Заводское шоссе, 29 г. Самара, Российская Федерация 443009 cntkknio@yandex.ru

ДВУХДЛИННОВОЛНОВЫЙ СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТР ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВИБРАЦИЙ ДЕТАЛЕЙ ГАЗОТУРБИННЫХ А.И. Жужукин ДВИГАТЕЛЕЙ

ОАО «КУЗНЕЦОВ» Для исследования вибраций деталей газотурбинных двигателей разработан спекл-интерферометр, в оптическую схему которого включены два источника лазерного излучения с разной длиной волны. Это позволило повысить точность измерения вибраций за счёт экспериментальных точек. Построена увеличения количества эпюра вибросмещений входной кромки лопатки компрессора 7-й ступени по второй изгибной форме с использованием спеклинтерферограмм, полученных при разной длине волны применяемого лазерного излучения.

> Ключевые слова: виброметрия; спекл-интерферометрия; лазерные спеклы.

# 1 Ввеление

Анализ эксплуатационной надёжности газотурбинных двигателей (ГТД) показывает, что в большинстве случаев их работоспособность и ресурс определяется состоянием лопаток компрессора и турбины. Наиболее опасными дефектами этих деталей являются усталостные трещины, вызванные резонансными явлениями. Совпадение частоты возбуждающей силы с одной из собственных частот вызывает появление резонанса. резонансе При амплитуда колебаний возрастает, что может привести к быстрой поломке лопатки. Поэтому при проектировании и доводке компрессора или газовой турбины необходимо исследование вибрационных характеристик лопаток для того, чтобы по возможности отстроить их от частот возмущающих сил на рабочих режимах двигателя.

Резонансные частоты формы И колебаний деталей газотурбинных расчётными лвигателей определяют И экспериментальными методами. Несмотря на трудоёмкость и высокую стоимость эксперимента, подтверждение результатов математического моделирования экспериментальными остаётся методами обязательным условием достижения требуемого уровня надёжности лопаток ГТД. В настоящее время к наиболее эффективным экспериментальным методам определения вибрационных характеристик деталей относятся методы цифровой спеклинтерферометрии[1-3]. B большинстве применяемых на практике цифровых спекл – интерферометров (ЦСИ) используется установка с гладким опорным пучком и разделёнными ветвями, заимствованная из интерферометрии. голографической Оптическая схема такого интерферометра достаточно сложна и может быть собрана на специальном интерферометрическом столе, что ограничивает применение ЭТОГО устройства только условиями специализированной лаборатории

В работе [4] разработан ЦСИ, оптическая схема которого значительно упрощена за счёт использования спекл модулированного опорного пучка, сформированного с помощью фазового объекта – диффузора, расположенного перед исследуемым объектом. В этой работе реализован метод вычитания изображений. Характеристическая функция получаемой таким образом спекл-интерферограммы описывается следующим выражением:

$$M_{t}(x, y) = \left| J_{0} \begin{bmatrix} 4\pi A(x, y) / \lambda \end{bmatrix} \right|, \qquad (1)$$

где  $J_0$  - функция Бесселя первого рода нулевого порядка; A(x, y)амплитуда колебаний поверхности в точке  $(x, y); \lambda$  длина волны используемого лазерного излучения.

При регистрации ЭТОМ методе колебаний распределение амплитуд

исследуемого объекта восстанавливается по характеристической функции, описываемой формулой (1). Ввиду того, что  $J_0(0) = 1$ , линии, которые соответствуют узловые нулевой амплитуде колебаний. имеют максимальную яркость. Тёмные полосы на спекл-интерферограмме соответствуют нулям функции Бесселя. Для определения амплитуды колебаний точек поверхности, принадлежащих тёмной интерференционной установленным полосе с порядком, необходимо взять численное значение соответствующего нуля характеристической функции, приравнять его к величине  $4\pi A(x, y)$ рассчитать И величину амплитуды A(x, y)колебаний. Значения амплитуд вибросмещений между линиями центров тёмных полос определяются методами интерполяции. В дальнейшем поле деформаций получают с помощью дифференцирования поля вибросмещений. В точность вычисления поля этой связи

вибросмещений определяет точность расчёта деформаций, а также напряжений во всех точках поверхности исследуемой детали. Поэтому для повышения точности измерений необходимо иметь как можно больше экспериментальных точек.

Целью настоящей работы является увеличение количества экспериментальных точек для вычисления амплитуд вибросмещений при проведении динамических испытаний деталей методом спекл-интерферометрии.

#### 2 Экспериментальная часть

Для решения этой задачи 0A0 В «КУЗНЕЦОВ» базе ЦСИ на с совмещёнными пучками И спеклмодулированной опорной волной разработана установка, в оптической схеме которой используются два источника когерентного излучения с разной длиной волны (рисунок 1).



Рисунок 1. Оптическая схема двухдлинноволнового ЦСИ с совмещёнными пучками и спекл-модулированной опорной волной: 1 – лазер SLM – 417; 2 – лазер ЛГН -222; 3 – светоделитель; 4 – расширитель пучка; 5 – держатель диффузора; 6 – диффузор; 7 – исследуемая деталь; 8 – зажимное устройство; 9 – пьезовозбудитель; 10 – электромагнит; 11 – фотокамера

Установка работает следующим образом. Лучи света твёрдотельного лазера 1 ( $\lambda_1 = 532 \text{ нм}$ ) и гелий-неонового лазера 2 ( $\lambda_2 = 632,8 \text{ нм}$ ) совмещаются с помощью светоделителя 3 и, проходя расширительную линзу 4 и диффузор 6, освещают поверхность исследуемого объекта 7. В качестве объекта исследования выбрана лопатка компрессора 7-й ступени. При этом

лопатка крепится в зажимном устройстве 8 и возбуждается с помощью пьезоэлемента 9. Для получения спекл-интерферограмм реализуется метод вычитания изображений. В этом случае колеблющаяся лопатка 7 регистрируется фотокамерой 11 сначала при освещении лазером 1, при этом излучение от лазера 2 перекрывается. После этого путём перемещения диффузора 6 вдоль оптической оси с помощью электромагнита 10 фаза спеклов меняется на  $\pi$ , и полученная картина снова записывается фотокамерой 11. Затем оба изображения передаются в компьютер, где и производится вычитание зарегистрированных изображений по модулю. Чтобы получить спекл-интерферограмму с помощью лазера 2 (

 $\lambda_2 = 632,8$ нм), необходимо перекрыть излучение ОТ лазера И повторить 1 процедуру. результате В В памяти компьютера записываются две спеклинтерферограммы колеблющейся лопатки, записанные на разных длинах волн (рисунок 2).



Рисунок 2. Спекл – интерферограммы колеблющейся на частоте 5701 Гц лопатки 7-й ступени компрессора, полученные с помощью установки (Рисунок 1): а) λ<sub>1</sub>=532 нм; б) λ<sub>2</sub>=632,8 нм

Как известно, поперечные размеры спеклов, регистрируемых видеосистемой, определяются следующим образом:

$$b = 1,22\lambda(1+M)N_a,\tag{2}$$

где *М* – увеличение объектива; *N<sub>a</sub>* – отношение фокусного расстояния используемого объектива к его апертуре. Следовательно, согласно выражению (2), при одних и тех же условиях регистрации размеры спеклов на спекл-интерферограммах, полученных при зелёном

излучении ( $\lambda_1 = 532$  нм), будут меньше, чем при красном излучении  $(\lambda_2 = 632, 8)$ нм), а значит интерферограмма будет более мелкозернистой. Как показано в работе [5], в областях узловых линий на спеклинтерферограммах яркость изображения присутствующими определяется спеклрисунке 3 приведены в шумами. Ha увеличенном виде фрагменты узловых линий, отмеченных на рисунке 2.



Рисунок 3. Увеличенные фрагменты узловой линии на спекл-интерферограмме: а -  $\lambda_1$ =532 нм; б -  $\lambda_2$ =632,8 нм

Кроме того, проведённые измерения показали, что на спекл-интерферограмме, полученной при зелёном излучении, дисперсия шума в среднем на 30 % меньше, чем при использовании красного излучения. В ходе дальнейших исследований регистрировалась форма колебаний лопатки по второй изгибной форме (рисунок 4).



Рисунок 4. Спекл – интерферограммы колеблющейся на частоте 2233 Гц лопатки 7-й ступени компрессора, полученные с помощью установки (рисунок 1): а -  $\lambda_1$ =532 нм; б -  $\lambda_2$ =632,8 нм

Для построения эпюры вдоль выбранного сечения определялись координаты центров интерференционных полос и по номеру интерференционной полосы устанавливались значения амплитуд колебаний в точках с этими координатами. В данной работе для этих целей использован

алгоритм, описанный в работе [6]. Ha рисунке 5 приведён график эпюры вибросмещений лопатки по входной кромке, построенной использованием спеклс интерферограмм, представленных на рисунке 4.



Рисунок 5. Эпюра вибросмещений входной кромки лопатки компрессора 7-й ступени, колеблющейся на частоте 2233 Гц

Из рисунка 5 видно, что значения вибросмещений по входной кромке, полученные из рисунка 4 лежат на одной кривой. Поскольку координаты центров полос определялись недостаточно точно, то в отдельных точках имеют место отклонения от графика кривой. Тем не менее. использование двухдлинноволнового ЦСИ даёт возможность получать дополнительные экспериментальные точки, что позволяет более точно построить эпюру вибросмещений.

# 3 Заключение

Разработан спекл-интерферометр для исследования вибрационных характеристик деталей, в оптическую схему которого включены два источника лазерного излучения с разной длиной волны.

Проведена апробация разработанной установки при проведении вибрационных испытаний лопатки компрессора 7-й ступени.

Установлено, что дисперсия спекл-шума интерферограмме, полученной при на использовании зелёного излучения (  $\lambda_1 = 532$  нм), снижается в среднем на 30% сравнению интерферограммой, с ПО полученной использованием красного излучения  $\lambda_2 = 632,8$  нм.

Применение разработанной установки позволило увеличить количество экспериментальных точек для построения эпюры вибросмещений по входной кромке лопатки.

# Список использованных источников

[1] Джоунс Р., Уайкс К. Голографическая и спекл – интерферометрия. М.: Мир, 1986. 328с.

[2] Комаров С.Ю., Прокофьев А.Б., Шапошников Ю.Н., Щеглов Ю.Д. Исследование колебаний трубопровода методом цифровой спекл-интерферометрии // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, 2002. Т.4. № 1. С. 87 - 90.

[3] Журавлёв О.А., Шахматов Е.В., Крючков А.Н., Быстров Н.Д., Долгов А.И. Особенности цифрового спекл-интерферометра для определения вибрационных характеристик высоконагруженных элементов авиационного топливного насоса // Известия вузов. Авиационная техника, 2009. №4. С. 57 – 59.

[4] Жужукин А.И., Солянников В.А. Особенности применения цифровой фотокамеры в оптической схеме спекл-интерферометра для виброметрии деталей газотурбинных двигателей // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, 2013. Т.15. № 4. С.192 - 195.

[5] Жужукин А.И. Применение спеклинтерферометрии для исследования вибраций и статических деформаций деталей энергетических установок // Вестник Самарского государственного университета – Естественнонаучная серия, 2013. -№9/2 (110). - С. 80 – 86.

[6] Щеглов Ю.Д. Обработка спекл-изображений с использованием псевдоинтерферограмм // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва, 2012. - №3(34). - С. 125 – 132.

#### DOUBLE LONG-WAVELENGTH SPECKLE INTERFEROMETER FOR GAS-TURBINE ENGINE PARTS A.I. Zhuzhukin VIBRATION RESEARCH

JSC KUZNETSOV 443009 cntkknio@yandex.ru

To investigate gas-turbine engine parts vibration speckle interferometer Zavodskoye Shosse, 29 has been developed, an optical scheme of which includes two sources of Samara, Russian Federation *laser radiation with different wave length. This has made it possible to* increase vibration measurement accuracy due to experimental points number increase. A diagram of the 7-th stage compressor blade inlet edge vibratory displacements has been plotted according to the second flexural mode using speckle interferograms obtained at different length of the applied laser radiation.

words: vibrometry, speckle interferometry, laser speckles.

#### References

[1] Jones, R. and Wykes, C. (1986), Holographic and speckle interferometry, Moscow, Mir, 328 p.

[2] Komarov, S.Iu., Prokophiev, A.B., Shaposhnikov, Iu.N., Shcheglov, Iu.D. (2002), Pipeline vibration research by digital speckle interferometry method, Izvestija Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk, vol. 4, no.1. pp. 87-90.

[3] Zhuravlev, O.A., Shakhmatov, E.V, Kruchkov, A.N., Bystrov, N.D., Dolgov, A.I. (2009), Main features of digital speckle interferometer for definition of high-loaded aircraft fuel pump elements vibration characteristics, Izvestija vuzov. Aviazionnaja technika, no. 4, pp. 57 – 59.

[4] Zhuzhukin, A.I., Solyannikov, V.A. (2013), The utilization peculiarities of digital camera in the optical scheme of speckle pattern interferometer for vibrometry of gas turbine engines parts, Izvestija Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk, vol. 15, no. 4, pp. 192 - 195.

[5] Zhuzhukin, A.I. (2013), Application of speckle interferometry for research of electric power plant parts vibration and static deformation, Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo universiteta, no. 9/2 (110), pp. 80-86.

[6] Shcheglov, Iu.D. (2012), Processing speckle images using pseudo-interferograms, Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo ajerokosmicheskogo universiteta im. akademika S.P. Koroljova, no. 3(34), pp. 125 – 132.