

## ДОСЛІДЖЕННЯ ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ЛОПАТОК МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЇ СПЕКЛ-ФОТОГРАФІЇ

**О.Г. Руденко**, кандидат технічних наук, доцент

Миколаївський державний аграрний університет

**Ю.Г. Золотий**, завідувач лабораторії лазерних засобів вимірювань  
Національний університет кораблебудування ім. адмірала Макарова

**І.Ю. Жук**, ст. викладач

Чорноморський державний університет ім. Петра Могили

**Д.В. Довгань**, аспірант

Національний університет кораблебудування ім. адмірала Макарова

*Методом спекл-фотографії проведені дослідження деформованого стану поверхні вібруючої лопатки ГТД на основних резонансних формах коливань. Для оцінки достовірності результатів проведено порівняння отриманих даних з результатами електротензометрування.*

**Ключові слова:** спекл-фотографія, лопатка ГТД, власні частоти та форми коливань.

**Постановка проблеми.** Підвищення ефективності сучасних турбомашин супроводжується підвищенням навантажень на їх деталі. В газотурбінних двигунах (ГТД), компресорах, вентиляторах в найбільш критичних умовах працюють робочі лопатки. Статичне навантаження лопатки в полі відцентрових сил, нерівномірність газового потоку, який призводить до її резонансної вібрації, є причиною значної частини аварій лопаткового апарату турбомашин. Тому визначення динамічного напружено-деформованого стану (НДС) робочих лопаток є обов'язковим як при натурних, так і при стендових віброрезонансних випробовуваннях [1].

Експериментально визначити напруження матеріалу лопатки в умовах працюючої машини можна тільки електротензографіями. Але обмеження, що накладаються на мінімальні розміри тензодатчиків та максимальну кількість каналів передачі інформації, вимагають розмістити тензодатчики на лопатці в зонах локалізації максимальних вібродеформацій. Для цього необхідно провести попередні дослідження з визначення поля вібропереміщень та деформацій на всій поверхні пера лопатки для основних власних форм коливань.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Визначення амплітуд коливань та НДС в окремих точках вібруючої лопатки проводять за допомогою різноманітних датчиків: механічних, акустичних, оптичних, ємнісних, п'єзоелектричних, трансформаторних, електрорезисторних [2]. Але відновлення за результатами таких вимірювань форми коливань і обчислення поля вібродеформацій по всій поверхні лопатки в цілому являє собою дуже трудомісткий процес. Тому сьогодні для розв'язку цих задач все ширше використовують інтерферометричні методи, такі як метод голографічної і спекл-інтерферометрії [3].

Голографічний інтерферометр дійсно дозволяє визначити поле переміщень по поверхні вібруючого об'єкту і за цими даними провести обчислення вібродеформацій. Але реалізація трьохкомпонентного голографічного інтерферометра та процедура розшифровки інтерферограм є достатньо складною [4].

Тому в роботі [5] авторами запропоновано методику експериментального визначення напружено-деформованого стану поверхні твердого тіла за допомогою спекл-фотографії, описано створений лазерний стенд та апаратурний комплекс, що забезпечує реалізацію розробленої методики. У роботі [6] проведено тестування цієї методики при статичному згині консольного бруса та віброрезонансному навантаженні прямокутної пластини, жорстко закріпленої по одному краю. Доведено доцільність і ефективність використання створеного стенду та розробленої методики для визначення напружено-деформованого стану елементів конструкцій.

**Метою даної роботи** є дослідження методом спекл-фотографії деформованого стану поверхні вібруючої лопатки ГТД на основних резонансних формах коливань і перевірка достовірності отриманих даних.

**Визначення деформованого стану лопатки ГТД.** На лазерному стенді досліджувана лопатка жорстко закріплювалася в кореновому перерізі за допомогою спеціального затискного пристрою з вмонтованим в нього п'єзовібробуджувачем (рис. 1). Оптичну схему установки, її

апаратурне забезпечення та методика проведення експерименту наведено у роботі [5].

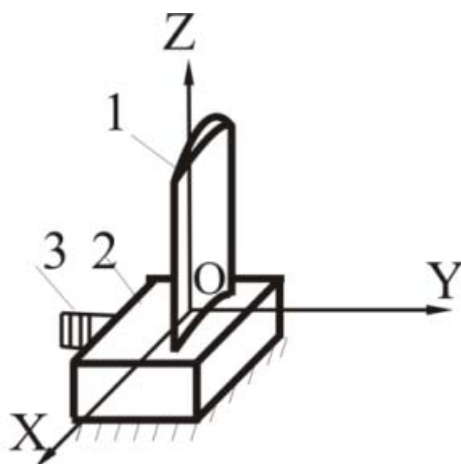


Рис.1. Лопатка в затискному пристрої. 1-лопатка ГТД; 2-затискний пристрій ; 3-віброзбуджувач

При вібрації лопатки найбільші значення приймає компонента вібропереміщення  $i$ , звичайно, визначається з найбільшою точністю. Тому для визначення деформованого стану її поверхні доцільно застосувати диференціальне рівняння зігнутої осі балки [7]. З нього витікає, що лінійну деформацію вздовж осі балки на її поверхні можна визначити з виразу:

$$\varepsilon_z = -\frac{h}{2} \frac{d^2}{dz^2} (U_y(z))', \quad (1)$$

де  $\frac{h}{2}$  – відстань від поверхні до осі.

Лопатку у першому наближенні можна вважати балкою зі змінною товщиною як вздовж осі  $Z$ , так і вздовж осі  $X$  [8]. Але у випадку сильно закручених лопаток співвідношення (1) дає значні похибки. Для такого типу лопаток необхідно знати розташування нейтральної осі. Положення нейтральної осі відносно осі  $X$  будемо характеризувати кутом  $\gamma$ . Через точку поверхні лопатки проведемо осі  $X_2$  та  $y_2$  (рис. 2), де вісь  $x_2$  паралельна нейтральній осі, вісь  $y_2$  – до неї перпендикулярна.

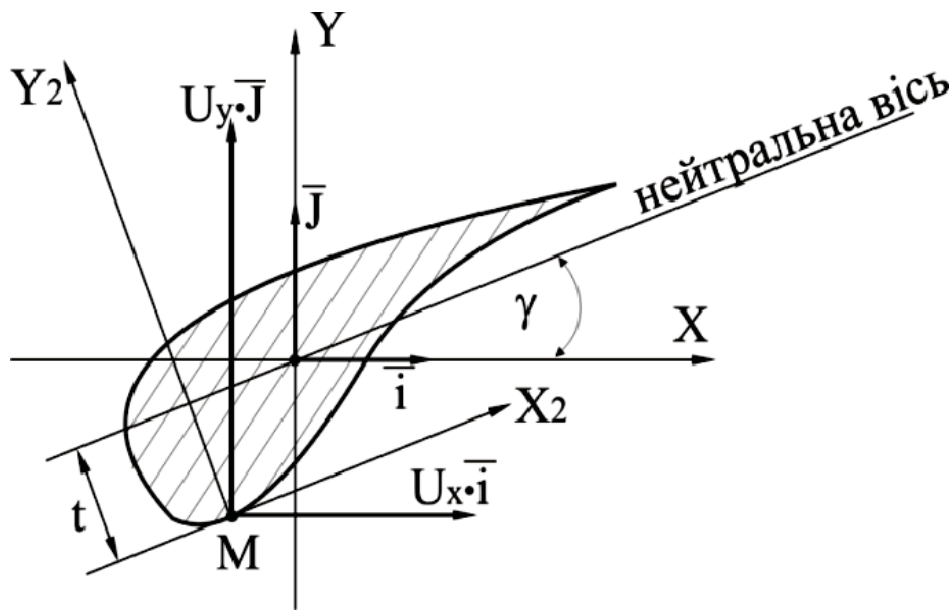


Рис.2. Визначення розташування нейтральної осі лопатки

Переміщення точки  $M$  в площині, перпендикулярній осі  $z$ , буде :

$$\vec{U}_2 = U_x \vec{i} + U_y \vec{j}. \quad (2)$$

Продиференціювавши двічі по  $z$  вираз (2) (кут  $\gamma$ , як і компоненти переміщень  $U_x$  та  $U_y$ , є функціями координати  $z$ ) і використовуючи формулу (1), отримаємо співвідношення для визначення деформації  $\epsilon_z$  на поверхні лопатки.

$$\epsilon_z = t \left[ \left( \frac{d^2 U_y}{dz^2} \cos \gamma - \frac{d^2 U_x}{dz^2} \sin \gamma \right) - 2\gamma'_z \left( \frac{dU_y}{dz} \sin \gamma + \frac{dU_x}{dz} \cos \gamma \right) + \left( \gamma'_z \right)^2 (U_x \sin \gamma - U_y \cos \gamma) - \gamma''_z (U_y \sin \gamma + U_x \cos \gamma) \right], \quad (3)$$

де  $t$  – відстань від точки  $M$  до нейтральної осі;

$\gamma'_z, \gamma''_z$  – відповідно перша і друга похідна від кута  $\gamma$  по координаті  $z$ .

Розглянемо частинні випадки:

1. Нехай  $\gamma=0$ , тоді

$$\epsilon_z = t \frac{d^2 U_y}{dz^2}. \quad (4)$$

2. Нехай  $\gamma = \text{const}$ , тоді (5)

$$\varepsilon_z = t \left( \frac{d^2 U_y}{dz^2} \cos \gamma - \frac{d^2 U_x}{dz^2} \sin \gamma \right). \quad (5)$$

3. Нехай між кутом  $\gamma$  і координатою  $z$  існує лінійна залежність  $\gamma = \gamma_0 + kz$ , тоді  $\gamma'_z = k$ ,  $(\gamma'_z)^2 = k^2$ ,  $\gamma'_z z^{\uparrow 0} = 0$ .

Враховуючи це, отримуємо:

$$\varepsilon_z = t \left( \frac{d^2 U_y}{dz^2} \cos \gamma - \frac{d^2 U_x}{dz^2} \sin \gamma \right) - 2k \left( \frac{dU_y}{dz} \sin \gamma + \frac{dU_x}{dz} \cos \gamma \right) + k^2 (U_x \sin \gamma - U_y \cos \gamma). \quad (6)$$

Для практичного застосування виразів (4) – (6) значення переміщень  $U_x$  та  $U_y$  згладжувалися поліномом четвертого порядку, за допомогою якого аналітично визначались перша і друга похідні. Аналогічно знайдено вирази для  $\gamma'_z$ , і  $\gamma^{\uparrow 0}$ .

На рис. 3 представлено результати визначення за даною методикою лінійних деформацій пера лопатки ГТД на першій згинній (а), першій крутильній (б), другій згинній (в) та другій крутильній (г) формах коливань.

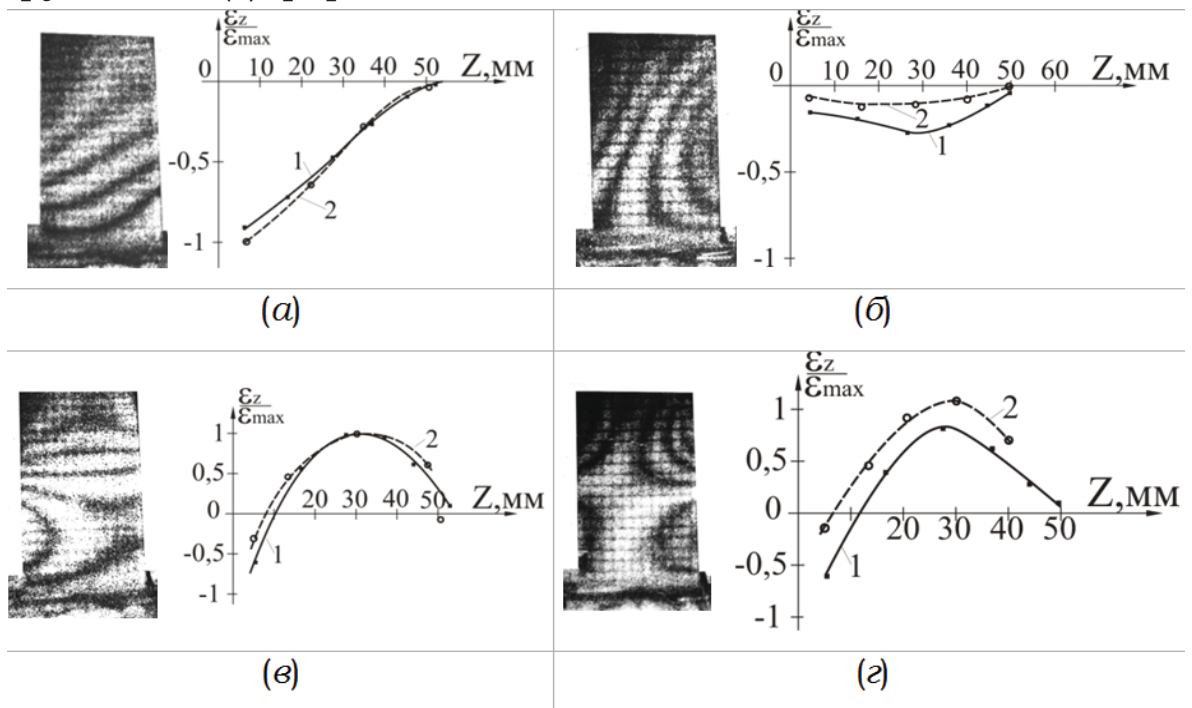


Рис.3. Розподіл деформацій вздовж вхідної кромки лопатки:  
 а – перша згинна форма; б – перша крутильна форма;  
 в – друга згинна форма; г – друга крутильна форма.

Відфільтровані вздовж осі  $z$  зображення лопатки покриті смугами, яким відповідають однакові значення перших похід-

них  $\frac{dU_y}{dz}$ , тобто кутів повороту пера в вертикальній площині.

Для отримання чисельних даних обробка розфокусованих спекл-фотографій проводилася поточковим скануванням.

На графіках суцільною лінією показано обчислений за цими даними розподіл нормованих значень деформацій вздовж вхідної кромки лопатки. Для порівняння пунктирною лінією наведено дані електротензометрування.

**Висновок.** Співпадіння форми епюр і положень екстремальних точок свідчить про достовірність результатів.

Література:

1. Жирицкий Г.С. Конструкция и расчёт на прочность деталей паровых и газовых турбин / Жирицкий Г.С., Стрункин В.А. — М. : Машиностроение, 1968. — 519 с.
2. Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений : справочное пособие / под ред. Касаткина Б.С. — К. : Наукова думка, 1981. — 584 с.
3. Р. Джоунс. Голографическая и спекл-интерферометрия / Р. Джоунс, К. Уайкс. — М. : Мир, 1986. — 327 с.
4. Кобаяси А. Экспериментальная механика. Книга 1 / А. Кобаяси. — М. : Мир, 1990. — 615 с.
5. Руденко О.Г. Визначення напружень деформованих тіл за допомогою спекл-фотографії / Руденко О.Г., Золотий Ю.Г., Жук І.Ю. // Вісник аграрної науки Причорномор'я. — 2009. — Вип. 4(51). — С. 251 — 257.
6. Руденко О.Г. Оцінка адекватності методики експериментального визначення деформованого стану поверхні твердих тіл методом лазерної спекл-фотографії / Руденко О.Г., Золотий Ю.Г., Жук І.Ю. // Вісник аграрної науки Причорномор'я. — 2011. — Вип. 1(57). — С. 213–217.
7. Писаренко Г. С. Сопротивление материалов / Писаренко Г. С., Агарев В. А., Квитка А.Л. — К. : Вища школа, 1973. — 670 с.
8. Селезнёв В. Г. Определение деформаций в кромках компрессорных лопаток по их голографическим интерферограммам / Селезнёв В. Г — в кн. Оптическая голография и её применение. — Л. : Наука, 1977. — С. 50—54.