



**Бовсуноський А. П.**  
д.т.н., професор

*Національний технічний  
університет України  
"Київський політехнічний  
інститут ім. Ігоря  
Сікорського"*

**Bovsunovsky A.**  
Doctor of Technical Sciences,  
Professor

*National Technical  
University of Ukraine, Igor  
Sikorsky Kyiv Polytechnic  
Institute*

**УДК 373:534.1:620.193**

**DOI: 10.37128/2306-8744-2021-3-1**

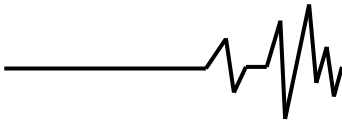
## **ВІБРАЦІЙНА ДІАГНОСТИКА ВТОМНИХ ПОШКОДЖЕНЬ У КОНСТРУКТИВНИХ ЕЛЕМЕНТАХ ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ НА СТАДІЇ РЕМОНТУ**

Вібродіагностика пошкоджень належать до класу неруйнівних методів, застосування яких зазвичай не вимагає багато часу. Однак основною проблемою вібродіагностики є відносно низька чутливість до критичного пошкодження типу втомної тріщини, яке виникає через тривале накопичення пластичної деформації. Для підвищення чутливості і надійності вібродіагностики пошкоджень були розглянуті два методи. Перший метод заснований на тому, що характерною особливістю коливань елементів конструкцій з втомної тріщиною є виникнення нелінійних резонансів (суб- і супергармонічних) і значна нелінійність вібраційного відгуку на цих резонансах. Другий – на тому, що в деяких випадках може спостерігатися досить помітне збільшення характеристики демпфірування коливань, викликане тріщиною. Аналітичні і експериментальні дослідження цих методів були виконані стосовно лопаток авіаційних газотурбінних двигунів. В результаті досліджень визначено інтенсивність зміни параметра супергармонічного резонансу і характеристик демпфірування коливань при різних параметрах тріщини. Крім того, розроблено експериментальні методики вібраційних випробувань лопаток турбін. Показано, що чутливість обох розглянутих методів вібродіагностики на кілька порядків вище, ніж чутливість традиційних методів, заснованих на зміні власних частот і форм коливань, і їх можна ефективно використовувати для діагностики лопаток на стадії ремонту двигуна. За інших рівних умов супергармонічний резонанс другого порядку демонструє більш високу чутливість до наявності тріщин, ніж характеристика демпфірування. Мінімальна розглянута в роботі тріщина площею 0,2% надійно фіксується за нелінійністю коливань при супергармонічному резонансі порядку 2/1. При цьому зміна характеристики демпфірування незначно перевищує похибку експерименту.

**Ключові слова:** діагностика пошкоджень; супергармонічний резонанс; характеристика демпфірування; авіаційний газотурбінний двигун; лопатки турбіни.

**Постановка проблеми.** Надійність газотурбінних двигунів визначаються насамперед працездатністю лопаток внаслідок їхньої значної механічної і термічної навантаженості. Пошкодження робочих лопаток в процесі експлуатації розглядаються як несправності, якщо вони усуваються відновлювальним ремонтом (наприклад, знос бандажних полиць і торців лопатки), або як

відмови, якщо лопатки руйнуються чи відбраковуються при ремонті двигуна (наприклад, тріщини, корозія, ерозія поверхні і т.п.) [1]. Основною проблемою вібраційної діагностики пошкоджень, добо діагностики, заснованої на зміні динамічних характеристик машин і конструкцій є відносно низька чутливість. Для вирішення цієї проблеми пропонується використання двох чутливих до



пошкодження типу тріщини втомі методи: метод вищих гармонік і метод, заснований на зміні характеристики демпфірування коливаний об'єкта діагностики.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В авіаційній промисловості України діє галузевий стандарт [2], який призначений для визначення механічних пошкоджень, допустимих при експлуатації. Стандарт нормує величини пошкоджень в елементах конструкції двигуна, які усуваються в результаті ремонту, а також ті, які не допускаються при експлуатації.

Застосування цього стандарту можливо лише в умовах, коли різні види пошкоджень з високою ймовірністю виявляються при експлуатації або ремонті двигуна. Оскільки встановлені стандартом пошкодження є відносно невеликими (їх глибина не повинна перевищувати 0,3 мм), виникає необхідність в чутливих методах діагностики пошкоджень елементів конструкцій газотурбінних двигунів. Разом з тим ці методи повинні бути придатні для дефектації значної кількості елементів конструкцій (таких, наприклад, як лопатки турбіни) за відносно обмежений час.

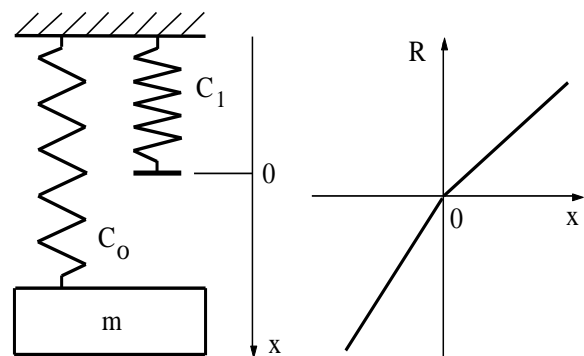
Цим умовам в найбільшій мірі відповідає діагностика пошкоджень, заснована на зміні параметрів вібрацій. Вібродіагностика пошкодження є інтегральним і неруйнівним методом діагностики конструкцій та їх елементів [3]. Основою вібраційної діагностики є той факт, що механічне пошкодження у вигляді локальної пластичної деформації і/або тріщини змінює жорсткість і демпфіруючу здатність конструктивних елементів. Ця зміна використовується як інформативна ознака пошкодження.

Найбільш дослідженою вібраційною характеристикою пошкодження є зміна власних частот коливаний [3]. Були спроби використовувати в якості характеристик пошкодження антирезонансні частоти [4], амплітуди вимушених коливаний [5], виникнення суб-і супергармонічних резонансів [6], а також зміна характеристик демпфірування [7].

Метод вищих гармонік [8] і метод, заснований на зміні характеристик демпфірування [9], останнім часом вважається найбільш перспективними для практичного використання. Ці методи при певних умовах мають високу чутливість до пошкодження типу тріщини [3, 7-8]. Їхня чутливість може бути на один-два порядки вище, ніж чутливість

вібраційної діагностики на основі зміни власних частот.

Найбільш поширеним видом пошкодження конструкцій, що зазнають динамічного навантаження, є тріщина втомі, яка зароджується в результаті тривалого накопичення пластичної деформації [3]. У задачах про коливання вона розглядається як тріщина, що періодично закривається. Найбільш проста модель конструкції з тріщиною, що закривається, представлена на рис. 1 [8]. Наявність тріщини втомі моделюється кусочно-лінійною характеристикою відновлювальної сили ( $R$ ). Перелом цієї функції характеризує момент зміни жорсткості системи при відкритті або закритті тріщини.



**Рис. 1.** Моделювання конструкції з тріщиною, що закривається.

Тут  $C=C_1+C_0$  – узагальнена жорсткість конструкції, коли тріщина закрыта;  $C_0$  – узагальнена жорсткість конструкції, коли тріщина відкрита.

Співвідношення жорсткостей  $C_0/C$  визначається експериментально або аналітично через власні частоти коливаний конструкції без тріщини ( $f$ ) і з тріщиною ( $f_c$ )

$$\frac{C_0}{C} = \left( \frac{2}{f_c/f} - 1 \right)^{-2}. \quad (1)$$

Характерною особливістю коливаний конструкції з тріщиною, що закривається, є прояв нелінійних ефектів, а саме поява супер- і субгармонічних резонансів (рис. 2) і суттєва нелінійність коливаний при цих резонансах [8].

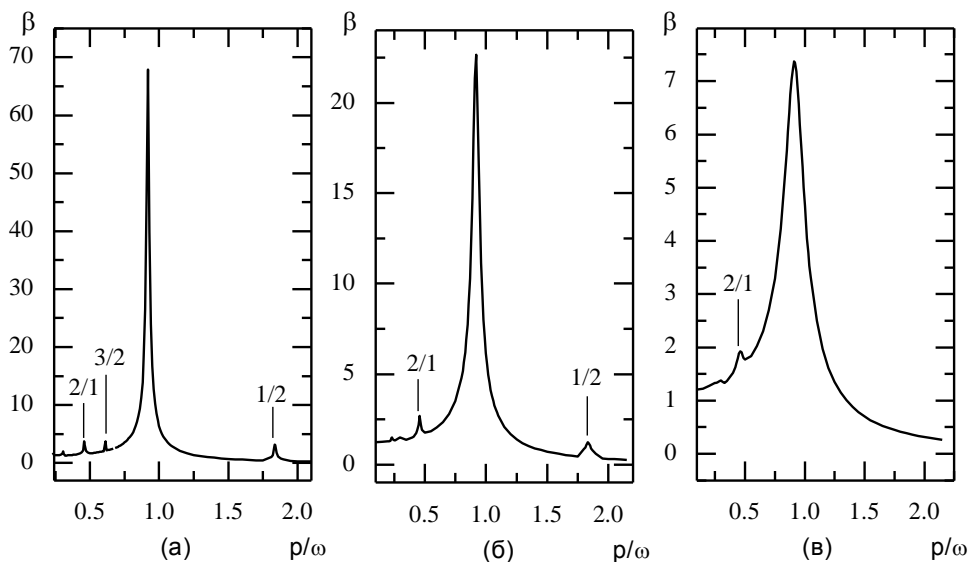
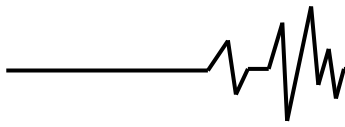


Рис. 2. Амплітудно-частотні характеристики конструкції з тріщиною, що закривається, при різних рівнях демпфірування: (а) –  $\delta=0,05$ ; (б) –  $\delta=0,15$ ; (в) –  $\delta=0,465$ .

Нелінійні ефекти мають високу чутливість до тріщини. Проблемою даного методу вібродіагностики є зниження його чутливості при збільшенні рівня демпфірування [8, 10]. Високий рівень демпфірування зменшує прояв нелінійних ефектів, що продемонстровано на рис. 2, де логарифмічний декремент коливань змінюється у діапазоні  $\delta=0,05\dots0,465$ . Крім того, існує проблема псевдо-суперрезонансу, який виникає внаслідок нелінійності змушувальної сили [10].

Тріщина істотно збільшує розсіювання енергії коливань внаслідок виникнення пластичної зони в околі її вершини. В цьому випадку енергія, що розсіюється в тріщині нормального відриву, віднесена до одиниці її довжини ( $\Delta\bar{U}_c$ ), може бути визначена як функція розмаху коефіцієнта інтенсивності напружень  $\Delta K_I$  [9]

$$\Delta\bar{U}_c = 8.634675 \times 10^{-5} \Delta K_I + 3.87315 \times 10^{-4} \Delta K_I^2 - 1.29826 \times 10^{-5} \Delta K_I^3 \quad (2)$$

У рівнянні (2) розмірність  $\Delta K_I$  є МПа $\sqrt{м}$ , а розмірність  $\Delta\bar{U}_c$  є Дж/м.

При певних умовах зміна характеристики демпфірування коливань конструкції може бути чутливою до наявності тріщини. Для оцінки ефективності демпфірування для надійної вібродіагностики пошкодження необхідно враховувати багато чинників, зокрема початковий рівень демпфірування, форму коливань, коефіцієнт гнучкості тощо. Загальний підхід до оцінки застосовності демпфірування для виявлення тріщин в конструкціях представлений в [7].

**Мета досліджень.** Продемонструвати ефективність методу вищих гармонік та

характеристик демпфірування для виявлення пошкоджень на ранніх стадіях в лопатках авіаційних газотурбінних двигунів, визначити умови, за яких ці методи є достатньо чутливими для надійного виявлення дефектів лопаток, а також розробити відповідну експериментальну методику виявлення пошкоджень лопаток газотурбінних двигунів на основі методу вищих гармонік та зміни характеристик демпфірування.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Об'єктом дослідження були робочі лопатки компресора низького тиску (титановий сплав ВТ-3-1) і турбіни (жароміцна легована сталь EI-961) газотурбінного авіаційного двигуна Д-36 [11]. Зовнішній вигляд лопаток показаний на рис. 3. Механічні властивості матеріалів наведені в табл. 1 (де  $E$  і  $\rho$  – модуль пружності і густина матеріалу лопаток, відповідно;  $\sigma_b$  – границя міцності,  $\sigma_{-1}$  – границя втоми).



Рис. 3. Зовнішній вигляд лопаток двигуна Д-36: (а) – сплав ВТ-3-1; (б) – сталь EI-961.



Передбачається, що вібродіагностика лопаток виконується на стадії ремонту двигуна при його повному розбиранні.

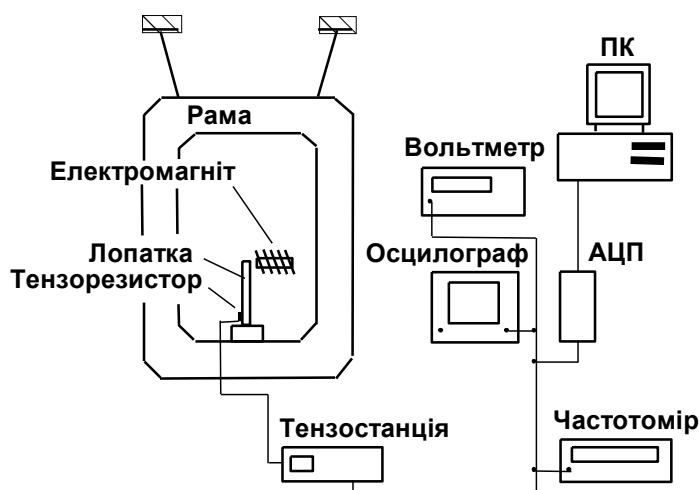
Таблиця 1.

**Механічні властивості матеріалу лопаток.**

| Матеріал лопаток | $E$ , ГПа | $\rho$ , кг/м <sup>3</sup> | $\sigma_b$ , МПа | $\sigma_{-1}$ , МПа |
|------------------|-----------|----------------------------|------------------|---------------------|
| BT-3-1           | 115       | 4500                       | 1000             | 480                 |
| EI-961           | 200       | 7800                       | 1080             | 510                 |

Для досліджень і відпрацювання методики діагностики було використано два види випробувальних установок. Визначення характеристики демпфірування лопаток, в якості якої використовувався логарифмічний декремент коливань, було виконано на експериментальній установці КД-1М [12]. Резонансні коливання збуджувались за допомогою електромагнітної системи, яка включала в себе генератор сигналів, підсилювач потужності і електромагніт, що взаємодіяв з лопаткою через закріплену на її кінці феромагнітну пластинку (рис. 4).

Логарифмічний декремент коливань визначали методом вільних згасаючих коливань. Експериментальна методика визначення характеристики демпфірування докладно описана в [12].

**Рис. 4. Блок-схема експериментальної установки КД-1М.**

Гармонічний аналіз коливань лопаток на частотах нелінійних резонансів, який є суттю методу вищих гармонік, виконувався експериментально на електродинамічному стенді TIRAvib (рис. 5). На цьому ж малюнку показана схема закріплення лопатки, система вимірювання деформації кореневого перетину лопатки і прискорення її кінця, а також система контролю прискорення вібростолу.

Крім підтримки амплітуди і частоти коливань лопатки, система контролю прискорення вібростолу використовувалася для запобігання можливості збудження псевдо-

суперрезонансу [10]. Для цього електричний сигнал, що подавався на вхід динаміка, спотворюється таким чином, щоб компенсувати його спотворення електромагнітом динаміка. Таким чином, на вібростолі формувалося гармонічне збудження лопатки, що запобігало виникненню псевдо-суперрезонансу. Перевірка відсутності псевдо-суперрезонансу здійснювалася на непошкоджених лопатках.

Вирощування тріщини здійснювалося в результаті циклічного навантаження лопаток на стенді TIRAvib при амплітуді максимальних напружень 250 МПа в кореновому перерізі.



Попередньо на зовнішній поверхні лопатки наносився надріз довжиною 0,8...1 мм з радіусом вершини приблизно 0,1 мм. Концентратор напружень розташовувався на відстані 10 мм від кореневого перетину. Довжина тріщини на поверхні відстежувалася і вимірювалася за допомогою оптичного мікроскопа.

В якості вібраційної ознаки пошкодження використовувався спектр коливань лопатки при супергармонічному резонансі порядку 2/1 (рис. 2), оскільки, як було показано в [15], субгармонічний резонанс має меншу чутливість до малих тріщин.

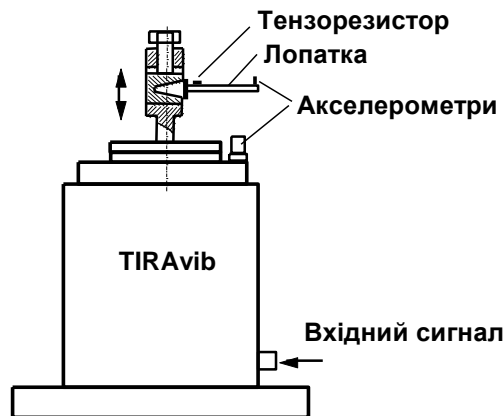


Рис. 5. Електродинамічний стенд TIRAvib.

Як було показано у вступі, амплітуди нелінійних резонансів є незначними в порівнянні з амплітудою основного резонанса. Тому вони малоприматні для цілей діагностики пошкодження. У той же час нелінійність коливань конструкції з тріщиною втомі при суб-і супергармонічних резонансах, яка проявляється у виникненні вищих гармонік в спектрі коливань, при певних умовах є значною. Одною з таких умов є відносно низький рівень демпфірування в механічній системі.

Лопатки авіаційних газотурбінних двигунів виготовляються зі сплавів, що мають низьку демпфіруючу здатність, яка в термінах логарифмічного декременту коливань не перевищує  $\delta < 0,003$  [13]. Як буде показано нижче, характеристика демпфірування коливань досліджених в роботі лопаток під час випробувань не перевищувала  $\delta < 0,0017$ , що забезпечувало можливість досягнення високої чутливості до пошкодження обома розглянутими методами.

В результаті численних досліджень [8, 14] було показано, що нелінійне в'язке і гістерезисне розсіяння енергії (останнє характерно для металевих матеріалів) призводить до виникнення в спектрі коливань непарних гармонік. У той же час перелом характеристики відновлювальної сили (рис. 1) призводить до виникнення парних гармонік, найбільша з яких - друга - є надійною ознакою наявності тріщини, що закривається.

Методика експерименту була наступною. Спочатку визначалась резонансна

частота коливань неушкодженої лопатки ( $f$ ). На цій частоті здійснювалось циклічне навантаження лопатки з амплітудою напруження в кореновому перерізі  $\sigma_a = 250$  МПа до появи мінімальної тріщини, яка фіксується мікроскопом. Після цього амплітуда коливань знижувалася до  $\sigma_a = 5$  МПа для запобігання підростання тріщини при вібродіагностиці і здійснювався пошук супергармонічного резонансу в околі частоти  $f_c/2$  ( $f_c$  – резонансна частота лопатки з тріщиною). Після знаходження цього резонансу проводився спектральний аналіз коливань. Наявність тріщини пов'язувалося з другої гармонікою спектра деформації і прискорення ( $A_2$ ).

Розміри тріщин в випробуваних лопатках наведені в табл. 2, де  $2c$  – довжина тріщини на поверхні;  $a$  – глибина тріщини;  $S_c$  – площа тріщини;  $S$  – площа поперечного перерізу лопатки в площині знаходження тріщини. У дужках показані розрахункові значення глибини тріщини.

Після досягнення тріщиною довжини на поверхні  $2c = 9,7$  і  $7,5$  мм, відповідно, лопатки були нагріті до температури  $800^\circ\text{C}$  для маркування тріщини, після чого вони були зруйновані в результаті циклічного деформування. Це дозволило достовірно визначити форму, глибину і площу тріщин (рис. 6).

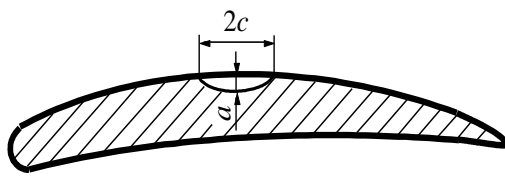


Рис. 6. Схема поперечного перерізу лопатки в площині з тріщиною.

Для порівняння в табл. 2 наведені результати спектрального аналізу коливань при основному і супергармонічному резонансах. Як

видно, нелінійність коливань при основному резонансі є вкрай низькою навіть при наявності досить небезпечної тріщини. У той же час при супергармонічному резонансі друга гармоніка в спектрі коливань ( $A_2$ ) навіть у разі мінімальної тріщини порівняна з амплітудою першої гармоніки ( $A_1$ ). Тому така значна нелінійність відносно легко фіксується. При цьому нелінійність спектру прискорення в кілька разів вище, ніж спектру деформації, що відповідає результатам модельних досліджень [8].

Таблиця 2.

Результати випробувань лопаток методом вищих гармонік.

| Матеріал лопаток | 2c, мм | a, мм | $S_c / S$ | $f_c / f$ | $A_2 / A_1$ |             |                           |             |
|------------------|--------|-------|-----------|-----------|-------------|-------------|---------------------------|-------------|
|                  |        |       |           |           | Резонанс    |             | Супергармонічний резонанс |             |
|                  |        |       |           |           | деформація  | прискорення | деформація                | прискорення |
| BT-3-1           | 1,6    | (0,3) | (0,004)   | 0,998     | -           | -           | 0,91                      | 1,87        |
|                  | 9,7    | 1,8   | 0,12      | 0,994     | 0,004       | 0,024       | 2,09                      | 4,31        |
| EI-961           | 1,3    | (0,3) | (0,002)   | 0,999     | -           | -           | 0,27                      | 0,71        |
|                  | 7,5    | 1,8   | 0,063     | 0,998     | 0,003       | 0,013       | 1,71                      | 3,27        |

Проблемою методу вищих гармонік є те, що супергармонічні резонанси є набагато вужчими порівняно з основним резонансом [16]. Розрахунки, виконані методом Ньюмарка за допомогою програмного забезпечення, описаного в [8], дозволили отримати частотну залежність другої гармоніки спектра прискорення лопаток на другому рівні ушкодження, тобто при  $2c=9,7$  і  $7,5$  мм, відповідно (рис. 7). В даному випадку гострота резонансних піків також обумовлена і низьким рівнем демпфірування в матеріалі лопаток. У розрахунках логарифмічний декремент сплаву BT-1-3 був прийнятий  $\delta=0,0017$ , а сплаву EI-961 –  $\delta=0,0013$ , що відповідає характеристикі демпфірування цих лопаток з зазначеними вище тріщинами при амплітуді  $\sigma_a=5$  МПа (рис. 8). Як видно з рис. 7, друга гармоніка спектра прискорення при супергармонічному резонансі лопатки зі сплаву EI-961 дещо вищий, ніж лопатки зі сплаву BT-3-1 незважаючи на той факт, що тріщина в ній є меншою. Свою роль тут зіграло більш низьке демпфірування, оскільки чим нижчим є рівень демпфірування в системі, тим чутливішим є метод вищих гармонік до наявності тріщини.

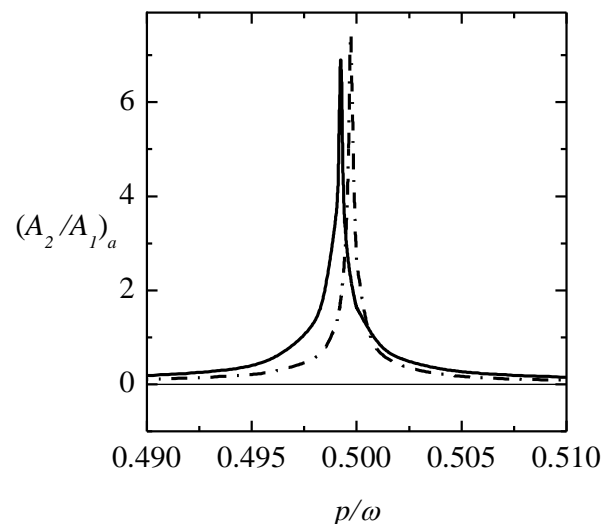


Рис. 7. Частотна залежність другої гармоніки спектра прискорення при супергармонічному резонансі порядку 2/1 лопатки с тріщиною: BT-3-1 ( $2c=9,7$  мм) – суцільна крива; EI-961 ( $2c=7,5$  мм) – штрихпунктирна крива.

Внаслідок гостроти резонансного піку точно налаштувати систему на супергармонічний резонанс вкрай складно, що



є головною причиною похибки експерименту. Незначне відхилення частоти збудження від супергармонічного резонансу призводить до різкого зниження нелінійності коливань в термінах другої гармоніки спектру. Саме з цієї причини результати розрахунків виявилися в 1,6 для лопатки зі сплаву VT-3-1 і в 2,3 для лопатки зі сплаву EI-961 рази вище, ніж дані експерименту. У той же час для вібродіагностики тріщин на якісному рівні, тобто для визначення наявності небезпечного пошкодження без необхідності точного визначення його параметрів, цей метод демонструє високу ефективність.

На рис. 8 показані амплітудні залежності логарифмічного декременту коливань для непошкоджених лопаток зі сплавів VT-3-1 і EI-961 і для двох рівнів пошкодження (табл. 2). Як видно, навіть перший рівень пошкодження призводить до збільшення характеристики демпфірування на 21...28% в діапазоні амплітуд напружень  $\sigma_a=5...20$  МПа. Така зміна характеристики демпфірування надійно виявляється, оскільки відносна похибка експериментальної методики не перевищувала 15%.

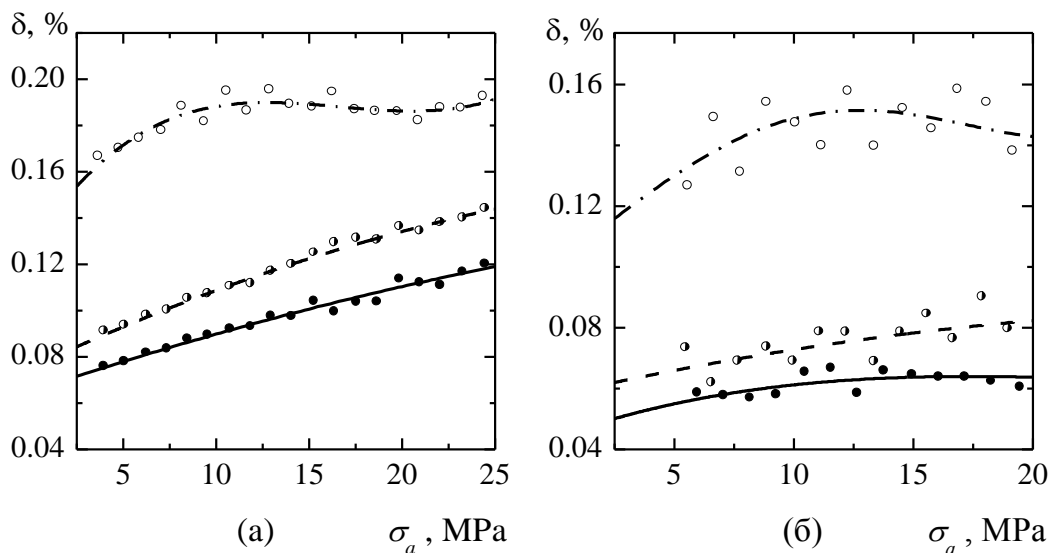


Рис. 8. Амплітудні залежності логарифмічного декременту коливань лопатки зі сплаву VT-3-1 (а) і EI-961 (б): без пошкодження - суцільна крива; з пошкодженням першого рівня - штрихова крива; з пошкодженням другого рівня - штрих-пунктирна крива.

Другий рівень пошкодження в тому ж діапазоні амплітуд напружень зумовлює збільшення декременту коливань лопаток зі сплаву VT-3-1 і EI-961 в 2,2...1,7 і 2,4...2,2 рази, відповідно. Таке збільшення характеристики демпфірування може бути зафіксовано навіть на експериментальному обладнанні з низькою добротністю.

Як було показано в [7], чутливість характеристики демпфірування до наявності тріщини істотно залежить від початкового рівня демпфірування коливань досліджуваного об'єкта: чим нижче цей рівень, тим вище чутливість характеристики демпфірування коливань до пошкодження типу тріщини втоми. В даному випадку початковий рівень демпфірування коливань лопаток був низьким, тому що вони виготовлені з низькодемпфіруючих сплавів, що і зумовило значне зростання характеристики демпфірування при виникненні навіть невеликої тріщини.

Таким чином, зміна характеристики

демпфірування таких об'єктів, як лопатки авіаційних газотурбінних двигунів, здатне надійно реагувати на виникнення тріщини втоми, площа якої складає всього 0,2% площі поперечного перерізу лопатки.

**Висновки.** Випробування лопаток, виконані при низькому рівні амплітуди максимальних напружень, показали високу чутливість другої гармоніки спектра деформації і прискорення до наявності тріщини при супергармонічному резонансі порядку 2/1. Ця чутливість перевищує таку при основному резонансі до двох порядків. Як при основному, так і при супергармонічному резонансі нелінійні спотворення процесу прискорення виявилися в кілька разів вище аналогічних спотворень процесу деформації. Це означає, що використання коливального процесу в термінах прискорення є набагато більш ефективним для цілей вібродіагностики пошкодження, ніж процес деформації.

Метод вищих гармонік вимагає значно більшого часу для випробування лопатки, ніж



для визначення характеристики демпфірування. Для високочастотних механічних систем, якими є досліджені лопатки, знаходження основного і, особливо, супергармонічного резонансу вимагає деякого часу. Крім того, гострий супергармонічний резонанс зумовлює помітну погіршеність при визначенні рівня нелінійності коливань пошкодженої лопатки. Разом з тим, метод вищих гармонік не вимагає відповідних початкових даних для неушкодженої лопатки.

За інших рівних умов супергармонічний резонанс другого порядку демонструє більш високу чутливість до наявності тріщин, ніж характеристика демпфірування. Мінімальна розглянута в роботі тріщина площею 0,2%, що відповідає стандарту, викликає нелінійність коливань при супергармонічному резонансі порядку 2/1, що легко фіксується. При цих же умовах зміна характеристики демпфірування коливань трохи перевищує похибку її експериментального визначення. Зміна власної частоти коливань лопатки в цьому випадку склала всього 0,09%, що є недостатнім для виявлення малих тріщин.

Сучасні тенденції підвищення надійності вібродіагностики пошкодження базуються на використанні кілька методів. Ця ідея може бути реалізована щодо розглянутих в роботі методів при розробці автоматизованої системи діагностики, заснованої на методі вищих гармонік і зміні характеристики демпфірування, що є предметів найближчих досліджень.

#### Список використаних джерел

1. Nalimov Yu. S. Analysis of damage of gas turbine engines blades. [Metal and Casting of Ukraine](#). 2014. № 12(259). P. 17-22.
2. OST-1-00304-79. Лопатки газотурбинных двигателей. Нормирование повреждения лопаток компрессоров от попадания посторонних предметов. 1979.
3. Bovsunovsky A., Surace C. Non-linearities in the vibrations of elastic structures with a closing crack: A state of the art review. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2015. 62-63. P. 129-148.
4. Afolabi D. An anti-resonance technique for detecting structural damage. *Proc. of the 5th IMAC*, London. 1987. P. 491-495.
5. Collins K.R., Plaut R.H., Wauer J. Free and forced longitudinal vibrations of a cantilevered bar with a crack. *ASME J. of Vibration, Acoustics, Stress, and Reliability in Design*. 1992. 114. P. 171-177.
6. Tsyfansky S.L., Beresnevich V.I. Non-linear vibration method for detection of fatigue cracks in aircraft wings. *J. of Sound and Vibration*. 2000. 236(1). P. 49-60.

7. Bovsunovsky A.P. Efficiency of crack detection based on damping characteristics. *Engineering Fracture Mechanics*. 2019. 214. P. 464-473.

8. Bovsunovskii A.P. Vibrations of a nonlinear mechanical system simulating a cracked body. *Strength of Materials*. 2001. 33(4). P. 370-379.

9. Bovsunovsky A.P. The mechanisms of energy dissipation in the non-propagating fatigue cracks in metallic materials. *Engineering fracture mechanics*. 2004. 71(16-17). P.2271-2281.

10. Bovsunovsky A.P., Surace C. Considerations regarding superharmonic vibrations of a cracked beam and the variation in damping caused by the presence of the crack. [Journal of Sound and Vibration](#). 2005. 288(4-5). P. 865-886.

11. [https://en.wikipedia.org/wiki/Lotarev\\_D-36](https://en.wikipedia.org/wiki/Lotarev_D-36).

12. Bovsunovsky A.P., Kratko A.G. The shape of mechanical hysteresis loops for metals under harmonic loading. *J. of Testing and Evaluation*. 1998. 26(1). P. 31-37.

13. Pisarenko G.S., Yakovlev A.P., Matveev V.V. *Vibration absorbing properties of structural materials (Handbook)*. Kiev: Naukova Dumka. 1971.

14. Bovsunovskii A.P. Numerical study of vibrations of a nonlinear mechanical system simulating a cracked body. *Strength of Materials*. 1999. 31(6). P. 571-581.

15. Bovsunovskii A.P., Surace C., Bovsunovskii O.A. The effect of damping and force application point on the non-linear dynamic behavior of a cracked beam at sub-and superresonance vibrations. *Strength of Materials*. 2006. 38. P. 492-497.

16. Bovsunovskii A.P. Comparative analysis of nonlinear resonances of a mechanical system with unsymmetrical piecewise characteristic of restoring force. *Strength of Materials*. 2007. 39. P. 159-169.

#### References

1. Nalimov Yu. S. (2014). Analysis of damage of gas turbine engines blades. [Metal and Casting of Ukraine](#), 12(259), 17-22.
2. OST-1-00304-79. Lopatki gasoturbinyh dvigateley. Normirovanie povregdenia lopatok kompressorov ot popadania postoronnyh predmetov, 1979.
3. Bovsunovsky A., Surace C. (2015). Non-linearities in the vibrations of elastic structures with a closing crack: A state of the art review. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 62-63, 129-148.
4. Afolabi D. (1987). An anti-resonance technique for detecting structural damage. *Proc. of the 5th IMAC*, London, 491-495.





5. Collins K.R., Plaut R.H., Wauer J. (1992). Free and forced longitudinal vibrations of a cantilevered bar with a crack. *ASME J. of Vibration, Acoustics, Stress, and Reliability in Design*, 114, 171-177.

6. Tsyfansky S.L., Beresnevich V.I. (2000). Non-linear vibration method for detection of fatigue cracks in aircraft wings. *J. of Sound and Vibration*, 236(1), 49-60.

7. Bovsunovsky A.P. (2019). Efficiency of crack detection based on damping characteristics. *Engineering Fracture Mechanics*, 214, 464–473.

8. Bovsunovskii A.P. (2001). Vibrations of a nonlinear mechanical system simulating a cracked body. *Strength of Materials*, 33(4), 370–379.

9. Bovsunovsky A.P. (2004). The mechanisms of energy dissipation in the non-propagating fatigue cracks in metallic materials. *Engineering fracture mechanics*, 71(16-17), 2271-2281.

10. Bovsunovsky A.P., Surace C. (2005). Considerations regarding superharmonic vibrations of a cracked beam and the variation in damping caused by the presence of the crack. [Journal of Sound and Vibration](#), 288(4-5), 865-886.

11. [https://en.wikipedia.org/wiki/Lotarev\\_D-36](https://en.wikipedia.org/wiki/Lotarev_D-36).

12. Bovsunovsky A.P., Kratko A.G. (1998). The shape of mechanical hysteresis loops for metals under harmonic loading. *J. of Testing and Evaluation*, 26(1), 31-37.

13. Pisarenko G.S., Yakovlev A.P., Matveev V.V. (1971). *Vibration absorbing properties of structural materials (Handbook)*. Kiev: Naukova Dumka.

14. Bovsunovskii A.P. (1999). Numerical study of vibrations of a nonlinear mechanical system simulating a cracked body. *Strength of Materials*, 31(6), 571–581.

15. Bovsunovskii A.P., Surace C., Bovsunovskii O.A. (2006). The effect of damping and force application point on the non-linear dynamic behavior of a cracked beam at sub-and superresonance vibrations. *Strength of Materials*, 38, 492–497.

16. Bovsunovskii A.P. (2007). Comparative analysis of nonlinear resonances of a mechanical system with unsymmetrical piecewise characteristic of restoring force. *Strength of Materials*, 39, 159–169.

#### VIBRATION DIAGNOSTICS OF FATIGUE DAMAGE IN STRUCTURAL ELEMENTS OF GAS TURBINE ENGINES AT THE REPAIR STAGE

*Vibration diagnostics of damage belongs to the class of non-destructive methods, which usually do not take long time. However, the main*

*problem of vibration diagnostics is relatively low sensitivity to the critical damage of fatigue crack type, which arises because of long time accumulation of plastic deformation. To improve the sensitivity and reliability of vibration diagnostics of damage two methods were considered. First method was based on the fact, that a characteristic feature of vibrations of structural elements with fatigue crack is the occurrence of non-linear resonances (sub- and super-harmonic) and significant non-linearity of vibration response at these resonances. Second one – on the fact, that quite noticeable in certain cases increase of damping characteristic caused by a crack can be observed. Analytical and experimental studies of these methods were carried out as applied to the blades of aircraft gas turbine engines. As a result of the studies, the intensity of change in parameter of superharmonic resonance and in damping characteristics at different parameters of crack was determined. Besides, the experimental techniques for vibration testing of turbine blades were developed. There was demonstrated, that the sensitivity of both considered methods of vibration diagnostics is several orders of magnitude higher than the sensitivity of conventional methods based on the change in natural frequencies and mode shapes, and they can be effectively used for the diagnostics of blades on the stage of engine repair. All the other conditions being equal, second-order superharmonic resonance demonstrates a higher sensitivity to the presence of cracks than the damping characteristic. The smallest crack with an area of 0.2% considered in the work causes a reliably recorded non-linearity of vibration response at superharmonic resonance of order of 2/1. At this the change of damping characteristic slightly exceeds the error of experiment.*

**Keywords:** *Damage detection; superharmonic resonance; damping characteristic; aircraft gas turbine engine; blades of turbine.*

#### ВИБРАЦИОННАЯ ДИАГНОСТИКА УСТАЛОСТНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ В КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НА СТАДИИ РЕМОНТА

*Вибродиагностика повреждений относится к классу неразрушающих методов, которые обычно не занимают много времени. Однако основной проблемой вибродиагностики является относительно низкая чувствительность к критическому повреждению типа усталостной трещины, которое возникает из-за длительного накопления пластической деформации. Для повышения чувствительности и надежности*



вибродиагностики поврежденных были рассмотрены два метода. Первый метод был основан на том, что характерной особенностью колебаний элементов конструкций с усталостной трещиной является возникновение нелинейных резонансов (суб- и супергармонических) и значительная нелинейность вибрационного отклика на этих резонансах. Второй - на том, что в некоторых случаях может наблюдаться довольно заметное увеличение характеристики демпфирования колебаний, вызванное трещиной. Аналитические и экспериментальные исследования этих методов проводились применительно к лопаткам авиационных газотурбинных двигателей. В результате исследований определена интенсивность изменения параметра супергармонического резонанса и демпфирующих характеристик при различных параметрах трещины. Кроме того, разработаны экспериментальные методики вибрационных испытаний лопаток турбин. Показано, что чувствительность обоих

рассмотренных методов вибродиагностики на несколько порядков выше, чем чувствительность традиционных методов, основанных на изменении собственных частот и форм колебаний, и их можно эффективно использовать для диагностики лопаток на стадии ремонта двигателя. При прочих равных условиях суперрезонанс второго порядка показывает более высокую чувствительность к наличию трещин, чем характеристика демпфирования. Минимальная рассмотренная в работе трещина площадью 0,2% поперечного сечения вызывает надежно фиксируемую нелинейность колебаний при супергармоническом резонансе порядка 2/1. При этом изменение характеристики демпфирования, незначительно превышает погрешность эксперимента.

**Ключевые слова:** диагностика поврежденных; супергармонический резонанс; характеристика демпфирования; авиационный газотурбинный двигатель; лопатки турбины.

#### Відомості про автора

**Бовсуновський Анатолій Петрович** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри теплоенергетики Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського", 03056, пр-т Перемоги 37, Київ, Україна; e-mail: [apbovsunovsky@gmail.com](mailto:apbovsunovsky@gmail.com)).

**Бовсуновский Анатолий Петрович** – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры теплоэнергетики Национального технического университета Украины "Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского", 03056, пр-т Победы 37, Киев, Украина; e-mail: [apbovsunovsky@gmail.com](mailto:apbovsunovsky@gmail.com)).

**Bovsunovsky Anatoliy Petrovich** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Heat Power Engineering of National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute ", 03056, 37 Peremohy Ave., Kyiv, Ukraine; e-mail: [apbovsunovsky@gmail.com](mailto:apbovsunovsky@gmail.com)).