

ВІБРОДІАГНОСТИЧНІ ПОКАЗНИКИ НАЯВНОСТІ ЛОКАЛЬНИХ ПОВЕРХНЕВИХ ПОШКОДЖЕНЬ СТЕРЖНЕВИХ КОНСТРУКТИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

В.В. Матвєєв, А.П. Зіньковський, І.Г. Токар, В.О. Круц, Є.О. Онищенко

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

Abstract. The paper provides a summary of the existing experimental, analytical, and numerical methods of investigations using the vibration diagnostic parameters of the presence of local surface damages in the structural beam elements. The developed finite element models of the beam elements with open and breathing cracks are described. The results of numerical and analytical investigations have been presented to determine the influence of parameters of such cracks on the formation of vibrations of the selected objects.

В елементах конструкцій машин з різних причин, як технологічного так і експлуатаційного характеру, виникають локальні поверхневі пошкодження. Як приклад, можна навести робочі лопатки турбомашин. Вони експлуатуються в складних умовах під дією широкого спектру силових та температурних навантажень, які з часом призводять до виникнення різного роду їх пошкоджень. Найбільш поширеними з них є забоїни [1], що виникають в результаті потрапляння в проточну частину сторонніх предметів, корозійні та ерозійні язви [2], спричинені впливом агресивного середовища та високими температурами, втомні тріщини [3], які виникають в зонах максимальних напружень лопаток.

Своєчасне виявлення наявності таких пошкоджень в елементах конструкцій є актуальною науково-технічною задачею з точки зору забезпечення функціональної роботоздатності машини.

Ефективним засобом вирішення вказаної задачі є вібраційні (експериментальні, чисельні, аналітичні) методи, які відносяться до неруйнівних способів контролю технічного стану конструкцій і ґрунтуються на встановленні взаємозв'язку між параметрами пошкоджень і зміною характеристик коливань об'єктів дослідження.

Як правило, локальні поверхневі пошкодження моделюються відкритими тріщинами, береги яких не закриваються в процесі деформування об'єкту дослідження, а коливальна система залишається лінійною, та так званими дихаючими, береги яких почергово закриваються та відкриваються, що обумовлює нелінійність системи.

Метою даної роботи є огляд проведених в Інституті проблем міцності імені Г.С. Писаренка комплексних чисельних та аналітичних досліджень з визначення впливу параметрів локальних поверхневих пошкоджень на вібраційні показники їх наявності в стержневих елементах конструкцій.

Об'єкти досліджень та їх моделювання. Розглядалися стержні прямокутного та круглого поперечних перерізів. Для обчислювальних експериментів з вирішення сформульованої задачі використовувався метод скінченних елементів. Його першочерговим етапом, як відомо, є створення скінченноелементної моделі об'єкту дослідження. В даному випадку, для дослідження коливань обраних стержнів, була вибрана рівномірна їх розбивка на скінченні елементи зі згущенням сітки в околі пошкодження. Для створення скінченноелементної моделі використовувались 8- та 20-вузлові елементи.

Відкрита тріщина моделювалась прямокутним пазом постійної ширини [4]. Дихаюча тріщина представлялась як математичний розріз, а для взаємного непроникнення її берегів використовувались контактні елементи [5].

Достовірність розроблених скінченноелементних моделей стержнів з вибраними поверхневими пошкодженнями в подальшому підтверджена порівнянням результатів чисельного та експериментального визначення їх власних частот коливань.

Результати досліджень. За результатами виконаних чисельних досліджень коливань консольного стержня прямокутного поперечного перерізу з відкритою тріщиною у вигляді пазу встановлені закономірності впливу його глибини та положення по довжині на зміну власних частот згинних коливань [4,6]. Так, встановлено, що існує таке положення пошкодження по довжині стержня, так звана «точка переходу», для якого незалежно від форми коливань власні частоти пошкодженого і непошкодженого стержнів збігаються, що узгоджується з експериментальними даними, в тому числі і випробувань натурної робочої лопатки.

При зміщенні пошкодження до защемлення спостерігається зменшення власних частот коливань стержня в порівнянні з його непошкодженим станом, і тим інтенсивніше, чим більша глибина пошкодження та його наближення до защемлення. В разі наближення пазу до вільного кінця стержня його власні частоти стають дещо вищими ніж для непошкодженого.

Встановлені закономірності спектру власних коливань стержнів з поверхневою відкритою тріщиною необхідно врахувати при розробці методів діагностики її наявності.

Наявність дихаючої тріщини обумовлює виникнення нелінійних супер- і субгармонічних резонансів, спектр коливань яких складається з кратних гармонік, які відповідають частоті збудження відповідного резонансу та основній резонансній частоті коливань системи. В зв'язку з цим як вібродіагностичний показник наявності тріщини запропоновано використовувати відношення амплітуд домінуючих гармонік:

$\bar{A}_{2/1} = \frac{A_2}{A_1}$ при супергармонічному та $\bar{A}_{1/2} = \frac{A_1}{A_2}$ при субгармонічному резонансах, де A_1, A_2 - амплітуди коливань першої та другої гармонік при відповідному резонансі.

Чисельна методика визначення вібродіагностичних показників наявності тріщини при збудженні нелінійних резонансних режимів детально викладена в [5] і полягає в розв'язанні нелінійного матричного рівняння вимушених згинних коливань шляхом інтегрування в часі з використанням методу Ньюмарка та обробці отриманого рішення за допомогою процедури швидкого перетворення Фур'є.

В роботах [7-9] були отримані аналітичні формули для визначення відношення амплітуд домінуючих гармонік переміщень при супер- та субгармонічному резонансах через параметр нелінійності α , який визначається згідно з викладеною методикою в [7], та логарифмічний декремент коливань δ системи:

$$\bar{A}_{2/1} \cong 0,58 \frac{\alpha}{\delta} \lambda_{1j} \text{ при } \bar{A}_{2/1} \leq 0,9 \text{ і } \bar{A}_{2/1} \cong 0,725 \lambda_{1j} \sqrt{\frac{\alpha}{\delta}} \text{ при } \bar{A}_{2/1} > 0,9; \quad (1)$$

$$\bar{A}_{1/2} \cong \frac{4\alpha}{3\delta} \left(\lambda_{2j}^2 + \frac{1}{9} \left(\frac{8\alpha^2}{9\pi\delta} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (2)$$

де λ_{1j} - відношення амплітуди першої гармоніки j -ї форми коливань до повної амплітуди першої гармоніки, а λ_{2j} - повної амплітуди другої гармоніки до амплітуди другої гармоніки j -ї форми при вимушених коливаннях непошкодженого стержня на частотах супер- і субгармонічних резонансів відповідно.

З використанням запропонованих аналітичних та чисельних методик були проведені дослідження з визначення впливу дихаючої тріщини на зазначені вище вібродіагностичні показники при супер- та субгармонічному резонансах стержнів прямокутного [5,8,9] і круглого [10,11] поперечного перерізів, а також пера лопатки авіаційного газотурбінного двигуна [1, 12], за результатами яких встановлено:

- зі збільшенням глибини тріщини та її наближенням до защемлення стержня значення вібродіагностичного показника зростає незалежно від типу резонансу;

- значення вібродіагностичного показника наявності тріщини обернено пропорційне декременту коливань системи і при його великих значеннях збудження нелінійних резонансів практично унеможливується;

- величина вібродіагностичного показника залежить від місця прикладання змушувальної сили, а характер вказаної залежності визначається положенням тріщини. Так, при прикладанні сили в околі тріщини спостерігається мінімальне значення вібродіагностичного показника при супергармонічному і максимальне - при субгармонічному резонансах.

Таким чином, запропоновані методики досліджень коливань стержневих конструктивних елементів з локальним поверхневим пошкодженням типу відкритої чи дихаючої тріщини та встановлені закономірності впливу їх параметрів на характеристики коливань можуть слугувати основою для розробки надійних методів вібродіагностики.

Робота виконана в рамках робочих планів бюджетної теми 1.3.4.1707 «Встановлення закономірностей впливу на вібраційні характеристики неконсервативних механічних систем початкових конструктивно-технологічних дефектів та локальних експлуатаційних пошкоджень з урахуванням дії зовнішніх факторів різної природи» (№ ДР 0117U002231).

1. Kruts Vadym. Resonance vibrations formation features of regular systems with a breathing crack / Vadym Kruts, Anatoliy Zinkovskii, Yevheniia Onyshchenko // Proc. of the 23rd International Congress on Sound and Vibration. From Ancient to Modern Acoustic (Athens, Greece, 10-14 July, 2016) : Edited by prof. Konstantinos VOGIATZIS. – Mode of access : www.iiav.org/archives_icsv_last/2016_icsv23/content/papers/papers/full_paper_633_201605_18113640425.pdf.

2. 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.

3. Онищенко Є.О. Визначення вібродіагностичних показників наявності тріщини нормального відриву в пері лопатки при основному, супер- та субгармонічному резонансах / Є.О. Онищенко, А. П. Зіньковський, В. О. Круц // Пробл. міцності. - 2018. - № 3. - С. 5-13.

4. Зиньковский А.П. Влияние локального поверхностного повреждения на собственные частоты высших форм изгибных колебаний консольных стержней / А.П. Зиньковский, И.Г. Токарь // Пробл. міцності. – 2018. - № 4. – С. 52–61.

5. 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.

6. 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.

7. Матвеев В.В. К вопросу приближенного определения вибродиагностического параметра нелинейности упругого тела, обусловленной наличием дышащей трещины, при субгармоническом резонансе / В. В. Матвеев, О. Е. Богинич // Пробл. прочности. – 2012. – № 3. – С. 37–49.

8. Матвеев В.В. Влияние неупругого сопротивления на вибродиагностические параметры наличия закрывающейся трещины в упругом теле при супергармоническом резонансах / В. В. Матвеев, О. Е. Богинич // Пробл. прочности. – 2014. – № 4. – С. 21–35.

9. Матвеев В.В. Приближенное аналитическое определение вибродиагностических параметров наличия закрывающейся трещины в стержневых элементах при субгармоническом резонансе / В. В. Матвеев, А. П. Яковлев, О. Е. Богинич, Е. А. Синенко // Пробл. прочности. – 2014. – № 3. – С. 21–37.

10. 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.

11. Yevheniia Onyshchenko. Determination of vibrodiagnostic parameters of the presence of a semielliptical breathing crack in a bar of circular cross section [Electronic resource] / Yevheniia Onyshchenko, Vadym Kruts, Anatoliy Zinkovskii // Proc. of the 25rd International Congress on Sound and Vibration. Sound of Peace Bell (Hiroshima, Japan, 8-12 July, 2018) : Edited by ICSV25 Local Committee in Hiroshima. – Mode of access : https://www.iiav.org/archives_icsv_last/2018_icsv25/content/papers/papers/full_paper_1075_20180410124238581.pdf.

12. Онищенко Є.О. Визначення вібродіагностичних показників наявності тріщини нормального відриву в пері лопатки при основному, супер- та субгармонічному резонансах / Є.О. Онищенко, А. П. Зіньковський, В. О. Круц // Пробл. міцності. - 2018. - № 3. - С. 5-13.