

СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТР ДЛЯ ПАНОРАМНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ КОЛЕБАНИЙ ТУРБИНЫХ ЛОПАТОК

© 2012 А.И. Жужукин, В.А. Соляников

ОАО “КУЗНЕЦОВ”, Самара

Поступила в редакцию 29.03.2012

Разработан спекл – интерферометр с оптической схемой, позволяющей регистрировать форму колебаний лопатки со стороны корыта и со стороны спинки одновременно. Это позволяет обнаруживать аномальные участки на поверхностях охлаждаемых лопаток турбин и контролировать качество их изготовления.

Ключевые слова: спекл – интерферометрия, формы колебаний, неразрушающий контроль

Анализ эксплуатационной надёжности газотурбинных двигателей показывает, что в большинстве случаев их работоспособность и ресурс определяются состоянием лопаток турбины, так как они находятся в наиболее жёстких условиях эксплуатации [1]. В связи с этим исследование собственных частот и форм колебаний турбинных лопаток является актуальной задачей. Охлаждаемые турбинные лопатки представляют собой достаточно сложную конструкцию. Один из вариантов представлен на рис. 1.

Система охлаждения лопатки представляет собой вихревую матрицу с перфорационными отверстиями на входной кромке 1 и с окнами выпуска на выходной кромке 2. Толщины стенок вогнутой части лопатки – корыта 3 и выпуклой части – спинки 4 могут быть различны. Вместе с тем толщина обеих боковых стенок лопатки уменьшается от основания к полке лопатки. Внутри лопатки проходят каналы для охлаждения 5. Технология изготовления такой лопатки сложна, поэтому контролировать её вибрационные характеристики необходимо особенно тщательно. В этой связи возникает необходимость в наблюдении колебаний всей поверхности турбинной лопатки.

Проводимые в настоящее время исследования колебаний сложных конструкций с помощью установок, основанных на методах голографической [2] и спекл – интерферометрии [3- 5], являются либо трудоёмкими, либо дорогостоящими. В связи с этим разработан спекл – интерферометр для эффективного получения наиболее полной картины колебаний сложных элементов конструкций, к которым, в частности, относятся охлаждаемые рабочие лопатки турбины.

Жужукин Анатолий Иванович, инженер-конструктор. E-mail: cntkknio@yandex.ru

Соляников Виктор Анатольевич, кандидат технических наук, начальник конструкторского научно-исследовательского отделения. E-mail: cntkknio@yandex.ru

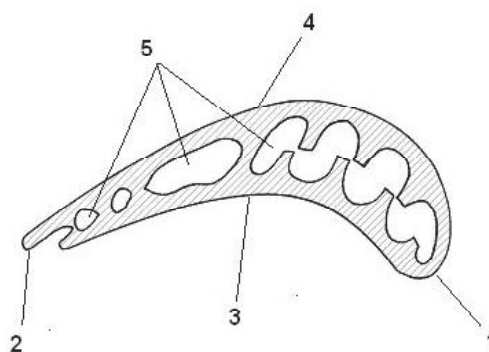


Рис. 1. Среднее сечение 1-й ступени лопатки турбины:
1 – входная кромка; 2 – выходная кромка; 3 – корыто; 4 – спинка; 5 – каналы для охлаждения

ОПИСАНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ СХЕМЫ

Оптическая схема спекл – интерферометра представлена на рис. 2.

Когерентное излучение лазера 1 делится с помощью светоделителя 2 на два пучка: опорный и предметный. Опорный пучок формируется с помощью поворотных зеркал 3, 4, расширительных линз 5, 6 и направляется зеркалом 7 и оптическим клином 13 на телекамеру 16. Предметный пучок, расширяется линзой 8 и, проходя через светоделитель 12, освещает исследуемую колеблющуюся турбинную лопатку 9. При этом с помощью боковых зеркал 10, 11 освещается и обратная сторона лопатки. Рассеянный свет лопаткой 9 с помощью зеркал 10, 11, светоделителя 12, диафрагмы 14, объектива 15 направляется на телекамеру 16. На светочувствительном слое телекамеры 16 образуется интерференционная картина спекл – модулированного предметного пучка с гладкой опорной волной. Телекамера 16 соединена с персональной ЭВМ 17, в памяти которой хранится записанная спекл – интерферограмма.

Запись спекл-интерферограмм осуществляется методом вычитания изображений [6].

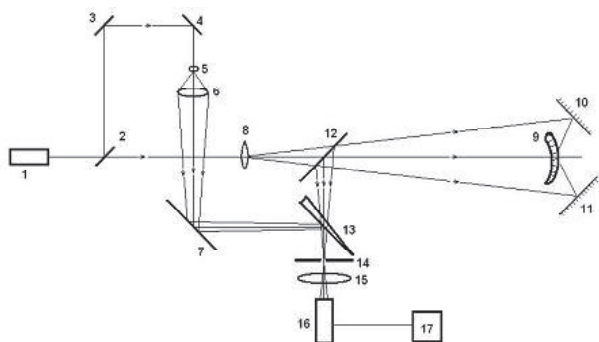


Рис. 2. Оптическая схема спекл-интерферометра для двухстороннего исследования колебаний объектов:

1 – лазер; 2, 12 – делители пучка; 3, 4, 7 – поворотные зеркала; 5, 6 – линзы; 8 – расширительная линза; 9 – исследуемый объект; 10, 11 – вспомогательные зеркала; 13 – оптический клин; 14 – диафрагма; 15 – объектив телекамеры; 16 – телекамера; 17 – персональная ЭВМ

В этом случае для вибрирующего на резонансной частоте объекта яркость результирующей спекл – интерферограммы, наблюдаемой на экране монитора описывается выражением [7]:

$$\Delta B(x, y) = 4b \sqrt{I_r(x, y) \cdot I_s(x, y)} \times J_0[\bar{A}(x, y) \cdot \bar{K}(x, y)] \cdot \cos[\varphi_r(x, y) - \varphi_s(x, y)], \quad (1)$$

где b – коэффициент, зависящий от телекамеры и системы ввода;

$I_r(x, y), \varphi_r(x, y)$ – интенсивность и фаза опорного пучка;

$I_s(x, y), \varphi_s(x, y)$ – интенсивность и фаза предметного пучка;

J_0 – функция Бесселя первого рода нулевого порядка;

$\bar{A}(x, y)$ – вектор амплитуды колебаний в точке (x, y) ;

$\bar{K}(x, y)$ – вектор чувствительности интерферометра в точке (x, y) .

Характерной особенностью этой оптической схемы является совпадение направления освещения и наблюдения в каждой точке поверхности исследуемого объекта. Вектор чувствительности спекл – интерферометра в этом случае совпадает с направлением наблюдения (рис. 3).

В настоящей работе выбиралось $\theta_1 < 1^\circ$. Это позволяет считать, что направление вектора амплитуды вибраций \bar{A} на выходной кромке лопатки при наблюдении со стороны корыта практически совпадает с направлением вектора чувствительности \bar{K}_1 . Вместе с тем, исходя из геометрических размеров интерферометра, было установлено, что $\theta_2 = 45^\circ$. В этом случае, при наблюдении колебаний выходной кромки со стороны спинки лопатки, интерферометр чувствителен к проекции век-

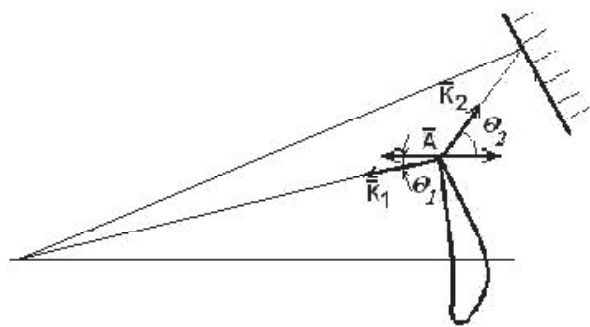


Рис. 3. Вектор чувствительности спекл-интерферометра на выходной кромке лопатки: \bar{A} – вектор амплитуды вибраций; \bar{K}_1 – вектор чувствительности со стороны корыта лопатки; \bar{K}_2 – вектор чувствительности со стороны спинки

тора амплитуды вибраций на вектор

Кроме того, другим важным отличием разработанного спекл – интерферометра является наличие двух дополнительных зеркал, которые устанавливаются таким образом, чтобы освещалась и наблюдалась обратная сторона лопатки. При этом на поверхность лопатки с обеих сторон должно быть нанесено светоотражающее покрытие. В качестве такого покрытия в данной работе использовались стеклянные микрошарики диаметром ≈ 60 мкм, нанесённые на поверхность лопатки с помощью бесцветного лака. Это покрытие практически полностью отражает освещающий пучок в обратном направлении, оставаясь при этом диффузным и, кроме того, предотвращает появление бликов. В результате с помощью телекамеры наблюдаются одновременно колебания корыта лопатки и колебания выпуклой стенки лопатки – спинки. Два боковых изображения спинки под разными углами будут видны благодаря использованию двух вспомогательных зеркал (рис. 4). В этом случае контурируется вся поверхность спинки лопатки.

ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В настоящей работе проводились исследования колебаний охлаждаемой лопатки 1-й ступени турбины в частотном диапазоне от 0 до 26 кГц. Было выявлено 15 собственных частот и форм колебаний лопатки. Ввиду того что, в большинстве случаев, на работающем двигателе максимальные напряжения возникают на кромках лопатки, изображения лопатки 2, 3 в боковых зеркалах на рис.4 в дальнейшем (на рис. 5 – рис. 8) инвертированы на 180° относительно вертикальной оси. Таким образом, изображения входной и выходной кромок со стороны корыта и со стороны спинки будут максимально приближены друг к другу, что позволяет сопоставлять между собой колебания каждой

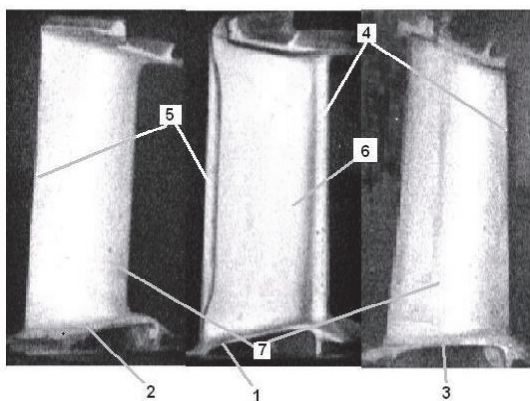


Рис. 4. Общий вид наблюдаемого с помощью телекамеры изображения турбинной лопатки: 1 – прямое изображение лопатки; 2 – изображение лопатки в левом зеркале; 3 – изображение лопатки в правом зеркале; 4 – входная кромка лопатки; 5 – выходная кромка; 6 – корыто; 7 – спинка

кромки со стороны корыта и со стороны спинки. Анализ форм колебаний показывает, что в большинстве случаев (особенно на низких частотах) расположение узловых линий на спинке и корыте лопатки совпадает (рис. 5)

Вместе с тем, при колебаниях лопатки на частоте 17950 Гц, верхняя часть корыта (участок S_1) лопатки колеблется, в то время как соответствующая часть спинки (участок S_1') находится в покое (рис. 6).

При колебаниях на частоте 21827 Гц в нижней части лопатки появляется аномальный участок S_2 , который со стороны корыта и со стороны спинки колеблется неодинаково (рис. 7).

Ход узловых линий на отмеченном участке не совпадает. Есть различия также в расположении узловых линий на выходной кромке. Наличие аномальных участков, указанных на рис. 6 и рис. 7, свидетельствует о возможных нарушениях структурной целостности лопатки в некоторых точках на этих участках.

Наибольшие различия были зарегистрированы при колебаниях на частоте $F=25310$ Гц (рис. 8).

В этом случае расположение узловых линий на

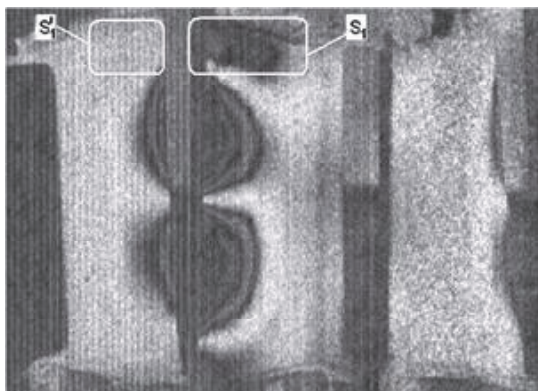


Рис. 6. Колебания турбинной лопатки на частоте $F=17950$ Гц

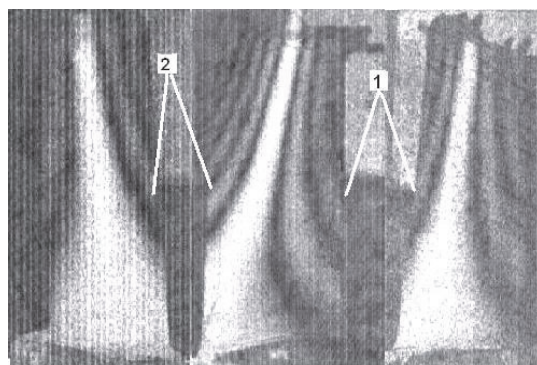


Рис. 5. Колебания турбинной лопатки на частоте $F=4555$ Гц:

1 – входная кромка; 2 – выходная кромка

всей поверхности корыта лопатки и на поверхности спинки отличаются в значительной степени. На рис. 9 представлены эпюры вибро смещений, построенные по выходной кромке лопатки со стороны спинки и со стороны корыта лопатки. Амплитудное значение колебаний лопатки по спекл – интерферограмме в центре тёмных полос со стороны корыта вычислялось по формуле [8] (кривая 1):

$$A_i = \frac{n_i}{4\pi} \cdot \lambda, \quad (2)$$

где i – номер экстремума функции Бесселя,

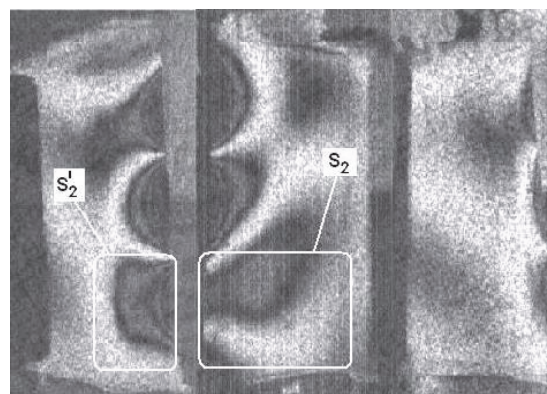


Рис. 7. Колебания турбинной лопатки на частоте $F=21827$ Гц

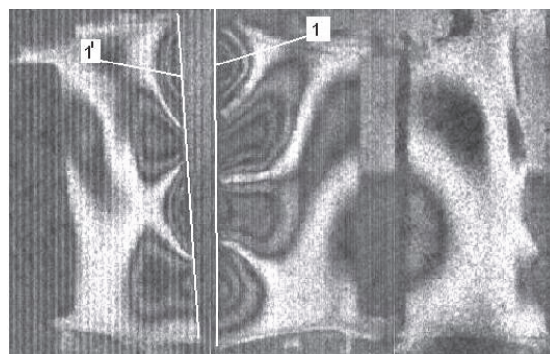


Рис. 8. Колебания турбинной лопатки на частоте $F=25310$ Гц:

1 – выходная кромка со стороны корыта; 1' – выходная кромка со стороны спинки

n_i – значение функции Бесселя в точке экстремума,

λ – длина волны используемого лазерного излучения ($\lambda = 632,8$ нм).

Ввиду того, что $\cos 45^\circ = 0,707$, амплитудное значение колебаний по спекл - интерферограмме в центре тёмных полос со стороны спинки вычислялось как (кривая 1^л):

$$A_i = \frac{n_i}{4\pi \cdot \cos \theta_2} \cdot \lambda = \frac{n_i}{4\pi \cdot 0,707} \cdot \lambda. \quad (3)$$

Значения амплитуды колебаний лопатки между центрами тёмных полос получены методом интерполяции. При построении эпюры вибро смещений учитывался также тот факт, что знак амплитуды колебаний при переходе через узловую линию меняется на противоположный. Однако то обстоятельство, что кривые 1 и 1' на рис.9 имеют нулевые значения при различных значениях L (участки (а) и (б)), указывает на возможную потерю целостности выходной кромки на этих участках.

Данные, полученные с помощью спекл – интерферометра по выявлению аномальных участков на турбинной лопатке, в ходе дальнейших исследований были подтверждены результатами металлографических исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Разработан спекл – интерферометр, позволяющий исследовать колебания турбинной лопатки со стороны корыта и со стороны спинки одновременно;

- в результате исследований, выполненных с помощью разработанной установки, были выявлены аномальные участки на поверхности турбинной лопатки;

- на одной из высших форм колебаний проявились нарушения структурной целостности лопатки на выходной кромке. При этом на входной кромке на всем исследуемом частотном диапазоне никаких отклонений обнаружено не было.

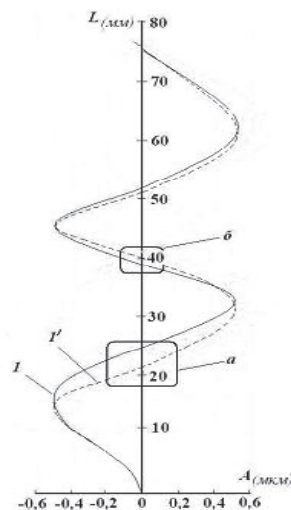


Рис. 9. Эпюра вибро смещений выходной кромки турбинной лопатки, колеблющейся на частоте $F=25310$ Гц:

1 – со стороны корыта; 1' – со стороны спинки

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Еленевский Д.С., Соляников В.А. Предельные состояния и ресурс лопаток турбин при многофакторном неизотермическом нагружении // Известия Самарского научного центра РАН. 1999. №2. С.325 – 328.
2. Голографические неразрушающие исследования [под ред. Р.К. Эрфа]. М.: Машиностроение. 1979. 446 с.
3. Разработка автоматизированного метода исследования вибрационных характеристик энергоустановок / О.А. Журавлёв, С.Ю. Комаров [и др.] // Компьютерная оптика. 2001. Т.21. С.7 – 11.
4. Study of a vibrating plate: comparison between experimental (ESPI) and analytical result / G. Romero, L. Alvares [et al.] // Optics and Lasers in Engineering. 2003. Vol. 40. P. 81-90.
5. Fiber optic phase stepping digital speckle-interferometer / J. Lamprecht, J. Kranz [et al.] // URL: <http://optik.uni-ellangen.de> (дата обращения 15.02.2012)
6. Джоунс Р., Уайкс К. Голографическая и спекл-интерферометрия. М.: Мир. 1986. 328 с.
7. Комаров С.Ю. Помехоустойчивый цифровой спекл-интерферометр для виброметрии объектов на основе метода усреднения во времени. Дисс. ... канд.тех. наук. Самара. 2004. 234 с.
8. Жужукин А.И., Соляников В.А. Применение поляризационного фильтра для увеличения соотношения сигнал/шум на спекл – интерферограммах // Компьютерная оптика. 2011. Т.35, №2. С.220 – 223.

SPECKLE-INTERFEROMETER FOR THE PANORAMIC STUDY OF THE BLADES TURBINE OSCILLATIONS

© 2012 A.I. Zhuzhukin, V.A. Solyannikov

JSC “KUZNETSOV”, Samara

Is developed, the speckle-interferometer with optical system which allows simultaneously to register the vibration mode of convex and concave surfaces of blade body. It allows detecting abnormal zones on the surfaces of cooled turbine blades and to check the quality of their production.

Key words: speckle – interferometry, vibration modes, non-destructive testing.