

УДК 621.438

М.Р. ТКАЧ, Ю.Г. ЗОЛОТОЙ, Д.В. ДОВГАНЬ

Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова, Украина

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ВИБРОДИАГНОСТИКИ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЕЙ РАБОЧИХ ЛОПАТОК КОМПРЕССОРОВ ГТД В УСЛОВИЯХ РЕЗОНАНСНОЙ ВИБРАЦИИ

Рассмотрены особенности экспериментального определения динамических параметров и напряженно-деформированного состояния рабочих лопаток компрессоров ГТД при резонансной вибрации. Разработан и реализован подход к определению собственных частот и форм колебания, основанный на рациональном сочетании методов усреднения по времени и стробоголографической виброметрии. Реализована методика расшифровки голографических интерферограмм при наличии двух направлений освещения и поворота лопатки между экспозициями. Показана адекватность результатов решения тестовой задачи. Приведены результаты определения деформированного состояния входной кромки рабочей лопатки компрессора.

Ключевые слова: рабочая лопатка компрессора, напряжённо-деформированное состояние, голографическая интерферограмма, расшифровка, стробоголографическая виброметрия, собственная частота колебаний, форма колебаний,

Постановка проблемы

Повышение эффективности современных ГТД сопровождается увеличением нагрузок на их элементы. Резонансная вибрация, вследствие неравномерности газового потока является причиной значительной части аварий лопаточного аппарата компрессоров [1]. Определение динамических напряжений и виброрезонансные испытания рабочих лопаток последних ступеней компрессора являются обязательными при создании современных ГТД. Как известно, в процессе натурных испытаний ГТД существуют ограничения как на максимальное количество каналов передачи информации, так и на минимальные размеры тензодатчиков. При этом, допустимое отношение напряжений в зонах максимальных их значений к измеренным тензодатчиками, как правило, не превышает двух. Все это требует размещения на рабочих лопатках компрессора минимального возможного количества тензодатчиков в зонах максимальных вибрационных напряжений.

Одним из эффективных расчетно-экспериментальных методов определения эпюры вибрационных напряжений компрессорных лопаток ГТД является метод голографической интерферометрии [2]. Колебания лопатки с консольно защемлённым хвостовиком возбуждаются сигналом звукового генератора с плавно изменяющейся частотой. Моменты возникновения резонансов наблюдаются визуально в реальном времени а, соответственно, с высокой точностью регистрируются значения собственных частот колебаний.

Формы колебаний традиционно определяют методом Пауэла-Стетсона, записывая усреднённые по времени интерферограммы резонирующей лопатки [3].

При исследовании форм колебаний коротких лопаток с большой относительного утолщения высота вероятность получения ложной информации о дислокации узловых линий. Действительно, при усреднении по времени распределение яркости на интерферограмме соответствует соотношению [3]:

$$I = a_0^2 j_0^2(\varphi),$$

где I – яркость точки в восстановленном изображении; a_0 – амплитуда предметной световой волны; j_0 – функция Бесселя первого рода нулевого порядка; φ – изменение фазы в предметной волне при перемещении \bar{U} точки поверхности лопатки между двумя амплитудными положениями.

В геометрической модели формирования картины интерференции

$$\varphi = 2\pi \bar{K} \cdot \bar{U} / \lambda,$$

где \bar{K} – вектор чувствительности интерферометра, определяемый как разность вектора наблюдения \bar{K}_H и вектора освещения \bar{K}_O ; λ – длина волны излучения лазера.

Как следствие, полоса с максимальной яркостью на интерферограмме будет соответствовать не только узлам колебаний ($\bar{U} = 0$), но и тем точкам лопатки, где $\bar{U} \perp \bar{K}$. Фактически узловые линии на поверхности пера могут вовсе отсутствовать и рас-

полагаться внутри (рис. 1). Здесь на усредненных по времени интерферограммах зарегистрирована одна и та же форма колебаний при разных направлениях вектора \bar{K} . В этом случае определение формы колебаний предполагает расшифровку интерферограммы – определение виброперемещений во всех точках пера лопатки.

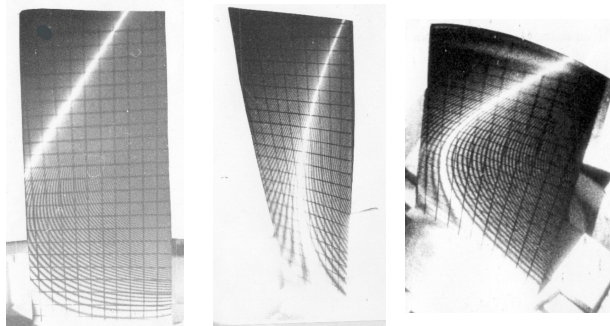


Рис. 1. Усредненные по времени интерферограммы колебаний лопатки при разных направлениях вектора чувствительности

Аналогичная проблема возникает при определении напряженно-деформированного состояния лопатки. Решение этой задачи предполагает процедуру дифференцирования перемещений по координатам местного базиса. Но направление этого вектора априори неизвестно. Основное соотношение голографической интерферометрии $\bar{K} \cdot \bar{U} = N\lambda$ (N – порядок интерференционной полосы) определяет проекцию вектора \bar{U} на направление вектора \bar{K} [4]. Поэтому оптическая схема голографического стенда должна обеспечить получение как минимум трех линейно независимых уравнений вида:

$$\bar{K}_i \cdot \bar{U} = N_i \lambda \quad (i = 1, 2, 3 \dots) \quad (1)$$

В этих уравнениях N_i -порядки интерференционных полос на интерферограммах с некомпланарными векторами чувствительности K_i . Система уравнений (1) традиционно реализуется путем регистрации трех голограмм с различными направлениями наблюдения или освещения. При этом оптическая схема установки становится чрезвычайно громоздкой, а эксперимент – избыточно трудоемким.

Цель работы – повышение точности экспериментального определения методом ГИ перемещений и НДС рабочей лопатки компрессора ГТД при резонансной вибрации.

1. Оптическая схема интерферометра и аппаратное обеспечение голографического стенда

При создании оптической схемы голографического интерферометра предполагалось выполнение следующих основных требований:

- возможность реализации системы уравнений (1);
- получение высокого контраста картины интерференции для надёжного считывания интерферометрических данных;
- обеспечение приемлемой точности определения перемещений путем формирования набора пространственно разнесенных векторов чувствительности.

Для получения высококонтрастных интерферограмм использован метод модуляции лазерного излучения стробирующими прямоугольными импульсами регулируемой скважности. С этой целью сигналом генератора вибровозбуждения лопатки запускался генератор прямоугольных импульсов, которые после усиления до полуволнового напряжения подавались на электрооптический модулятор излучения. С помощью фазовращателя стробирующие импульсы синхронизировались с амплитудными моментами колебаний лопатки. При соответствующем подборе скважности импульсов такая стробинтерферограмма по контрасту эквивалентна двухэкспозиционной [3].

Разработанная оптическая схема представлена на рис. 2.

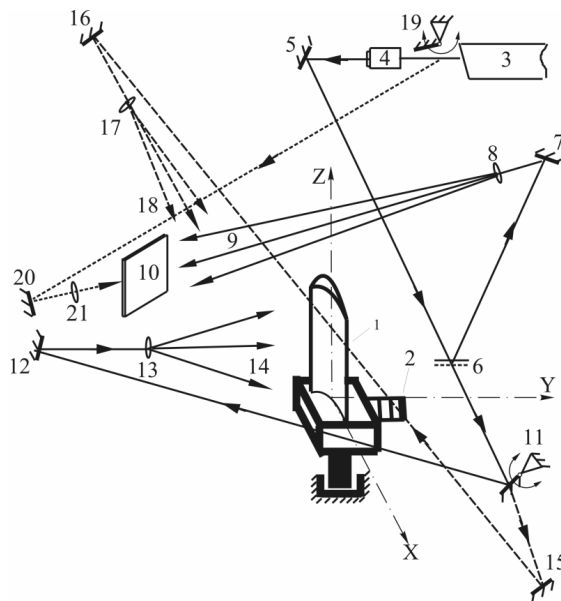


Рис. 2. Оптическая схема голографического интерферометра.

В ней исследуемая лопатка 1 в специальном зажиме укреплена на горизонтальной платформе поворотного устройства. В корпус зажимного устройства вмонтирован пьезоэлектрический вибровозбудитель 2. Прецизионные подшипники и использование в качестве привода шагового двигателя с редуктором позволяют повернуть лопатку вокруг вертикальной оси z на заданный угол и затем вернуть ее в исходное положение с интерферометрической точностью (менее половины длины волны).

Для определения соответствия между картиной интерференции и координатами точек поверхности на лопатку нанесена разметочная сетка по расчетным сечениям.

Источником когерентного излучения служит He – Ne – лазер ЛГН-215 3. Его луч проходит через модулятор излучения МЛ-3 4 и зеркалом 5 направляется на светоделитель 6. Отраженный от него луч с помощью зеркала 7 и микрообъектива 8 формирует опорную волну 9, падающую на фотопластинку 10, где происходит регистрация голограммы. Из луча, который прошел через светоделитель, зеркалами 11, 12 и микрообъективом 13 формируется освещающий лопатку пучок 14. Зеркало 11 смонтировано на цилиндрическом шарнире, который позволяет убрать его из луча и снова вернуть в исходное положение. Таким образом, можно оперативно с помощью зеркал 15, 16 и микрообъектива 17 заменить освещающий пучок 14 на пучок 18 и наоборот.

При проведении эксперимента сначала последовательно записываются две интерферограммы с векторами освещения \bar{K}_{O1} , \bar{K}_{O2} и вектором наблюдения \bar{K}_{H1} . После поворота лопатки на заданный угол регистрируются еще две интерферограммы (замена освещающих пучков производится в

обратном порядке), которым соответствуют векторы освещения \bar{K}_{O3} , \bar{K}_{O4} и вектор наблюдения \bar{K}_{H2} .

Особенностью оптической схемы является наличие шарнирно закрепленного зеркала 19. В рабочем положении оно отражает луч лазера на зеркало 20, после которого объективом 21 формируется световая волна, сопряженная опорной. При этом с голограммы 10 действительное изображение интерферограммы проектируется на поверхность лопатки и фотографируется цифровой фотокамерой. При этом по сравнению с мнимым изображением удастся существенно улучшить разрешение и контраст интерференционных полос.

Таким образом, четыре направления освещения при двух направлениях наблюдения интерферограммы дают возможность для каждой реперной точки на поверхности лопатки составить систему уравнений

$$\begin{cases} \bar{U}(\bar{K}_{H1} - \bar{K}_{O1}) = N_1 \cdot \lambda; \\ \bar{U}(\bar{K}_{H1} - \bar{K}_{O2}) = N_2 \cdot \lambda; \\ \bar{U}(\bar{K}_{H2} - \bar{K}_{O3}) = N_3 \cdot \lambda; \\ \bar{U}(\bar{K}_{H2} - \bar{K}_{O4}) = N_4 \cdot \lambda. \end{cases} \quad (2)$$

В декартовых координатах глобального базиса лопатки эти уравнения приобретают вид:

$$\begin{cases} U_x \left(\frac{x_{H1} - x}{r_{H1}} + \frac{x_{O1} - x}{r_{O1}} \right) + U_y \left(\frac{y_{H1} - y}{r_{H1}} + \frac{y_{O1} - y}{r_{O1}} \right) + U_z \left(\frac{z_{H1} - z}{r_{H1}} + \frac{z_{O1} - z}{r_{O1}} \right) = N_1 \lambda; \\ U_x \left(\frac{x_{H1} - x}{r_{H1}} + \frac{x_{O2} - x}{r_{O2}} \right) + U_y \left(\frac{y_{H1} - y}{r_{H1}} + \frac{y_{O2} - y}{r_{O2}} \right) + U_z \left(\frac{z_{H1} - z}{r_{H1}} + \frac{z_{O2} - z}{r_{O2}} \right) = N_2 \lambda; \\ U_x \left(\frac{x_{H2} - x}{r_{H2}} + \frac{x_{O3} - x}{r_{O3}} \right) + U_y \left(\frac{y_{H2} - y}{r_{H2}} + \frac{y_{O3} - y}{r_{O3}} \right) + U_z \left(\frac{z_{H2} - z}{r_{H2}} + \frac{z_{O3} - z}{r_{O3}} \right) = N_3 \lambda; \\ U_x \left(\frac{x_{H2} - x}{r_{H2}} + \frac{x_{O4} - x}{r_{O4}} \right) + U_y \left(\frac{y_{H2} - y}{r_{H2}} + \frac{y_{O4} - y}{r_{O4}} \right) + U_z \left(\frac{z_{H2} - z}{r_{H2}} + \frac{z_{O4} - z}{r_{O4}} \right) = N_4 \lambda, \end{cases} \quad (3)$$

где U_x, U_y, U_z – проекции вектора виброперемещения исследуемой точки на оси координат;

$r_{Hi} = \sqrt{(x_{Hi} - x)^2 + (y_{Hi} - y)^2 + (z_{Hi} - z)^2}$ – модуль вектора, соединяющего исследуемую точку с координатами (x, y, z) с i -й точкой наблюдения,

$r_{Oi} = \sqrt{(x_{Oi} - x)^2 + (y_{Oi} - y)^2 + (z_{Oi} - z)^2}$ – модуль вектора, соединяющего i -ю точку освещения с исследуемой точкой.

Если N_i определены только по модулю, то из системы уравнений (3) любые три решаются совместно, а четвертое служит для определения истинной

комбинации знаков полос. Если же знаки порядков полос известны заранее, то система (3) решается методом наименьших квадратов.

Коэффициент левой части уравнений (3) определяются геометрией лопатки и геометрией оптической схемы, причем координаты точек освещения и наблюдения удобно представить в глобальной системе координат лопатки. С этой целью спроектировано и изготовлено специальное координатное устройство. Его работа основана на измерении углов между сканирующими в одной плоскости лучами лазерных диодов и осью вращения этой плоскости. Опыт показал хорошую точность и надежность результатов таких измерений.

Порядки интерференционных полос определялись с помощью компьютерной программы в полуавтоматическом режиме. С целью уменьшения случайных осцилляций определения дробных частей полос производилась аппроксимация и сглаживание массивов N_i вариационной кубической сплайн-функцией [5].

При определении коэффициентов кубической сплайн-функции используются следующие условия:

1) значения полиномов на концах интервалов равны заданным экспериментальным значениям;

2) первые и вторые производные для последовательных полиномов в узлах должны быть одинаковы.

Вторая производная от кубических полиномов на каждом интервале $[z_j, z_{j+1}]$ является линейной функцией. Используя условия 1 и 2, кубические сплайны на этом отрезке можно привести к виду:

$$S_j(z) = \frac{A_j}{6h_j}(z_{j+1} - z)^3 + \frac{A_{j+1}}{6h_j}(z - z_j)^3 + \left(\frac{N_{j+1}}{h_j} - \frac{h_j}{6} A_{j+1} \right) (z - z_j) + \left(\frac{N_j}{h_j} - \frac{h_j}{6} A_j \right) (z_{j+1} - z), \quad J = 1, 2, \dots, L-1, \quad (4)$$

где A_j – значение второй производной в точке z_j ; N_j – значение порядка полос в узловой точке z_j ; $h_j = z_{j+1} - z_j$; L – количество узлов.

Для определения коэффициентов A_j, A_{j+1} воспользуемся равенством первых производных для сплайнов в узловых точках. В результате получим следующую систему уравнений:

$$\frac{h_{j-1}}{6} A_{j-1} + \frac{h_j + h_{j-1}}{3} A_j + \frac{h_j}{6} A_{j+1} = \frac{1}{h_j} (N_{j+1} - N_j) - \frac{1}{h_{j-1}} (N_j - N_{j-1}), \quad j = 2, 3, \dots, L-1. \quad (5)$$

Система уравнений (5) состоит из $L - 2$ уравнений с L неизвестными A_1, A_2, \dots, A_L . Недостаёт ещё двух уравнений. В работе [5] два недостающих уравнения были получены приравнением нулю вторых производных A_1 и A_L в точках z_1 и z_L . Однако численный эксперимент показал, что для аппроксимации порядков полос на концах интервала корректнее использовать интерполяционный полином Лагранжа третьего порядка.

Система линейных алгебраических уравнений (2) решалась методом прогонки [6]. В итоге получена сплайн-функция

$$S(z) = \begin{cases} S_1(z), & z_1 \leq z \leq z_2; \\ S_2(z), & z_2 \leq z \leq z_3; \\ \dots & \dots \\ S_{L-1}(z), & z_{L-1} \leq z \leq z_L, \end{cases} \quad (6)$$

точно проходящая через экспериментальные значения N_j . Очевидно, что погрешность определения N_j не превышает половины полосы: $|N_j - f(z_j)| \leq \delta$, где $f(z_j)$ – точные значения порядков полос в узловых точках, а $\delta = 0,5$.

Сглаживание порядков полос проводилось путём численного варьирования с малым шагом значений N_j в пределах $\pm \delta$. Каждая вариация сопровождалась определением среднеквадратичной кривизны I сплайна (6) и среди всех возможных выбиралась функция с минимальной кривизной:

$$I(z) = \int_{z_1}^{z_L} [S''(z)]^2 dz = \min.$$

2. Методика определения НДС

Расчёт деформаций поверхности вибрирующей лопатки по определённому ранее полю виброперемещений осложняется значительной относительной толщиной, большими углами. Использование гипотез тонких оболочек для этой задачи не достаточно корректно. Поэтому расчёт деформаций производился по формулам Коши:

$$\varepsilon_{x_1} = \frac{\partial U_{x_1}}{\partial x_1}; \quad \varepsilon_{z_1} = \frac{\partial U_{z_1}}{\partial z_1}; \quad \gamma_{x_1 z_1} = \frac{\partial U_{x_1}}{\partial z_1} + \frac{\partial U_{z_1}}{\partial x_1}, \quad (7)$$

где x_1 и z_1 – оси локальной системы координат, касательные к поверхности лопатки в данной точке M (рис. 3), а ось y_1 к ним перпендикулярна.

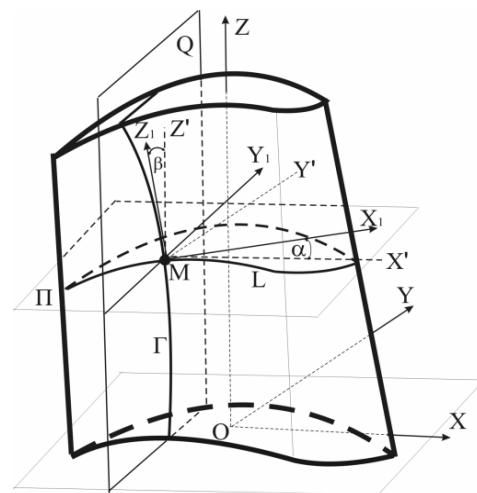


Рис. 3. Определение ориентации местного базиса на поверхности лопатки.

Для определения ориентации локального базиса $X_1 Y_1 Z_1$ относительно глобальной системы координат XYZ используются данные чертежа лопатки, в котором координаты точек поверхности спинки и корыта лопатки заданы таблично в сечениях, параллельных плоскости XOY . Поверхность лопатки оп-

ределена функцией $Y = f(x, z)$, заданной таблично. Представим ее в виде совокупности функций от каждой переменной отдельно:

$$y(x, z) = \begin{cases} f_1(x) & z = z_1, \quad 1 = 1, 2, \dots, K_1; \\ \varphi_m(z) & x = x_m, \quad m = 1, 2, \dots, K_2, \end{cases}$$

где K_1 и K_2 – количество соответствующих сечений по высоте лопатки.

Важно, что функции $f_1(x)$ и $\varphi_m(z)$ определяют аналитически на базе сплайн-аппроксимации. На рис. 4 им соответствуют линии L и Г, образованные в сечениях лопатки плоскостями П и Q. Углы α и β , образованные осями x_1 и z_1 местного базиса с направлениями осей X и Z, определяются из соотношений:

$$\operatorname{tg} \alpha_i(x) = \frac{d}{dx}(f_i(x)), \quad i = 1, 2, \dots, K_1;$$

$$\operatorname{tg} \beta_m(z) = \frac{d}{dz}(\varphi_m(z)), \quad m = 1, 2, \dots, K_2$$

Тогда связь между проекциями перемещения точки поверхности лопатки на оси локальной и глобальной систем координат приобретает вид:

$$\begin{cases} U_{X_1}(x, z) = U_X(x, z) \cos \alpha(x) + U_Y(x, z) \sin \alpha(x); \\ U_{Z_1}(x, z) = [U_X(x, z) \sin \alpha(x) - U_Y(x, z) \cos \alpha(x)] \times (8) \\ \times \sin \beta(z) + U_Z(x, z) \cos \beta(z). \end{cases}$$

Считая НДС в местном базисе плоским и подставляя зависимости (8) в формулы Коши (7), определим деформации поверхности лопатки из соотношений:

$$\begin{cases} \varepsilon_{X_1}(x, z) = \frac{\partial U_{X_1}(x, z)}{\partial x_1} = \frac{\partial U_{X_1}(x, z)}{\partial x} \cos \alpha(x); \\ \varepsilon_{Z_1}(x, z) = \frac{\partial U_{Z_1}(x, z)}{\partial z_1} = \frac{\partial U_{Z_1}(x, z)}{\partial z} \cos \beta(z); \\ \gamma_{X_1 Z_1}(x, z) = \frac{\partial U_{X_1}(x, z)}{\partial z} \cos \beta(z) + \frac{\partial U_{Z_1}(x, z)}{\partial x} \cos \alpha(x). \end{cases}$$

Значения механических напряжений вычислялись по формулам теории упругости:

$$\sigma_{z_1} = \frac{E}{1-\mu^2}(\varepsilon_{z_1} + \mu\varepsilon_{x_1}); \quad \sigma_{x_1} = \frac{E}{1-\mu^2}(\varepsilon_{x_1} + \mu\varepsilon_{z_1});$$

$$\tau_{x_1 z_1} = \frac{E}{2(1+\mu)} \cdot \gamma_{x_1 z_1}.$$

3. Результаты исследований

3.1. Оценка адекватности методики

Для проверки разработанной методики проведен тестовый эксперимент по определению дефор-

мированного состояния стальной прямоугольной пластинки $63 \times 41 \times 3$ мм с одним жестко защемленным краем, колеблющейся на первой изгибной форме. На рис. 5, а показана одна из стробоинтерферограмм, по которым производился расчет деформаций.

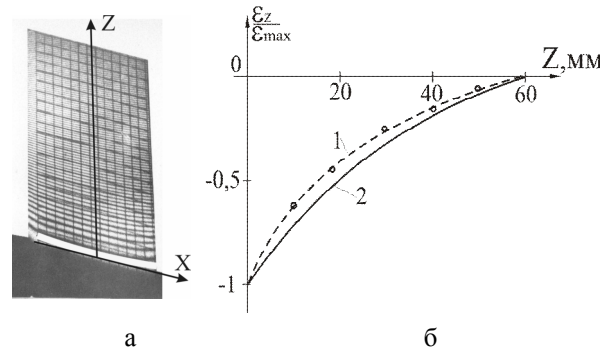


Рис. 5. Определение деформированного состояния прямоугольной пластинки

Полученное распределение деформаций $\varepsilon_z / \varepsilon_{\max}$ вдоль оси Z представлено в нормированном виде на рис. 5б (линия 1). Для сравнения приведено рассчитанное теоретически распределение деформаций ε_z (линия 2) [7]. Согласование результатов вполне удовлетворительное.

3.2. Исследования НДС лопатки компрессора

Результаты исследования деформированного состояния поверхности корытца лопатки, реализующие изложенный подход, при колебаниях на первой изгибной, первой крутильной и второй крутильной формах приведены ниже (рис. 6 – 8).

На рис. 6, а – 8, а представлены стробоинтерферограммы этих форм колебаний с отмеченными нулевыми линиями. Дислокация нулевых полос определялась по голограммам, усредненным во времени. На рис. 6, б – 8, б показаны в нормированном виде эпюры распределения линейных деформаций вдоль входной кромки лопатки (линия 1), определённые по данным расшифровки голографических интерферограмм. Результаты тензометрирования входной кромки представлены линией 2. Наблюдается вполне удовлетворительная корреляция результатов.

Анализ распределения деформаций по входной кромке рабочей лопатки компрессора на данных колебательных модах показывает, что максимально нагруженными являются корневое сечение (на первой изгибной форме), и сечение $Z = 20 \dots 30$ мм (на второй изгибной форме). В то же время, значения линейных деформаций ε_z по входной кромке на первой крутильной форме далеки от экстремальных.

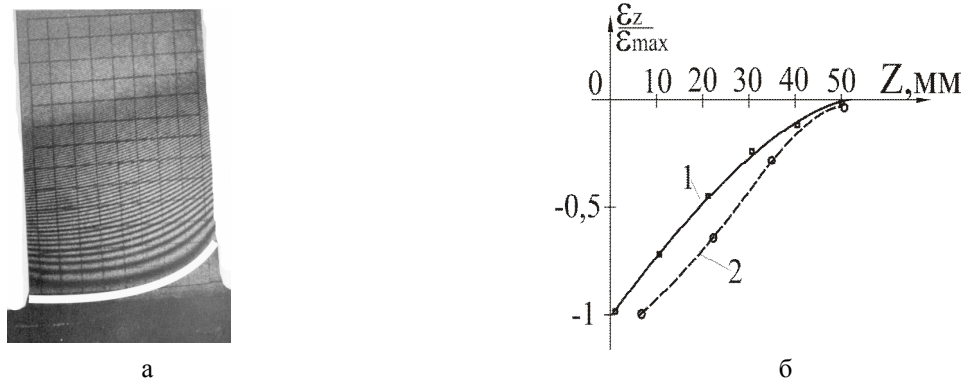


Рис. 6. Деформации входной кромки лопатки на первой изгибной форме

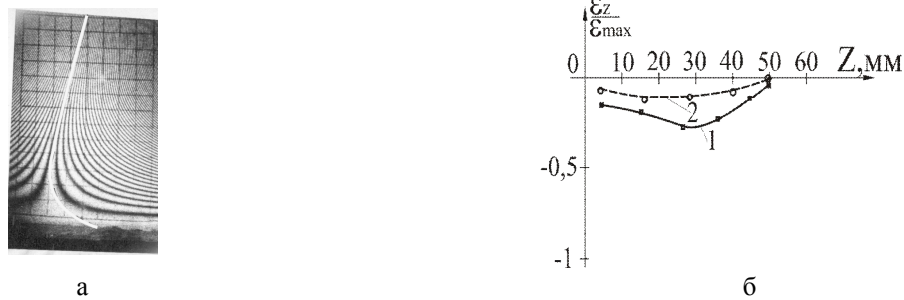


Рис. 7. Деформации входной кромки лопатки на первой крутильной форме

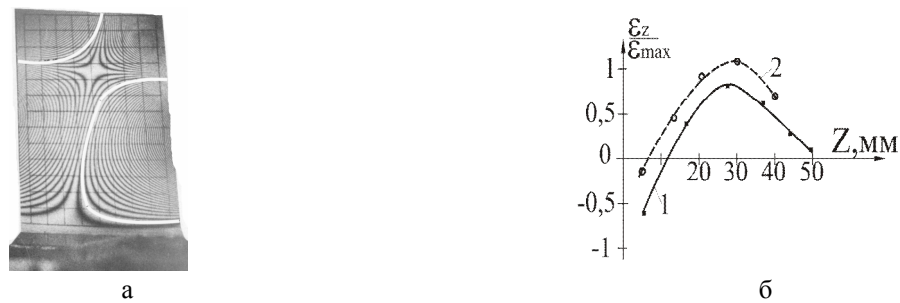


Рис. 8. Деформации входной кромки лопатки на второй крутильной форме.

Таким образом, полученные эпюры позволяют в дальнейшем при проведении натурных испытаний оптимизировать препарировку лопатки тензорезисторами, разместив их в местах локализации максимальных вибронапряжений.

Заключение

1. Разработан и реализован подход к определению собственных частот и форм колебаний, основанный на рациональном сочетании методов усреднения по времени и стробоголографической виброметрии.

2. Реализована методика расшифровки голографических интерферограмм при наличии двух направлений освещения и поворота лопатки между экспозициями.

3. Применительно к рабочей лопатке компрессора ГТД получены эпюры деформаций, обеспечивающие оптимальную препарировку лопатки при натурных испытаниях.

Литература

1. Динамика авиационных газотурбинных двигателей / Под ред. И.А. Биргера и Б.Ф. Шорра. – М.: Машиностроение, 1981. – 232 с.

2. Макаева Р.Х. Диагностика технического состояния, разрушения деталей и узлов турбомашин по их вибрационным характеристикам с применением голографической интерферометрии: дисс ... д-ра техн. наук; 05.07.03, 05.07.05 / Р.Х. Макаева. – Казань, 2009. – 420 с.

3. Островский Ю.И. Голографические интерференционные методы измерения деформаций /

Ю.И. Островский, В.П. Щепинов, В.В. Яковлев.
– М.: Наука, 1988. – 360 с.

4. Казачек А.Г. Голографические методы исследования в экспериментальной механике / А.Г. Казачек. – М.: Машиностроение, 1984. – 175 с.

5. Вест Ч. Голографическая интерферометрия / Ч. Вест. – М.: Мир, 1982. – 504 с.

6. Корн Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн. – М.: Наука, 1970. – 720 с.

7. Справочник по строительной механике корабля: т. 3. Судостроение / Бойцов Г.В., Палий О.М., Постнов В.А. и др. Л., 1982. – 640 с.

Поступила в редакцию 20.05.2010

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Б.Г. Тимошевский, Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова, Николаев.

ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВІБРОДІАГНОСТИКИ ГОЛОГРАФІЧНОЮ ІНТЕРФЕРОМЕТРІЄЮ РОБОЧИХ ЛОПАТОК КОМПРЕСОРИВ ГТД В УМОВАХ РЕЗОНАНСНИХ КОЛИВАНЬ

М.Р. Ткач, Ю.Г. Золотий, Д.В. Довгань

Розглянуто питання експериментального визначення динамічних параметрів і напружено-деформованого стану робочих лопаток компресорів ГТД при резонансній вібрації. Викладена методика визначення власних частот і форм коливань при поєднанні методу усереднення за часом та методу стробоголографічної віброметрії. Запропонована методика розшифровки голографічних інтерферограм передбачає наявність двох напрямів освітлення та поворот лопатки між експозиціями. Виконана перевірка адекватності методики на прикладі рішення тестової задачі та наведено результати визначення напружено-деформованого стану лопатки на кількох власних частотах.

Ключові слова: розшифровка голографічних інтерферограм, лопатка ГТД, стробоголографічна віброметрія, власні частоти та форми коливань, напружено-деформований стан.

VIBRATION RESONANCE OSCILLATIONS COMPRESSOR ROTOR BLADES OF GTE LOW POWER METHODS OF HOLOGRAPHIC INTERFEROMETRY

M.R. Tkach, J.G. Zolotoi, D.V. Dovgan

Problems of experimental determination of dynamic parameters and the stress strain state of rotor blades of GT compressor with resonant vibration. Stated method of determining the natural frequencies and mode shapes by combining the method of US-averaged in time with the method of strobology vibrometry. The technique of interpretation of holographic interferograms of the two-direction illumination and rotation of scapula between exposures. Completed verification of the adequacy of methods on the solution of test problems and results of determining the stress-deformed state Immunized blades on several natural frequencies.

Key words: decoding holographic interferograms, blade GTE, strobology vibrometry, the natural frequencies and mode shapes, stress-strain state of the blade.

Ткач Михаил Романович – д-р техн. наук, проф., зав. кафедры теоретической механики Национального университета кораблестроения им. адмирала Макарова, Николаев, Украина, e-mail: tkach@mksat.net.

Золотий Юрий Григорьевич – ст. преподаватель, зав. лаборатории лазерных средств измерений Национального университета кораблестроения им. адмирала Макарова, Николаев, Украина, e-mail: goldspekl@ukr.net.

Довгань Дмитрий Витальевич – м.н.с. Национального университета кораблестроения им. адмирала Макарова, Николаев, Украина, e-mail: dovband@trion.mk.ua.