чисельних та аналітичних розрахунків для стрижнів прямокутного та круглого поперечних перерізів [7, 8].

Висновки. На основі проведених чисельних досліджень було встановлено, що найбільш ефективними вібродіагностичними показниками наявності дихаючої тріщини нормального відриву є відношення амплітуд домінуючих гармонік пришвидшень при супер- та переміщень при субгармонічному резонансах, хоча їх обчислення і супроводжується значними труднощами. Перш за все обумовленими значними комп'ютерними ресурсами в зв'язку зі складною геометрією лопатки та наявністю пошкодження.

1. Bhagi L. K. Fractographic investigations of the failure of L-1 low pressure steam turbine blade / L. K. Bhagi, P. Gupta, V. Rastogi // Case Studies in Eng. Failure Analysis. – 2013. – 1, No. 2 – P. 72–78.

2. Poursaeidi E. Effect of natural frequencies on failure of R1 compressor blades / E. Poursaeidi, A. Babaei, M. R. Mohammadi Arhani, M. Arablu // Eng. Failure Analysis. – 2012. – № 25. – P. 304–315.

3. Зиньковский А. П. Влияние параметров локального поверхностного повреждения на собственные частоты колебаний конструктивных элементов / А. П. Зиньковский, И. Г. Токарь, В. А. Круц // Пробл. прочности. – 2015. - №2. – С. 5-11.

4. Zinkovskii A. P. Vibrations of structural elements with local surface damage / A. P. Zinkovskii, V. A. Kruts, E. A. Onyshchenko, I. G. Tokar // Proc. of The Twelve Int. Conf. on Vibration Engineering and Technology of Machinery (VETOMAC-XII). - Warsaw, Poland, 7-9 September, 2016. – P. 187-194.

5. Fu S. Fan blade crack diagnosis method study // S. Fu, Y. Gao // Advances in Mechanical Engineering. - 2016. – Vol. 8 (5). – P. 1-8.

6. Nandi A. Modelling of a beam with a breathing edge crack and some observations for crack detection / A. Nandi, S. Neogy // J. Vibr. Control. – 2002. – 8, No. 5. – P. 673-693.

7. Синенко Е. А. Влияние места приложения вынуждающей силы на амплитудный спектр изгибных колебаний стержня с дышащей трещиной / Е. А. Синенко, А. П. Зиньковский // Пробл. прочности. – 2015. - № 4. – С. 51–60.

8. Матвеев В. В. Вибродиагностические параметры наличия полу-эллиптической дышащей трещины в стержне круглого поперечного сечения при супер- и субгармоническом резонансах / В. В. Матвеев, Е. А. Онищенко // Пробл. прочности. – 2016. - № 2. – С. 5–19.