

ДВУХДЛИННОВОЛНОВЫЙ СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТР ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СТАТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ ДЕТАЛЕЙ ТУРБОМАШИН

© 2016 А. И. Жужукин¹, М. Е. Колотников², В. А. Соляников¹

¹Публичное акционерное общество «КУЗНЕЦОВ», г. Самара

²Центральный институт авиационного моторостроения
имени П.И. Баранова, г. Москва

В оптической схеме спекл-интерферометра с совмещёнными пучками и спекл-модулированной опорной волной использованы два источника когерентного излучения с длиной волны 532 и 632,8 нм. Опорный пучок сформирован с помощью диффузора, расположенного перед исследуемым объектом. Применение двух источников излучения в оптической схеме позволило увеличить количество экспериментальных точек, что необходимо для повышения точности измерения статических перемещений поверхности исследуемой детали. С использованием дополнительных экспериментальных точек построена эпюра нормальных перемещений входной кромки лопатки компрессора 7-й ступени при изгибных деформациях. В качестве регистрирующего устройства применена цифровая фотокамера. С помощью длинноволнового спекл-интерферометра на разных длинах волн получены две спекл-интерферограммы при крутильном нагружении лопатки 9-й ступени компрессора. Предложено для нахождения нулевой полосы использовать изображение, представляющее собой произведение этих двух спекл-интерферограмм. Разработана методика определения нулевой полосы при крутильном нагружении для случая, когда прилегающая к заделке часть поверхности лопатки недоступна для наблюдения и на заделку выходит сразу несколько тёмных полос. Данная методика апробирована при определении нулевой полосы на спекл-интерферограмме, полученной при статическом крутильном нагружении лопатки 9-й ступени компрессора.

Статические деформации, спекл-интерферометрия, лазерные спеклы, нулевая полоса.

Надёжность и долговечность деталей турбомашин существенно зависят от точности расчёта на прочность конструкций в процессе их проектирования. Несмотря на то, что в настоящее время точность расчётных методов достаточно высока, при проведении численных исследований всегда возникает задача определения достоверности полученных результатов, особенно при расчёте конструкций сложной геометрической формы. Сочетание современных расчётных и экспериментальных методов позволяет наиболее эффективно проводить изучение полей деформаций и напряжений на поверхности и в объёме деталей и конструкций.

Из теории упругости известно, что механическое напряжение однозначно

определяется локальной относительной деформацией материала. Вследствие этого изменение формы объекта до и после нагрузки, то есть поле пространственных перемещений различных точек его поверхности, несёт информацию о распределении напряжений в материале исследуемого объекта. К наиболее современным и эффективным экспериментальным методам измерения линейных перемещений точек поверхности объекта относятся методы голографической и спекл-интерферометрии [1-5], причём в последнее десятилетие, в связи с высокой оперативностью и дешевизной эксперимента, наибольшее распространение получили методы спекл-интерферометрии.

Цитирование: Жужукин А.И., Колотников М.Е., Соляников В.А. Двухдлинноволновый спекл-интерферометр для исследования статических деформаций деталей турбомашин // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2016. Т. 15, № 2. С. 122-130. DOI: 10.18287/2412-7329-2016-15-2-122-130

При регистрации статических деформаций объекта методом цифровой спекл-интерферометрии особое внимание уделяется выбору оптической схемы интерферометра. В настоящее время разработаны оптические схемы интерферометров для определения деформационных перемещений как нормальных составляющих из плоскости объекта, так и тангенциальных перемещений в плоскости объекта. В данной работе рассматриваются деформации, когда нормальная составляющая перемещений существенно превышает тангенциальную составляющую.

В большинстве случаев при решении подобных задач используется оптическая схема цифрового спекл-интерферометра (ЦСИ) с гладкой опорной волной и разделёнными пучками [2]. Схемы таких ЦСИ оказываются громоздкими,

требующими тщательной юстировки и надёжной виброизоляции. В работе [4] для регистрации статических деформаций деталей турбомашин разработан ЦСИ с совмещёнными пучками и спекл-модулированной опорной волной, в котором опорный пучок сформирован с помощью диффузора, расположенного перед исследуемым объектом (рис. 1). Эта схема проста при юстировке, содержит малое число оптических элементов и обладает собственным запасом устойчивости к внешним воздействиям. Другим важным достоинством этой схемы является возможность использования цифровой фотокамеры в качестве регистрирующей системы, что позволяет значительно повысить качество записываемых спекл-интерферограмм.

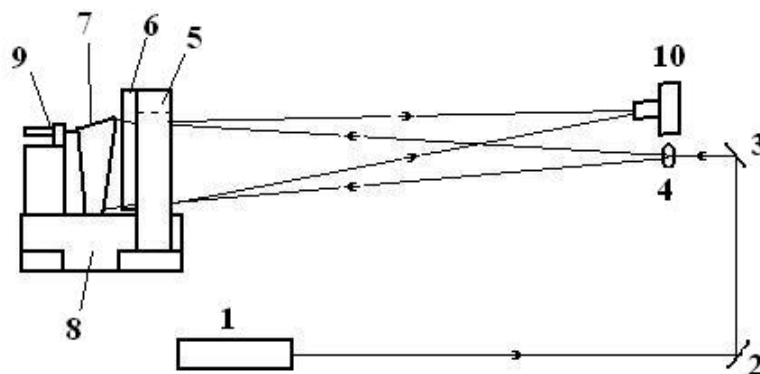


Рис. 1. Оптическая схема ЦСИ с совмещёнными пучками и спекл-модулированной опорной волной для измерения статических деформаций деталей:

1 – лазер; 2, 3 – поворотные зеркала; 4 – расширитель пучка; 5 – держатель диффузора; 6 – диффузор; 7 – исследуемая деталь; 8 – зажимное устройство; 9 – устройство нагружения; 10 – фотокамера

Принцип действия установки описан в работе [5]. Такой интерферометр обладает максимальной чувствительностью к нормальной компоненте вектора перемещений и в то же время не чувствителен к тангенциальной компоненте.

Яркость $B(x, y)$ изображения, наблюдаемого на экране монитора, описывается выражением [5]:

$$B(x, y) = \Phi(x, y) \cdot \left| \sin \frac{1}{2} \Delta\Psi(x, y) \right|, \quad (1)$$

где $\Phi(x, y)$ – случайная функция, обусловленная микрорельефом оптически шероховатой поверхности и разностью фаз предметного и опорного пучков; $\Delta\Psi(x, y)$ – изменение фазы, вызванное деформацией исследуемого объекта.

Изменение фазы между предметным и опорным пучками в любой точке поверхности объекта с координатами (x, y) , вызванное деформацией исследуемого объекта [1], определяется как

$$\Delta\Psi(x, y) = \frac{4\pi}{\lambda} d(x, y), \quad (2)$$

где $d(x, y)$ – смещение поверхности исследуемого объекта; λ – длина волны используемого лазерного излучения.

Отсюда нормальная компонента смещения поверхности исследуемого объекта в центрах тёмных полос определяется следующим образом:

$$d(x, y) = \frac{\lambda}{2} n, \quad (3)$$

где n – номер тёмной полосы ($n = 0; \pm 1; \pm 2; \dots$).

Для получения поля перемещений по всей поверхности исследуемой детали значения смещений между линиями центров полос определяются методами интерполяции. Ввиду того, что поле деформаций получают с помощью дифференцирования поля перемещений, точность вычисления поля перемещений определяет точность расчёта деформаций, а также напряжений во всех точках поверхности исследуемой детали. В этой связи для по-

вышения точности измерений при построении поля перемещений необходимо иметь как можно больше экспериментальных точек. Другой проблемой при проведении статических испытаний деталей турбомашин методами голографической и спекл-интерферометрии является вопрос определения нулевой полосы, что необходимо для присвоения каждой полосе номера n в формуле (3). В этом случае $n = 0$, что, согласно выражению (3), соответствует той области поверхности лопатки, которая в результате нагружения не смещается.

Целью представленной работы является повышение точности измерений при построении поля перемещений поверхности исследуемой детали при статических нагрузках путём увеличения количества экспериментальных точек, а также определение местонахождения нулевой полосы на спекл-интерферограмме.

Для достижения указанной цели в оптическую схему установки на рис. 1 введён ещё один источник излучения с другой длиной волны (рис. 2).

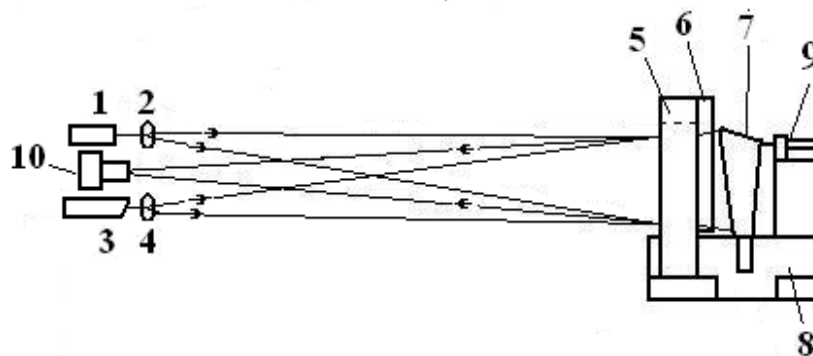


Рис. 2. Оптическая схема двухдлинноволнового ЦСИ с совмещёнными пучками и спекл-модулированной опорной волной:

1 – лазер SLM – 417; 2, 4 – расширитель пучка; 3 – лазер ЛГН – 222; 5 – держатель диффузора; 6 – диффузор; 7 – исследуемая деталь; 8 – зажимное устройство; 9 – устройство для статического нагружения; 10 – фотокамера

Установка работает следующим образом. Когерентное излучение ($\lambda_1 = 532$ нм) твёрдотельного лазера 1 расширяется с помощью линзы 2 и через диффузор 6 попадает на поверхность исследуемого объекта 7. Когерентное излу-

чение ($\lambda_2 = 632,8$ нм) гелий-неонового лазера 3, проходя расширительную линзу 4 и диффузор 6, освещает поверхность исследуемого объекта 7. В качестве объекта исследования выбрана лопатка компрессора 7-й ступени. Для получения спекл-

интерферограмм реализуется метод вычитания изображений. Исследуемая лопатка регистрируется в исходном ненагруженном состоянии с помощью фотокамеры 10 сначала при освещении лазером 1 (при этом излучение от лазера 3 перекрывается), затем при освещении только лазером 3. После этого лопатка нагружается с помощью устройства 9, как показано на рис. 3.

В результате деформации различные точки поверхности лопатки смещаются на различные расстояния, что приводит к возникновению разности фаз между предметным и опорным пучками согласно выражению (2), вследствие чего исходная спекл-структура, не меняясь в среднем, сильно изменяется в мелких деталях.

Затем нагруженная лопатка регистрируется отдельно при освещении лазе-

ром 1 и при освещении лазером 3. При реализации метода вычитания находятся два разностных изображения, представляющие собой две спекл-интерферограммы, полученные при освещении излучением $\lambda_1 = 532$ нм и $\lambda_2 = 632,8$ нм (рис. 4).

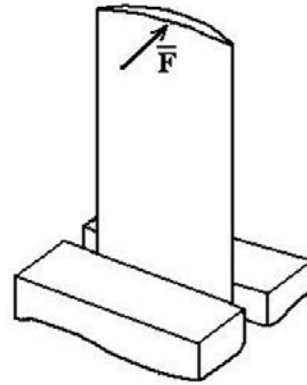


Рис.3. Схема нагружения лопатки при изгибе

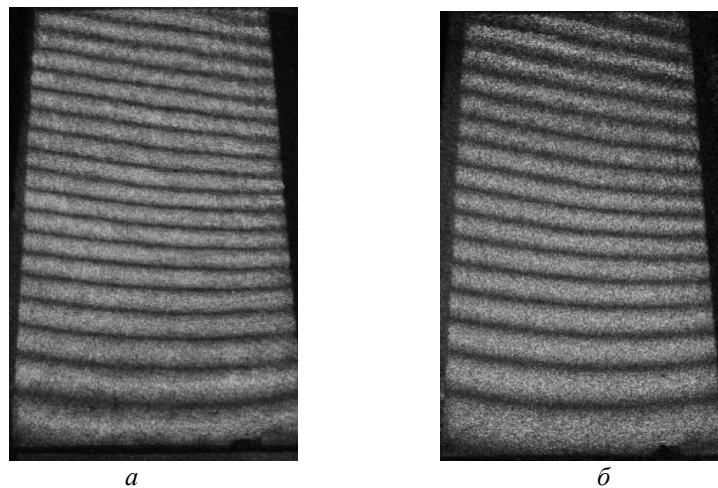


Рис.4. Спекл-интерферограммы деформационного поля перемещений лопатки 7-й ступени компрессора при изгибе, полученные с помощью установки на рис. 2:
а - $\lambda_1 = 532$ нм; б - $\lambda_2 = 632,8$ нм

С практической точки зрения наибольший интерес представляет информация о распределении смещений и деформаций по кромкам лопаток. Определение нулевой полосы в данном эксперименте не вызывает затруднений, так как очевидно, что это будет первая полоса вблизи заделки лопатки. Для построения эпюры смещений необходимо определить координаты центров интерференционных полос, а по номеру полосы установить значение величины смещения в точках с этими координатами, используя при этом

выражение (3). Наиболее простой путь определения координат точек, принадлежащих центрам интерференционных полос, приведён в [6]. Этот метод был использован в данной работе для построения эпюры смещений при статическом нагружении лопатки по входной кромке (на рис. 4, а и 4, б – левая кромка). Если обозначить L как расстояние точки от основания лопатки по входной кромке, то график эпюры смещений лопатки на этом участке будет выглядеть, как показано на рис. 5.

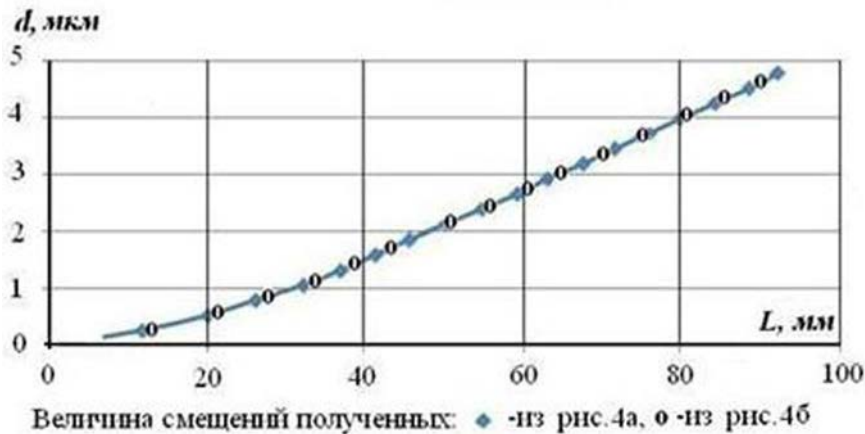


Рис. 5. Эюра смещений входной кромки лопатки компрессора 7-й ступени

Из рис. 5 видно, что значения смещений по входной кромке, полученные из рис. 4, а и рис. 4, б, лежат на одной кривой. Незначительные отклонения в отдельных точках, наблюдаемые при более крупном масштабе этого графика, связаны с погрешностью определения центров тёмных полос. Таким образом, использование двухдлинноволнового ЦСИ позволяет более точно построить эюру смещений благодаря большому количеству экспериментальных данных.

В ходе дальнейших испытаний лопатка была подвергнута статическому нагружению посредством кручения лопатки, как показано на рис. 6.

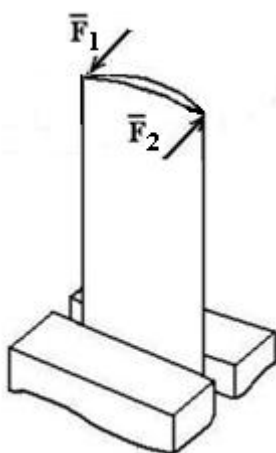


Рис.6. Схема нагружения лопатки при кручении

С помощью двухдлинноволнового ЦСИ получены две спекл-интерферограммы (рис. 7).

В соответствии с формулами (1)–(3) нулевая полоса является тёмной, но её местонахождение неизвестно.

Для нахождения нулевой полосы в данной работе предлагается использовать изображение, представляющее собой произведение спекл-интерферограмм, приведённых на рис. 7, а и рис. 7, б. В этом случае, как следует из формул (1) и (2), яркость результирующего изображения описывается выражением:

$$B_{1,2}(x, y) = \Phi_{1,2}(x, y) \left| \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda_1} d(x, y)\right) \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda_2} d(x, y)\right) \right| \quad (4)$$

где $\Phi_{1,2}(x, y)$ – случайная функция.

Интерференционные полосы определяются произведением двух синусоид с разным периодом. График этой функции без учёта $\Phi_{1,2}(x, y)$ представлен на рис. 8.

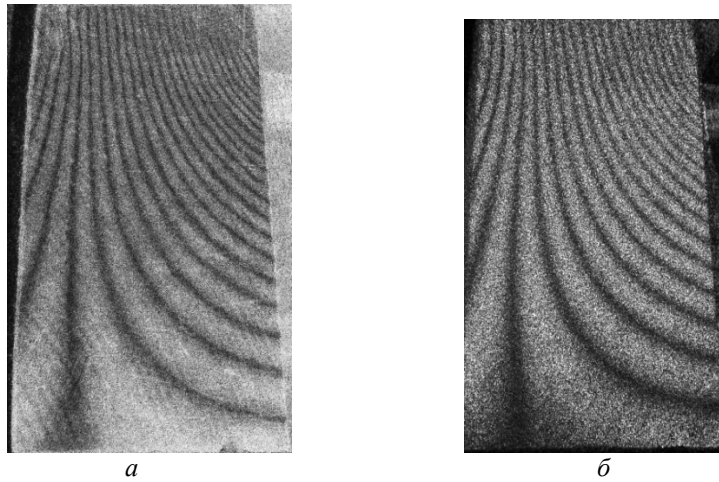


Рис. 7. Спекл-интерферограммы деформационного поля перемещений лопатки 7-й ступени компрессора, полученные при кручении: а - $\lambda_1 = 532$ нм; б - $\lambda_2 = 632,8$ нм

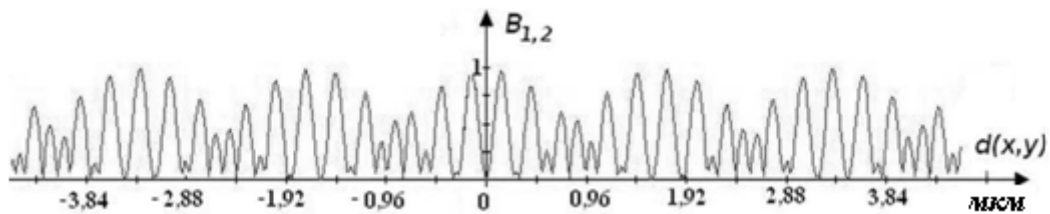


Рис. 8. Зависимость яркости интерференционных полос от величины перемещений на спекл-интерферограмме, полученной по формуле (4)

Как видно из рис. 8, на этой интерферограмме нулевая полоса ($d(x, y) = 0$) также является тёмной. Рядом с ней с каждой стороны должны наблюдаться по две светлые полосы, а дальше с ростом $d(x, y)$ контраст ухудшается. Однако для определения нулевой полосы этого недостаточно, так как при $d(x, y) \approx 1,59$ мкм, а также при $d(x, y) \approx 3,18$ мкм и т.д. эта ситуация повторяется. То же самое наблюдается и при отрицательных перемещениях. Но с учётом условий проведения эксперимента (нулевая полоса должна выходить на заделку) можно определить местонахождение нулевой полосы на спекл-интерферограмме, как это показано на рис. 9.

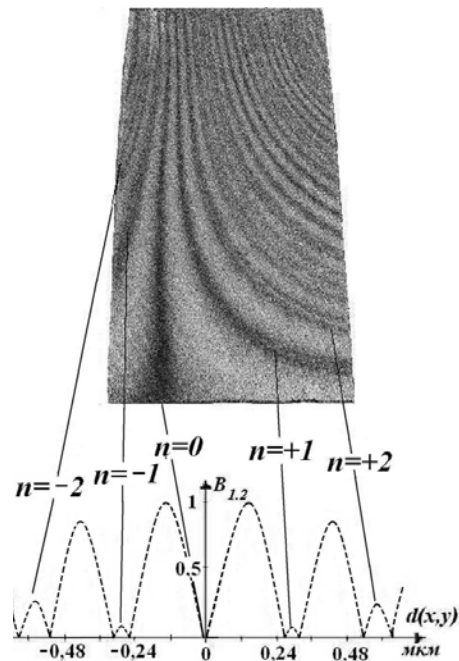


Рис. 9. Определение нулевой полосы на спекл-интерферограмме при статических деформациях с использованием двухдлинноволнового спекл-интерферометра



Рис. 10. Определение нулевой полосы на спекл-интерферограмме лопатки 9-й ступени компрессора в случае, когда нижняя часть лопатки недоступна для наблюдения

На рис. 9 приведён наиболее простой случай, когда только одна тёмная полоса выходит на заделку лопатки, именно она и является нулевой.

Однако данная методика может быть использована и для более сложного случая, когда прилегающая к заделке часть

недоступна для наблюдения и на нижнюю часть интерферограммы выходит сразу несколько тёмных полос (рис. 10).

Применяя тот же подход, что и в предыдущем случае (рис. 9), нулевую полосу можно легко определить.

Таким образом: разработан спекл-интерферометр для исследования статических деформаций объектов, в оптическую схему которого включены два источника лазерного излучения с разной длиной волны; проведена апробация разработанной установки при исследовании статических деформаций лопатки компрессора 7-й ступени; применение разработанной установки позволило увеличить количество экспериментальных точек для построения эпюры статических смещений по входной кромке лопатки; разработана методика определения нулевой полосы на спекл-интерферограммах при крутильных статических деформациях.

Библиографический список

1. Джоунс Р., Уайкс К. Голографическая и спекл-интерферометрия. М.: Мир, 1986. 327 с.
2. Еленевский Д.С., Шапошников Ю.Н. Лазерно-компьютерная система анализа спекл-интерферограмм вибрирующих объектов // Известия Самарского научного центра РАН. 1999. Т. 1, № 1. С. 134-136.
3. Макаева Р.Х., Каримов А.Х., Царёва А.М. Применение голографической интерферометрии для контроля качества паяных и сварных соединений // Авиационно-космическая техника и технология. 2013. № 7(104). С. 7-11.
4. Жужукин А.И., Соляников В.А. Применение цифровой фотокамеры в оптической схеме спекл-интерферометра для исследования статических деформаций деталей газотурбинных двигателей // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С. П. Королёва (национального исследовательского университета). 2012. № 4(35). С. 155-161.
5. Журавлев О.А., Комаров С.Ю., Сергеев Р.Н. Нагрузочное устройство для тестирования мобильных цифровых спекл-интерферометров деформационных перемещений // Вестник Самарского государственного университета. 2013. № 9/2(110). С. 87-96.
6. Щеглов Ю.Д. Обработка спекл-изображений с использованием псевдоинтерферограмм // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С. П. Королёва (национального исследовательского университета). 2012. № 3(34), ч. 2. С. 125-132.

Информация об авторах

Жужукин Анатолий Иванович, кандидат технических наук, инженер-конструктор конструкторского научно-исследовательского отделения, ПАО «КУЗНЕЦОВ». E-mail: cntkknio@yandex.ru. Область научных интересов: голографическая и спекл-интерферометрия.

Колотников Михаил Ефимович, доктор технических наук, начальник отдела, ЦИАМ им. П.И. Баранова. E-mail: cntkknio@yandex.ru. Область научных интересов: динамика и прочность деталей турбомашин.

Соляников Виктор Анатольевич, кандидат технических наук, начальник конструкторского научно-исследовательского отделения ПАО «КУЗНЕЦОВ». Область научных интересов: поузловая доводка турбомашин по параметрам прочности, надёжности и ресурсу.

DOUBLE WAVELENGTH SPECKLE INTERFEROMETER FOR THE RESEARCH OF STATIC DEFORMATIONS OF GAS TURBINE ENGINE PARTS

© 2016 A. I. Zhuzhukin¹, M. E. Kolotnikov², V. A. Solyannikov¹

¹Public Company «Kuznetsov», Samara, Russian Federation

²Central Institute of Aviation Motors named after P.I. Baranov, Moscow, Russian Federation

Two coherent radiation sources with the wavelength of 532 nm and 632.8 nm are used in a speckle interferometer optical arrangement with combined beams and speckle-modulated background wave. The reference beam is formed with the help of a diffuser located in front of the object under investigation. The use of two radiation sources in the optical arrangement makes it possible to increase the number of experimental points, which is necessary for improving the accuracy of measuring static displacements of the surface of the part under investigation. A diagram of normal displacements of the leading edge of a blade of the 7th compressor stage under bending deformations has been plotted using additional experimental points. A digital still camera is used as a registering device. Two speckle-interferograms have been obtained at different wavelengths of a blade of the 9th compressor stage under torsion with the use of the long-wavelength speckle interferometer. It was proposed to use a pattern that represents the product of these two speckle-interferograms in order to determine the zero band. A method of determining the zero band under torsion has been developed for the case when the part of the blade surface adjoining the attaching point is not available for observation and several shadow bands fall on the attaching point at once. This methodology has been tested for zero band determination on a speckle-interferogram obtained under static torsion of a blade of the 9th compressor stage.

Static deformations, speckle interferometry, laser speckles, zero band.

References

1. Jones R., Wykes C. Holographic and speckle interferometry. Cambridge: Cambridge University Press, 1983. 342 p.
2. Yelenevsky D.S., Shaposhnikov Yu.N. Computer-aided laser systems for obtaining of vibrating objects speckle-interferograms and their analysis. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN*. 1999. V. 1, no. 1. P. 134-136. (In Russ.)
3. Makayeva R.H., Karimov A.H., Tzareva A.M. Application of holographic interferometry for the testing of quality of the soldered and welded joint. *Aerospace Technic and Technology*. 2013. No. 7 (104). P. 7-11. (In Russ.)

Citation: Zhuzhukin A.I., Kolotnikov M.E., Solyannikov V.A. Double wavelength speckle interferometer for the research of static deformations of gas turbine engine parts. *Vestnik of the Samara State Aerospace University*. 2016. V. 15, no. 2. P. 122-130. DOI: 10.18287/2412-7329-2016-15-2-122-130

4. Zhuzhukin A.I., Solyannikov V.A. Using a digital camera in a speckle-interferometer optical scheme for the analysis of static deformations in gas turbine engine elements. *Vestnik of the Samara State Aerospace University*. 2012. No. 4 (35). P. 155-161. (In Russ.)

5. Zhuravlyov O.A., Komarov S.Yu., Sergeev R.N. Load device for testing mobile digital speckle interferometers of deformative displacements. *Vestnik of Samara State University*. 2013. No. 9/2 (110). P. 87-96. (In Russ.)

6. Shcheglov Yu.D. Processing speckl images using pseudo-interferograms. *Vestnik of the Samara State Aerospace University*. 2012. No. 3(34), part 2. P. 125-132. (In Russ.)

About the author

Zhuzhukin Anatoly Ivanovich, Candidate of Science (Engineering), design engineer of the Design Research Department, Public Company «KUZNETSOV», Samara, Russian Federation. E-mail: cntkknio@yandex.ru. Area of Research: holographic and speckle-interferometry.

Kolotnikov Mikhail Yefimovich, Doctor of Science (Engineering), Head of department, Central Institute of Aviation Motors named after P.I. Baranov, Moscow, Russian Federation. E-mail: cntkknio@yandex.ru. Area of Research: dynamics and strength of gas turbine engine parts, gas turbine engine unit development according to strength, reliability and life time parameters.

Solyannikov Victor Anatolyevich, Candidate of Science (Engineering), Head of Design Engineering Research Department, Public Company «KUZNETSOV», Samara, Russian Federation. Area of Research: gas turbine engine unit development according to strength, reliability and life time parameters.