

УДК 621.375

ПРИМЕНЕНИЕ ЦИФРОВОЙ ФОТОКАМЕРЫ В ОПТИЧЕСКОЙ СХЕМЕ СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТРА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СТАТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ ДЕТАЛЕЙ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

© 2012 А. И. Жужукин, В. А. Соляников

ОАО «КУЗНЕЦОВ», г. Самара

Спекл-интерферометр с совмещёнными пучками и спекл-модулированной опорной волной доработан и использован для исследования деформационных перемещений лопатки компрессора при статических испытаниях. В оптической схеме интерферометра для регистрации спекл-интерферограмм применена фотокамера. Это позволило повысить контраст интерференционных полос и увеличить диапазон допустимых деформационных перемещений.

Деформационные перемещения, спекл-интерферометрия, лазерные спеклы, спекл-шум.

В настоящее время для изучения напряжённо-деформированного состояния (НДС) деталей и узлов конструкций авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) широко применяются расчётные методы. Точность современных расчётных методов очень высока и позволяет проектировать детали с высокой прочностью и надёжностью. Однако при проведении численных исследований всегда возникает задача определения достоверности полученных результатов. Поэтому экспериментальная оценка НДС деталей является обязательным и завершающим этапом при исследовании работоспособности, долговечности и надёжности деталей и узлов конструкций ГТД.

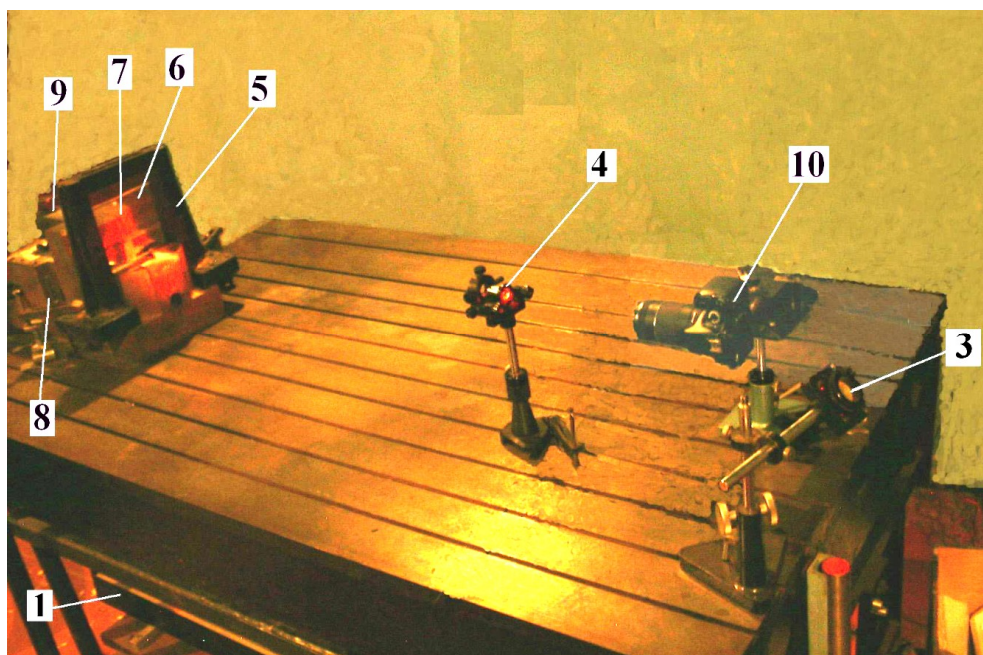
Для экспериментального определения НДС деталей и узлов авиационных двигателей применяются разные методы, в которых используются различные принципы измерений. К одним из наиболее эффективных средств относятся методы голографической интерферометрии [1] и цифровой спекл-интерферометрии [2]. Применение голографических методов связано с использованием высокоразрешающих регистрирующих сред с присущей им технологией фотохимической обработки, что делает испытания длительными и трудоёмкими. Развитые в последние годы методы цифровой спекл-интерферометрии свободны от этих недостатков и позволяют получать интерфе-

ренционную картину непосредственно на экране монитора, не используя при этом никаких промежуточных фоторегистрирующих носителей.

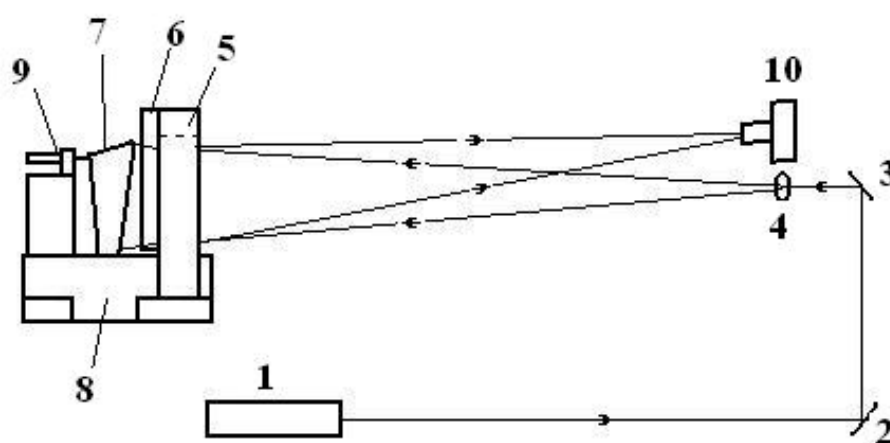
При регистрации деформации объекта методом цифровой спекл-интерферометрии особое внимание уделяется выбору оптической схемы интерферометра. Для этих целей в большинстве случаев используется оптическая схема цифрового спекл-интерферометра (ЦСИ) с гладкой опорной волной и разделёнными пучками [3]. Схемы таких ЦСИ оказываются громоздкими, требующими тщательной юстировки и надёжной виброизоляции, особенно при исследованиях НДС деталей при статических нагрузках. В работе [4] при исследовании температурных деформаций для повышения помехоустойчивости потребовалась разработка специального алгоритма. В настоящее время разработан ЦСИ, в котором оптическая схема несколько упрощена за счёт формирования предметного и опорного пучка путём деления по волновому фронту и использования спекл-модулированной опорной волны [5]. Однако недостатком этого интерферометра является невысокая эффективность использования лазерного излучения. Кроме того, эта схема сложна при юстировке и требует проведения мероприятий по обеспечению виброзащиты. В работе [6] для исследования вибраций деталей ГТД разработан

ЦСИ с совмещёнными пучками и спекл-модулированной опорной волной, в котором опорный пучок сформирован с помощью диффузора, расположенного перед исследуемым объектом. Эта схема проста в юстировке, содержит малое число оптических элементов и обладает собственным

запасом устойчивости к внешним воздействиям. В данной работе этот интерферометр был доработан и использован при статических нагружениях для регистрации деформационных перемещений, перпендикулярных поверхности объекта (рис. 1).



а



б

Рис. 1. Общий вид и оптическая схема спекл-интерферометра для измерения статических деформаций деталей ГТД: 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

Другой важной проблемой цифровой спекл-интерферометрии является недостаточный уровень контраста получаемых спекл-интерферограмм диффузных объектов из-за высокого вклада спекл-шумов. Поскольку спекл-шумы имеют мультипликативный характер, то создание эффективных алгоритмов для фильтрации шумов на спекл-интерферограммах затруднительно, что усложняет автоматизированную обработку интерферограмм. Первостепенное значение в этом случае имеет разработка средств уменьшения спекл-шумов на этапе проведения эксперимента. В данной работе в оптической схеме ЦСИ с совмещёнными пучками и спекл-модулированной опорной волной путём включения в схему высокоразрешающей фотокамеры вместо телекамеры с низким разрешением удалось добиться уменьшения уровня спекл-шумов на спекл-интерферограммах.

Когерентное излучение лазера 1 с помощью поворотных зеркал 2, 3 и линзы 4, проходя диффузор 6, освещает поверхность исследуемой детали 7. При этом образуются два спекл-поля: от диффузной поверхности исследуемой детали 7 и от диффузора 6. Результирующее спекл-поле, образованное в результате когерентного сложения двух спекл-полей, регистрируется с помощью фотокамеры 10. Отличительной особенностью данной установки является то обстоятельство, что диффузор 6 жёстко прикреплен к держателю 5 с помощью винтов. Держатель 5 выполнен в виде массивной рамы и притянут к зажимному устройству 8 болтами. Таким образом, исключаются относительные перемещения между диффузором 6 и исследуемым объектом 7, которые могут быть вызваны случайными внешними воздействиями.

Первоначально исследуемая лопатка регистрируется в исходном, ненагруженном состоянии. Комплексная амплитуда опорного E_r и предметного E_s пучков:

$$\begin{aligned} E_r &= e_r \exp(i\varphi_r), \\ E_s &= e_s \exp(i\varphi_s), \end{aligned} \quad (1)$$

где e_r, e_s и φ_r, φ_s – случайно меняющиеся амплитуды и фазы спеклов опорной и предметной волн.

Фотоприёмная матрица фотокамеры 10 регистрирует результирующую интенсивность:

$$I_1 = I_r + I_s + 2\sqrt{I_r I_s} \cos(\Delta\varphi), \quad (2)$$

где $I_r = E_r E_r^*$; $I_s = E_s E_s^*$; $\Delta\varphi = \varphi_r - \varphi_s$.

Затем лопатка 7 нагружается с помощью нагрузочного приспособления 9, снабжённого микрометрическим винтом, в результате чего она деформируется и результирующая интенсивность выразится формулой

$$I_2 = I_r + I_s + 2\sqrt{I_r I_s} \cos(\Delta\varphi + \Delta\phi), \quad (3)$$

где $\Delta\phi$ – разность фаз между предметным и опорным пучками, вызванная деформацией. В случае, когда направление смещения, вызванное деформацией, нормально к поверхности,

$$\Delta\phi = 4\pi d / \lambda, \quad (4)$$

где d – смещение поверхности исследуемого объекта; λ – длина волны используемого лазерного излучения.

В работе [7] показано, что корреляция между I_1 и I_2 определяется:

$$\rho(I_1, I_2) = (1 + \cos\Delta\phi) / 2. \quad (5)$$

Это означает, что корреляционная связь между I_1 и I_2 максимальна при

$$\Delta\phi = 2\pi n, \quad (6)$$

где $n = 0, 1, 2, \dots$,

что соответствует смещениям

$$d = \frac{\lambda}{2} n. \quad (7)$$

Функция корреляции обращается в нуль при

$$\Delta\phi = (2n + 1)\pi. \quad (8)$$

Смещения в этом случае:

$$d = \frac{\lambda}{2} (n + 1/2). \quad (9)$$

Если из изображения деформированного объекта (3) вычесть ранее зарегистрированное изображение объекта в исходном состоянии (2), то в точках, где выполняется условие (6), возникают тёмные полосы, а в точках, где выполняется условие (8), возникают светлые полосы. Мак-

симальное число полос, которое можно получить на спекл-интерферограмме, ограничивается размерами спеклов. Необходимым условием для наблюдения интерференционных полос в спекл-интерферометрии является [7]:

$$K > 5, \quad (10)$$

где K – отношение интервала между интерференционными полосами и размерами спеклов.

При этом поперечные размеры спеклов, регистрируемых видеосистемой, определяются по выражению

$$b = 1,22\lambda(1 + M)N_a, \quad (11)$$

где M – увеличение объектива; N_a – отношение фокусного расстояния используемого объектива к его апертуре.

В спекл-интерферометрии, как правило, $M \ll 1$. Следовательно, для наблюдения максимального числа интерференционных полос необходимо устанавливать минимальное N_a . Однако размер спеклов, формируемых объективом, должен быть таким, чтобы спеклы разреша-

лись телекамерой. Особенно это актуально для ЦСИ со спекл-модулированной опорной волной, так как при интерференции двух спекл-полей средний размер спеклов уменьшается [8]. Это накладывает жёсткие ограничения на величину N_a . Экспериментально установлено, что в случае использования телекамеры MTV – 4363 СА, обеспечивающей регистрацию в стандартном телевизионном формате 640x480, для ЦСИ со спекл-модулированной опорной волной необходимо выбирать $N_a = 22$. Использование цифровых фотокамер в этом случае предпочтительнее, так как они обладают значительно большей разрешающей способностью, чем телекамеры. Для цифровой фотокамеры Canon EOS 1100D с разрешением 4272x2848 оптимальным является $N_a = 5,6$. На рис. 2 показаны результаты исследований деформаций 10-й ступени лопатки компрессора, полученные с помощью установки, показанной на рис.1.

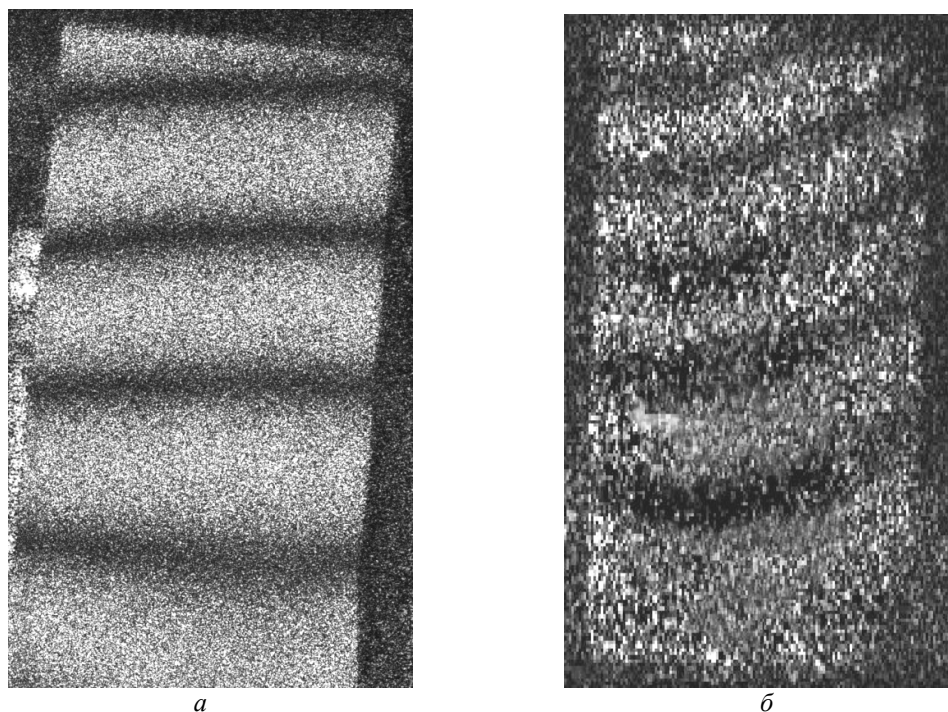


Рис. 2. Спекл-интерферограммы деформационного поля перемещений лопатки 10-й ступени компрессора, полученные с помощью:
а - фотокамеры Canon EOS 1100D; б - телекамеры MTV – 4363 СА

Погрешность вычисления значений деформационных перемещений при количественной интерпретации спекл-интерферограмм определяется погрешностью определения центров тёмных полос, которая, в свою очередь, связана с контрастом интерференционных полос выражением [9]

$$\Delta S = \pm \frac{1}{\pi} \arccos \left(2 - \frac{1}{V} \right), \quad (12)$$

где V – контраст интерференционных полос.

Ввиду того, что полоса на спекл-интерферограмме формируется спекл-структурой, для оценки контраста интерференционных полос в работе использована величина усреднённого контраста V_{cp} полосы, которая вычислялась как

$$V_{cp} = \frac{B_{cp(max)} - B_{cp(min)}}{B_{cp(max)} + B_{cp(min)}}, \quad (13)$$

где $B_{cp(max)}$ – средняя яркость по центру светлой полосы; $B_{cp(min)}$ – средняя яркость по центру тёмной полосы.

Проведённые измерения показали, что для различных участков спекл-интерферограммы, представленной на рис. 2, а, $V_{cp} \in [0,39; 0,46]$, в то время как в пределах спекл-интерферограммы, представленной на рис. 2, б, $V_{cp} \in [0,27; 0,32]$. Кроме того, применение цифровой фотокамеры Canon EOS 1100D для регистрации спекл-интерферограмм позволяет увеличить число наблюдаемых интерференционных полос (рис.3).

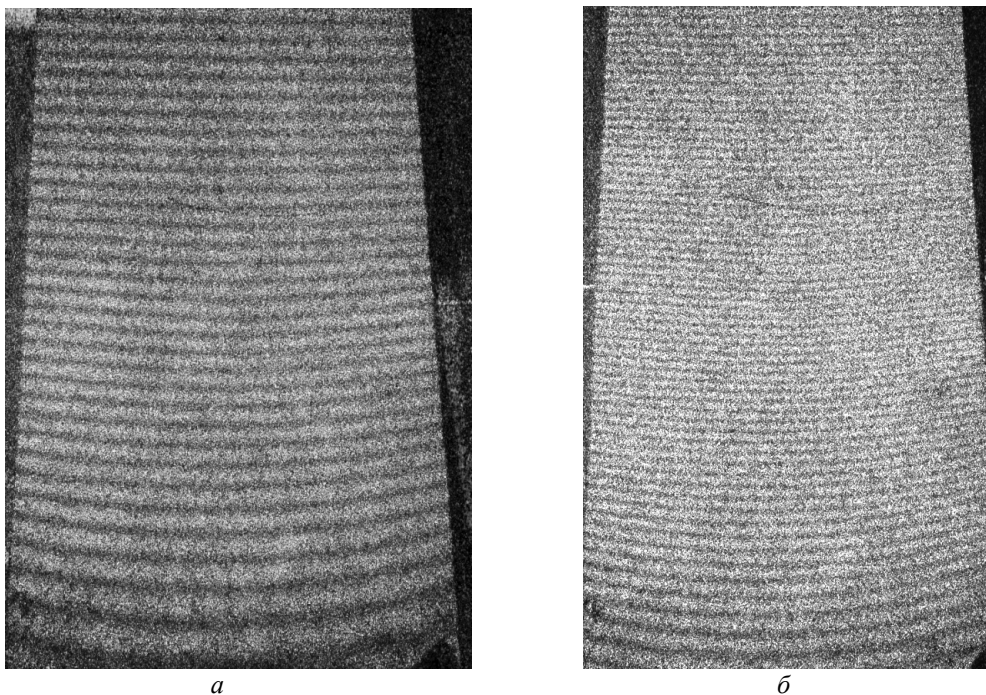


Рис. 3. Спекл-интерферограммы лопатки компрессора, полученные при различных статических нагрузках

Это является другим важным преимуществом применения фотокамеры. С помощью телекамеры MTV – 4363 СА можно зарегистрировать не более 6 интерференционных полос. Согласно (7), это означает, что деформационные перемещения верхней кромки исследуемой лопатки компрессора равны 1,9 мкм. При-

менение фотокамеры позволило зафиксировать спекл-интерферограммы с 32 (рис. 3, а) и 62 (рис. 3, б) интерференционными полосами. Деформационные перемещения при этом составляют 10,1 мкм и 19,6 мкм, что соответствовало показаниям микрометрического винта устройства нагружения 9 на рис. 1.

Выводы

1. В оптической схеме ЦСИ с совмещёнными пучками и спекл-модулированной опорной волной выявлена и экспериментально подтверждена возможность применения цифровой фотокамеры для регистрации спекл-интерферограмм.

2. ЦСИ с совмещёнными пучками и спекл-модулированной опорной волной после доработок, заключающихся в создании жёсткой конструкции держателя диффузора и исключения относительных перемещений между диффузором и исследуемым объектом, применён для исследования деформационных перемещений лопаток ГТД.

3. В разработанном ЦСИ при статических испытаниях использование цифровой фотокамеры позволило повысить контраст интерференционных полос более чем на 30%.

4. Применение цифровой фотокамеры Canon EOS 1100D вместо телекамеры MTV – 4363 CA в разработанном ЦСИ привело к увеличению диапазона допустимых деформационных перемещений с 1,9 мкм до 19,6 мкм.

Библиографический список

1. Макаева, Р. Х. Голографическая интерферометрия при конструкторской доводке лопаток компрессора ГТД [Текст] / Р. Х. Макаева, М. Г. Хабибуллин, А. Х. Каримов // Изв. вузов. Авиационная техника. - 1999. - №2. - С. 72–74.

2. Цифровая голографическая интерферометрия как метод анализа деформаций. Современное состояние и перспективы развития [Текст] / В. С. Гуревич, М. Е. Гусев, В. Е. Гапонов и др. // Сбор-

ник трудов 7-й Международной научно – практической конференции «Голография – наука и практика», Москва, 28-30 сентября 2010. - М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2010. - С. 350-357.

3. Формирование спеклограмм в оптико-электронной схеме лазерного цифрового спекл-интерферометра [Текст] / О. А. Журавлёв, С. Ю. Комаров, Ю. Н. Шапошников [и др.] // Межвузовский научный сборник. «Естествознание, экономика, управление». – Самара: СГАУ, 2002. - Т.1. - Вып.3. - С. 55-62.

4. Сергеев, Р. Н. Применение цифрового спекл-интерферометра с непрерывным лазером для исследований неустановившихся температурных деформаций [Текст] / Р. Н. Сергеев // Изв. Самар. науч. центра РАН. - 2011. - №4. - С. 628–631.

5. Каленков, Г. Цифровая корреляционная спекл-интерферометрия [Текст] / Г. Каленков, А. Штанько // Фотоника. - 2010. - №4. - С. 25–28.

6. Жужукин, А. И. Мобильный спекл-интерферометр для исследования форм колебаний вибрирующих объектов во внестеновых условиях [Электронный ресурс] / А. И. Жужукин // Труды МАИ.- 2011. - №48. URL:

<http://www.mai.ru/science/trudy/>

7. Джоунс, Р. Голографическая и спекл-интерферометрия [Текст] / Р. Джоунс, К. Уайкс – М.: Мир, 1986. – 328 с.

8. Ульянов, С. С. Что такое спеклы [Текст] / С. С. Ульянов // Соровский образовательный журнал. - 1999. - №5. - С. 112–116.

9. Козачок, А. Г. Голографические методы исследования в экспериментальной механике [Текст] / А. Г. Козачок – М.: Машиностроение, 1984. – 175 с.

USING A DIGITAL CAMERA IN A SPECKLE – INTERFEROMETER OPTICAL SCHEME FOR THE ANALYSIS OF STATIC DEFORMATIONS IN GAS TURBINE ENGINE ELEMENTS

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

«KUZNETSOV» plc, Samara

The article deals with a speckle-interferometer modification with a speckle-modulated reference wave and bunches passing the same optical way by means of including a digital camera in the speckle-interferometer optical scheme. The modified speckle-interferometer is used for the analysis of compressor blade deformation displacements during static tests. The use of a digital camera makes it possible to increase the image contrast of interference bands and the range of acceptable deformation displacements.

Deformation displacements, speckle – interferometry, laser speckles, speckle – noise.

Информация об авторах

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

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

Zhuzhukin Anatoly Ivanovich, design engineer of the design research department, “Kuznetsov”plc. E-mail: cntknio@yandex.ru. Area of research: holographic and speckle-interferometry.

Solyannikov Victor Anatolyevich, candidate of technical science, head of the design research department, “Kuznetsov”plc. Area of research: operational development of gas turbine engine elements in terms of their service life, reliability and strength parameters.