

УДК 539.3

ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕНЬ ДЕФОРМОВАНИХ ТІЛ ЗА ДОПОМОГОЮ СПЕКЛ-ФОТОГРАФІЇ

О.Г.Руденко, кандидат технічних наук

Миколаївський державний аграрний університет

Ю.Г.Золотий, старший викладач

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

І.Ю.Жук, викладач

Чорноморський державний університет імені Петра Могили

Проаналізовано можливість і доцільність використання спекл-фотографії для експериментального визначення амплітуд коливань точок поверхні твердих тіл і їх деформованого стану при резонансній вібрації. Описано створений лазерний стенд та апаратурний стробокомплекс, що забезпечує реалізацію розробленої методики.

Ключові слова: напруження, деформації, спекл-фотографія, вібрація, резонанс.

Постановка проблеми. Характерні для сучасного машинобудування збільшення потужностей силових агрегатів та питомих навантажень на їх робочі елементи, використання форсованих режимів роботи при критичних швидкостях обертання роторів визначають нагальність проблем динамічної міцності елементів конструкцій. Такими є, наприклад, задачі визначення динамічних параметрів та напружено-деформованого стану (НДС) лопаткового апарату компресорів, газотурбінних двигунів (ГТД), вентиляторів при резонансній вібрації. Теоретичному розв'язку цих задач присвячено велику кількість статей та комп'ютерних програм. Але не менш важливими є розробки експериментальних методів та методик дослідження цих явищ, особливо при доводці турбомашини або діагностиці аварій лопаткового апарату. Суттєві складнощі при проведенні таких досліджень виникають тоді, коли лопатка має малі лінійні розміри (довжина пера менше 100 мм), значну відносну товщину та великий кут закрутки. Наприклад, при електротензометруванні резонансних форм таких лопаток доводить-

ся застосовувати датчики з малою базою і працювати на частотах 10–50 кГц, що призводить до суттєвої похибки при визначенні деформацій.

З нашої точки зору, в арсеналі сучасної експериментальної механіки одним з ефективних для розв'язку таких задач є метод спекл-фотографії [1]. Він дає можливість отримати інформацію про вібропереміщення точок поверхні досліджуваного об'єкту, або першу похідну від однієї з компонент переміщення по відповідній координаті, що необхідно для обчислення НДС. При цьому крок дискретизації поверхні може бути на порядок меншим, ніж база тензодатчика.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідженню напружено-деформованого стану лопаток ГТД присвячено достатню кількість статей, розробок. Але теоретичні дослідження ґрунтуються на певних наближених гіпотезах, що є наслідком суттєвих похибок в кінцевому результаті. На цей час найбільш поширеним методом перевірки теоретичних досліджень є метод електротензометрування. Але цей метод має певні границі використання. Використання метода спекл-фотографії дозволить більш точно оцінити напружено-деформований стан лопаток ГТД при вібрації.

Мета роботи – розробити методику експериментального дослідження деформацій поверхні лопатки при вібрації на резонансній частоті методом спекл-фотографії.

Викладення основного матеріалу.

Усі спекл-методи дослідження малих переміщень базуються на реєстрації та аналізі змін спекл-картини, що є наслідком нерегулярної інтерференції когерентного лазерного світла, відбитого дифузною поверхнею. При переміщенні поверхні випадково розміщені спекли також переміщуються.

Якщо на одній фотопластинці методом двох експозицій зафіксувати спекл-картину до і після навантаження об'єкта, то отримуємо так звану двоекспозиційну спекл-фотографію [1], [2]. Її аналіз можна провести методом поточкового сканування, або методом оптичної фільтрації.

Схему експериментальної установки для дослідження резонансних коливань лопаток ГТД методом спекал-фотографії наведено на рис. 1.

Досліджувана лопатка (1) жорстко закріплюється в кореневому перерізі за допомогою спеціального затискуючого пристрою (2) з вмонтованим в нього п'єзовібробудувачем (3).

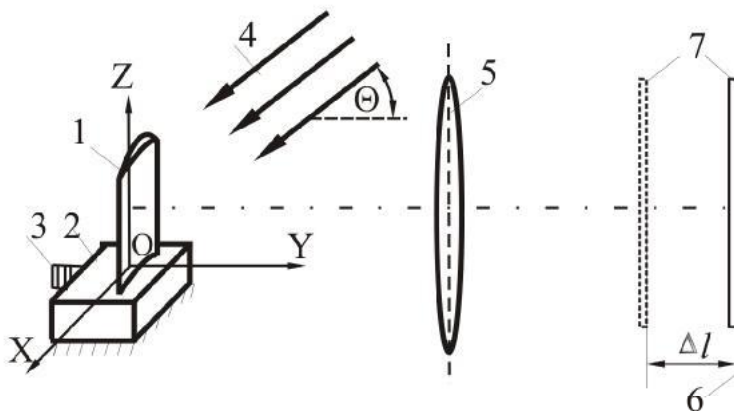


Рис. 1. Оптична схема реєстрації спекал-фотографій вібруючих лопаток.

Джерелом світла є одномодовий He-Ne лазер АГН-215 з довжиною хвилі $\lambda=0,63$ мкм і потужністю випромінювання 50 мвт. Розширений колімований пучок лазерного випромінювання 4, який в площині ZOY утворює з напрямом, паралельним вісі OY, кут θ , освітлює перо лопатки, а ширококутний об'єктив 5 створює дійсне зображення її поверхні в площині 6. Фотопластинка 7 типу ПФГ-01 може бути встановлена в площині зображення або на деякій відстані Δl від неї. В першому випадку отримуємо спекалограму сфокусованого зображення, а в другому – розфокусованого.

Для збудження коливань лопатки та записування спекалограм створено апаратний комплекс, блок-схему якого зображено на рис.2. Вібробудження проводиться синусоїдальним сигналом звукового генератора ГЗ-56/1 (1), який після підси-

лення підсилювачем (2) подається на п'єзостовпчик (3). Амплітуда вимушених коливань лопатки реєструється у верхній області пера індукційним вібродатчиком (4), сигнал якого спостерігається на одному з каналів осцилографа (5). Таким чином, змінюючи частоту віброзбудження, легко визначити момент виникнення резонансу і зафіксувати власну частоту за показами частотоміра (6).

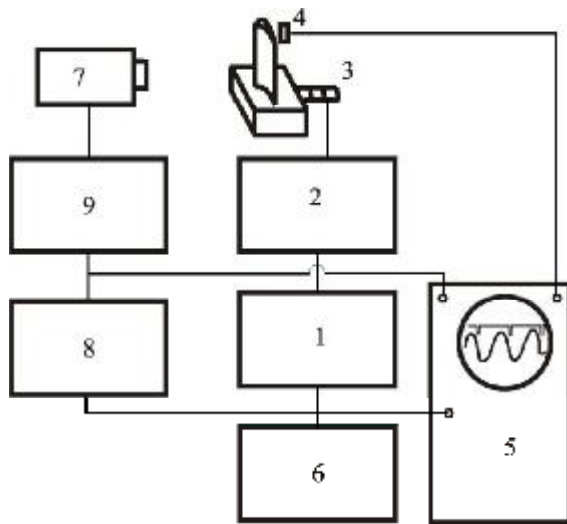


Рис.2. Блок-схема апаратного комплексу установки

Спекл-фотографія віброуючого об'єкту буде відповідати двохекспозиційній, якщо на фотопластинці зареєструвати лазерні спекли в положеннях, що відповідають амплітудним моментам коливань [3]. Для цього лазерний промінь модулюється по амплітуді стробуючими імпульсами, синхронізованими з амплітудними положеннями лопатки. Блок стробування створений на основі електрооптичного модулятора МЛ-3 (7). Сигнал управління модулятором у вигляді прямокутних імпульсів скважністю $8 \div 10$ формується генератором сигналів Г5-54 (8). Його зовнішній запуск проводиться сигналом віброзбудження, а вихідний сигнал контролюється на другому каналі осцило-

графа і синхронізується по фазі з механічними коливаннями шляхом регулювання часової затримки генератора (8). На модулятор керуючі імпульси подаються після підсилення до напівхвильової напруги підсилювачем прямокутних імпульсів (9).

Для розшифровки спеклограм шляхом поточкового [3] сканування фотопластинка 1 (рис. 3) після фотохімічної обробки та висушування освітлюється нерозширеним лазерним променем 2. При цьому на екрані 3 виникає система паралельних між собою полос Юнга. Якщо спекл-фотографія є сфокусованою, то проекція переміщення висвіченої точки на площину фотопластинки ортогональна полосам Юнга і зв'язана періодом b полос, відстанню L від екрану до фотопластинки та коефіцієнтом m збільшення зображення об'єкта на спеклограмі співвідношенням:

$$U_{xz} = \frac{\lambda L}{mb}. \quad (1)$$

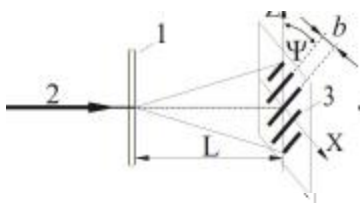


Рис.3. Схема сканування спекл-фотографій лазерним променем

Зрозуміло, що компоненти переміщення U_x і U_z легко обчислюються, коли відомий кут ψ нахилу полос Юнга до о z :

$$U_x = U_{xz} \cos \psi; \quad U_z = U_{xz} \sin \psi.$$

При розфокусованому зображенні дифракційні полоси Юнга несуть інформацію про першу похідну від компоненти переміщення U_y , перпендикулярної до площини фотопластинки по координаті z (якщо освітлюючий пучок 1 на рис.1 перпендикулярний до осі X):

$$\frac{dU_y}{dz} = \frac{\lambda L \sin \psi}{\pi m \Delta l (1 + \cos \theta) b}. \quad (2)$$

Другим способом розшифровки спекл-фотографій є метод просторової фільтрації [2], що реалізується в оптичній схемі рис.4.

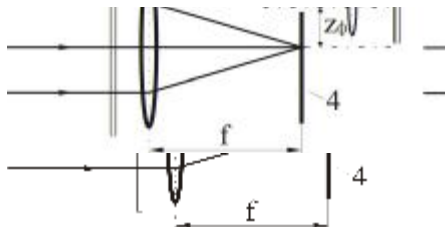


Рис.4. Схема просторової фільтрації спекл-фотографій

Спекл-фотографія (1) освітлюється розширеним колімованим лазерним пучком (2), який дифрагує на записаній картині спеклів. Фільтрація проводиться за допомогою лінзи (3), в фокальній площині якої розміщений екран з круговою діафрагмою (4). Лінза (5) формує на екрані (6) зображення об'єкта з відфільтрованими смугами. Якщо діафрагма зміщена від оптичної осі лінзи (3) в напрямку осі Z , то для спекл-фотографії сфокусованого зображення компонента переміщення U_z буде визначатись згідно зі співвідношенням

$$U_z = \frac{n \lambda f}{m Z_\phi}, \quad (3)$$

де n – порядковий номер полоси, що відповідає даній точці поверхні об'єкта; f – фокусна відстань лінзи (3); Z_ϕ – відстань від оптичної осі фільтруючої лінзи до діафрагми.

При розфокусованому зображенні дифракційні полоси Юнга аналогічно виразу (2) визначають першу похідну від компоненти переміщення U_y по координаті Z :

$$\frac{dU_y}{dz} = \frac{n \lambda f}{\pi m \Delta l (1 + \cos \theta) Z_\phi}. \quad (4)$$

Висновки

1. Створено лазерний стенд та апаратурний стробокомплекс для визначення амплітуд коливань точок поверхні твердих тіл.

2. Розроблено методику дослідження напружено-деформованого стану лопаток ГТД при резонансній вібрації.

ЛІТЕРАТУРА

1. Джоунс Р. Голографическая и спекл-интерферометрия / Р.Джоунс, К.Уайкс. — М.: Мир, 1986. — 327с.
2. Вест Ч. Голографическая интерферометрия / Ч.Вест. — М.: Мир, 1982. — 502 с.
3. Кобаяси А. Экспериментальная механика. Книга1 / А. Кобаяси. — М.: Мир, 1990. — 615с.