УДК 535.35

ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ ВОЗДУШНОГО СУДНА МЕТОДОМ СПЕКЛ-СТРУКТУР ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ЗОНДИРОВАНИИ СПИРАЛЬНЫМИ ЛАЗЕРНЫМИ ПУЧКАМИ

© 2012 П.В.Павлов¹, А.Н.Малов², Н.В. Петров³

¹ Военный учебно-научный центр военно-воздушных сил "Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина", г. Воронеж ² Амурский государственный университет, г. Благовещенск ³Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики

Поступила в редакцию 10.10.2012

Представлены результаты численного моделирования и экспериментального исследования применения спиральных пучков лазерного излучения для неразрушающего контроля профиля лопаток авиационных двигателей. Дана оценка эффективности применения спиральных пучков по отношению к плоскому волновому фронту.

Ключевые слова: спекл, автокорреляционная функция, неразрушающий контроль, спиральные пучки.

В условиях реформирования Вооружённых сил РФ и острой необходимости обновления самолетного парка, перед строевыми частями военно-воздушных сил (ВВС) ставятся задачи по повышению качества обслуживания и эксплуатации авиационной техники (АТ), а также по продлению ее ресурсов. Промышленностью с целью продления ресурса и перехода к эксплуатации по техническому состоянию ВС выпущен ряд нормативных документов и бюллетеней, регламентирующих перечень допустимых повреждений и дефектов авиационных деталей с которыми разрешается их дальнейшая эксплуатация.

Устройства неразрушающего контроля (НК), которые на сегодняшний момент находятся на вооружении строевых частей ВВС РФ (эндоскопы, увеличительные лупы и т.д.) не удовлетворяют требованиям нормативной документации промышленности, так как результат их измерений носит субъективный характер. Таким образом, имеет место несоответствие между требованиями предъявляемые промышленностью к устройствам НК и возможностью устройств НК, которыми на сегодняшний момент обеспечены строевые части ВВС РФ.

Анализ оптических и лазерных методов НК показал, что из совокупности методических и технических приемов, обеспечивающих требования промышленности, следует метод спеклструктур оптического излучения (МССОИ), основанный на анализе спекл-картин, образующихся при отражении когерентного оптического излучения от шероховатой поверхности контролируемого объекта [1]. Регистрируемые спекл-структуры несут информацию о рассеивающих свойствах объектов, поэтому исследование их характеристик актуально как с фундаментальной, так и с прикладной точек зрения.

Наличие современной элементной базы оптоэлектроники - полупроводниковых лазерных модулей, ПЗС-матриц и возможность реализации множества разнообразных алгоритмов обработки изображений на портативных ЭВМ позволяют приступить к созданию мобильных средств диагностики поверхностей авиационных деталей в полевых условиях на высоком технологическом уровне.

В работе выдвигается гипотеза о том, что если в качестве зондирующего волнового фронта в место плоского использовать спиральный, то чувствительность и разрешающая способность метода спекл-структур оптического излучения могут повыситься. Формирование спиральных пучков происходит за счет включения в оптическую систему дифракционного оптического элемента ДОЭ [5]. Исследованиям спеклполей и спиральных пучков посвящены многочисленные исследования и публикации российских учёных-оптиков и их зарубежных коллег [2-8]. Однако инженерно-технические аспекты их применения спиральных пучков пока недостаточно проработаны, кроме как для задач манипулирования микрообъектами [9].

Павлов Павел Владимирович, кандидат технических наук, преподаватель. E-mail: pashok8208@mail.ru Малов Александр Николаевич, доктор физико-математических наук, профессор кафедры теоретической и экспериментальной физики. E-mail: cohol2007@yandex.ru Петров Николай Владимирович, кандидат физико-математических наук, младший научный сотрудник. E-mai: Nickolai.petrov@gmail.com

Плоский волновой фронт характеризуется только двумя параметрами – амплитуда и фаза (но регистрируется только квадрат амплитуды - интенсивность), а для сферического пучка добавляется еще радиус кривизны. В случае же использования спирального присутствуют дополнительные параметры, характеризующие форму кривой интенсивности, такие как коэффициент роста и шаг спирали, поэтому информационная составляющая спекл-картины увеличивается, тем самым повышается чувствительность и точность диагностической системы. Таким образом, использование в качестве зондирующего волнового фронта спирального на базе полупроводниковых лазерных диодов позволит увеличить точность измерения параметров дефектов авиационных деталей за счет использования дополнительных параметров зондирующего пучка.

Принцип действия предлагаемого способа неразрушающего контроля заключается в следующем: при зондировании контролируемой поверхности спиральным пучком лазерного излучения часть рассеянного излучения фиксируется ПЗС-матрицей и передается в цифровом виде как спекл-картина на ЭВМ, где записывается в виде матрицы действительных значений интенсивности, затем производится корреляционный анализ спекл-картины - определяется интервал корреляции и ширина энергетического спектра поля, далее производится сравнение рассчитанного значения интервала корреляции спекл-картины (ширины энергетического спектра) с пороговым, принятым за эталон, и, по результату сравнения принимается решение о признании детали либо годной, либо дефектной.

Для реализации разработанного способа НК была разработана математическая модель процесса формирования спекл-картин при зондировании контролируемой поверхности спиральным пучком лазерного излучения (1).

$$\begin{split} I(x,y) &= \left(\frac{\sqrt{\pi}u^3}{4} - \frac{\rho_0 e^{\beta\varphi_D^2}}{2}\right)^2 \times \exp[j2m\cos(z)] \times J_0^2 (2\pi\phi'\rho) \times J_0^2 \left(\frac{\tilde{m}}{2}\right) \exp[j2\pi\phi' \cos\phi] \times \\ &\times a^2 b^2 c^2 \operatorname{sinc}^2 (a(a-a_{\underline{d}})) \operatorname{sinc}^2 (b(b-b_{\underline{d}})) \operatorname{sinc}^2 (c(c-c_{\underline{d}})) \times \Delta x^2 \Delta y^2 \operatorname{sinc}^2 (\Delta x(x_d-k\delta_x)) \times \\ &\times \operatorname{sinc}^2 (\Delta y(y_d-\ell\delta_v)). \end{split}$$

(1)

где ρ – радиус пучка, ρ_0 – радиус 1-ого витка спирали пучка, β –параметр, выражающийся через коэффициент роста спирали q, так:

 $\beta = \frac{\ln q}{2\pi} = ctg \alpha$, если $\beta > 0$, то спираль пра-

вая, если $\beta < 0$, то левая; υ – ширина пучка; m – шаг "винта" по оси $_{z}$; d_{1} – расстояние от ДОЭ до контролируемого объекта; d_{2} – от поверхности объекта до ПЗС-матрицы;

$$\tilde{m} = \frac{2\pi R_a}{\lambda}$$
 – коэффициент модуляции; J_0 –

функция Бесселя 1-ого рода нулевого порядка; (ρ', ϕ') – полярные координаты в плоскости наблюдения на расстоянии z от ДОЭ, $f^T = \rho^T \cos \phi$ – период решетки, δ_x – период по оси x_d ПЗС-матриц, δ_y – период по оси y_d , $\Delta x, \Delta y$ – размеры пикселей при условии, что

$$\Delta x \langle \delta_{\chi}, \Delta y \langle \delta_{\gamma}, k = (-\frac{M}{2}; \frac{M}{2}); l = (-\frac{L}{2}; \frac{L}{2}), M \times L -$$

размерность ПЗС-матрицы; *а*,*b*,*c* – ширина, длина и глубина дефекта.

Полученные выражения отличаются от известных тем, что в них учтены параметры характеризующие спиральный волновой фронт (коэффициент роста β и шаг спирали m), а так же параметры дефекта (длина, ширина, глубина a, b, c). Результаты численного моделирования для случая с различными по величине размерами дефекта, а так же при различных значениях шага m=1;2;3 зондирующего спирального волнового фронта представлены на рис. 1 – 2.

Для определения параметров контролируемой поверхности использовался корреляционный анализ регистрируемых спекл-картин. Оценка высотных параметров шероховатости производилась путем определения нормированной автокорреляционной функции распределения интенсивности поля в плоскости наблюдения (2) и интервала корреляции спекл-картины (3):

$$\rho(\Delta x) = \frac{\left[I(x) - \overline{I}\right] \left[I(x + \Delta x) - \overline{I}\right]}{\left[I(x) - \overline{I}\right]^2}, \quad (2)$$

$$r_{\hat{e}\hat{i}\,\hat{o}} = \int_{0}^{\infty} \rho(\Delta x) d\Delta x, \qquad (3)$$

где \overline{I} - средняя интенсивность спекл-картины; $\overline{I}(x)$ - распределение интенсивности спекл-картины по оси х; $\overline{I}(x + \Delta x)$ - распределение интенсивности спекл-картины при смещении по оси х на величину Δx (1 пиксель).

Результаты численного моделирования подтвердили, что с увеличением значений параметров дефекта a, b, c интервал корреляции регистрируемых спекл-картин уменьшается, кроме этого установлено, что при увеличением шага спирального фронта m при условии, что параметры шероховатости контролируемой поверхности есть величина постоянная ($R_a = const$), чувствительность системы уменьшается, так как ширина нормированной функции автокорреляции распределения интенсивности спекл-картины увеличивается, что является новым научным результатом.





a) – регистрируемые спекл-картины; б) – характеристика зависимости функции автокорреляции (радиус корреляции) спекл-картин от параметров дефекта расположенного на контролируемой поверхности; в) – характеристика зависимости интервала корреляции спекл-картин от параметров дефекта при условии, что a,b,c,
(asymbolic.com, b,c,d, a



Рис. 2. Результаты моделирования: а) – регистрируемые спекл-картины; б) – характеристика зависимости нормированной функции автокорреляции спекл-картин от величины шага спирали m при Ra=const; в) – характеристика зависимости интервала корреляции спекл-картин от величины шага спирали m



Рис. 3. Схема установки, используемой в эксперименте: 1 – лазер ГН-40; 2 – ДОЭ; 3 – диафрагма; 4 – ПЗСматрица; 5 – лопатка авиационного двигателя (АД)

Для подтверждения результатов численного моделирования и оценки эффективности использования спирального волнового фронта в МССОИ было выполнено экспериментальное исследование разработанного способа неразрушающего контроля. Для этого в лабораторных условиях была разработана экспериментальная установка, схема которой представлена на рис. 3.

Для формирования спиральных пучков лазерного излучения использовался фазовый ДОЭ. В качестве источника когерентного излучения применялся Не-Ne лазер ЛГН-40 с длиной волны λ=630 нм и мощностью 40 мВт (или лазерный диод с близкими параметрами). Регистрирующим элементом выступала ПЗС-матрица от цифровой видеокамеры ACE-S560CHB с разрешением 640х480 пикселей, регистрирующая изображения в черно-белых тонах. Расстояние от контролируемой поверхности до плоскости наблюдения составляло 22 см. В качестве контролируемого объекта выступала лопатка компрессора АД. На поверхности исследуемого образца находилось две забоины с соответствующими параметрами: 1 – (ширина 0,5 мм; глубина 0,8 мм), 2 – (ширина 0,8 мм; глубина 1 мм).

С целью определения степени повышения чувствительности МССОИ при использовании спирального пучка в ходе работы были подвергнуты зондированию участки входной кромки лопатки авиационного двигателя не имеющие повреждения и с разными по величине забоинами сначала плоским волновым фронтом, затем спиральным. Часть рассеянного излучения фиксировалась матрицей ПЗС-приемника и передавалась в виде цифрового изображения на компьютер, где оно записывалось в виде матрицы действительных значений интенсивности (рис. 4), далее проводилась корреляционная обработка регистрируемых спекл-картин. В результате корреляционной обработки определялась нормированная функция автокорреляции (2) и энергетический спектр поля регистрируемых спеклкартин: (4).

$$S(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} \rho(\Delta x) e^{-2\pi i f \Delta x} d\Delta x.$$
 (4)

В ходе эксперимента было установлено, что: при зондировании контролируемой поверхности плоским и спиральным волновыми фронтами величина нормированная функция автокорреляции спекл-картины, регистрируемой в процессе зондирования от каждого участка входной кромки лопатки, непосредственно зависит от глубины и ширины забоины, что отчетливо наблюдается на графиках функции автокорреляции (рис. 5 а, б).

Чем больше глубина ℓ и ширина забоины, тем ширина нормированной функции автокорреляции (интервал корреляции) спекл-картины меньше, и наоборот, величина энергетического спектра-поля (4) обратно пропорциональна нормированной функции автокорреляции спеклкартины (рисунок 6 а, б). Применение спирального волнового фронта позволяет минимизировать неоднозначность результатов измерения параметров дефекта по характеристике ширины энергетического спектра поля спекл-картины (рис. 6 б).



Рис. 4. Спекл-картины регистрируемые в ходе зондирования кромки лопатки АД плоским и спиральным волновым фронтом лазерного излучения



Рис. 5. Результаты корреляционного анализа: зависимость нормированной функции автокорреляции спекл-картин, зарегистрированных при зондировании кромки лопатки АД а) – плоским и б) – спиральным волновым фронтом лазерного излучения



Рис. 6. Результаты корреляционного анализа: зависимость величины энергетический спектра поля спекл-картин, зарегистрированных при зондировании кромки лопатки АД а) – плоским и б) – спиральным волновым фронтом лазерного излучения

Определение эффективности использования спирального волнового фронта по отношению к плоскому, в данном случае, осуществлялось по методике определения чувствительности диагностической системы. Для этого рассчитывались характеристики интервал корреляции(3) и ширины энергетического спектра поля спекл-картин (5)

$$\Delta f = \int_{0}^{\infty} S(f) df \,. \tag{5}$$

Видно, что чем больше разница между функциями автокорреляции спекл-картины, полученными от неповрежденной и дефектной поверхности, тем чувствительность системы выше, следовательно, вероятность обнаружения дефектов с наименьшими параметрами возрастает.

Результаты, полученные в ходе эксперимента (рисунок 7), подтверждают гипотезу о

повышении эффективности системы дефектации кромки лопатки АД при использовании в

методе спекл-структур оптического излучения спирального зондирующего волнового фронта, а именно, на участках с забоинами, превышающими глубину $\ell > 0,7$ мм (критические), наблюдается увеличение чувствительности системы примерно на 60% по отношению к системе с использованием плоского волнового фронта.

Таким образом, применение в качестве зондирующего спирального волнового фронта в методе спекл-структур оптического излучения для оценки параметров поверхности лопаток АД достаточно эффективно, что подтверждается результатами, полученными в ходе экспериментального исследования. Это позволяет приступить к разработке портативных, мобильных устройств, позволяющих производить весь комплекс операций по неразрушающему контролю деталей авиационной техники на высоком технологическом уровне, предусмотренной нормативной документацией промышленности.



Рис. 7. График зависимости а) интервала корреляции и б) ширины энергетического спектра спекл-картин от глубины дефекта ℓ при зондировании кромки лопатки АД плоским и спиральным волновым фронтом излучения

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. ГОСТ Р 53696-2009 Контроль неразрушающий. Методы оптические. Термины и определения. М.: Стандартинформ. 2010. 7 с.
- 2. Бородин А.Н. Спекл-оптические методы исследования шероховатых поверхностей и подповерхностной структуры объектов / А.Н. Бородин, А.А. Вайчас, А.Н. Малов, Б.М. Миронов, А.В. Неупокоева, И.А. Синицын, А.Н. Онацкий, А.В. Сычевский, С.А. Чупраков // Физика наукоемких технологий. Выпуск 2. Иркутск: ИВВАИУ. 2008. С. 5 - 71.
- 3. Бадалян Н.Н. Лазерная дистанционная спекл-интерферометрия. Модель формирования спекл-структуры / Н.П. Бадалян, В.В. Кийко, В.И. Кислов, А.Б. Козлов // Квантовая электроника. 2008. №5(38). С. 477 -481.
- 4. Кульчин Ю.Н. Адаптивные методы обработки спеклмодулированных оптических полей / Ю.Н. Кульчин, О.Б. Витрик, А.А Камшилин, Р.В. Ромашко. М.: Физматлит, 2009. 288 с.

- 5. Сойфер В.А. Дифракционные оптические элементы // Соросовский образовательный журнал. 1999. №4. C. 110 - 115.
- 6. Абрамочкин Е.Г. Современная оптика гауссовых пучков / Е.Г. Абрамочкин, В.Г. Волостников. М.: Физматлит, 2010. 184 с.
- Benjamin J. McMorran. Electron vortex beams with high 7. quanta of orbital angular / Benjamin I. McMorran, Amit Agrawal, Ian M. Anderson, Andrew A. Herzing, Henri J. Lezec, Jabez J. McClelland, John Unguris // Science. 2011. P. 192–195.
- 8. Котляр В.В. Вращение лазерных пучков, не обладающих орбитальным угловым моментом / В.В. Котляр, С.Н. Хонина, Р.В. Скиданов, В.А. Сойфер // Компьютерная оптика. 2007. №31. С. 35 – 38.
- 9 Сойфер В.А. Дифракционные оптические элементы для оптического манипулирования микрочастицами / В.А. Сойфер, В.В. Котляр, С.Н. Хонина, Р.В. Скиданов // Материалы международного форума по голографии Экспо - 2004,19-22 октября 2004. Москва. С. 62 - 63.

AIRCRAFT DETAIL SURFACES TECHNICAL CONDITION ESTIMATION BY MEANS OF A OPTICAL SPECKLE-STRUCTURES METHOD WITH A SPIRAL LASER BEAM SENSING

©2012 P.V. Pavlov¹, A.N. Malov², N.V. Petrov³

¹ The Air Force Training and Research Center "Air Force Academy named after professor. N.E. Zhukovskiv and Y.A. Gagarin", Voronezh,

² Amur State University, Blagoveshchensk

³ Sankt-Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics

Results of computer modeling and experimental research of application of laser radiation spiral beams for nondestructive testing of a aircraft engine blade profile are presented. The efficiency estimation for application of spiral beams in relation to plane wave front is given.

Key words: speckle, the autocorrelation function, nondestructive testing, spiral beams.

Pavel Pavlov, Candidate of Technics, Lecturer. E-mail: pashok8208@mail.ru

Aleksandr Malov, Doctor of Physics and Mathematics,

Professor. E-mail: cohol2007@yandex.ru

Nikolay Petrov, Candidate of Physics and Mathematics,

Research Associate. E-mai: Nickolai.petrov @ gmail.com