

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ОПТИЧЕСКИ НЕПРОЗРАЧНЫХ ДЕТАЛЕЙ МЕТОДОМ СПЕКЛ-СТРУКТУР С ПРИМЕНЕНИЕМ СПИРАЛЬНЫХ ПУЧКОВ

Малов А.Н.¹, Павлов П.В.²

¹ Амурский государственный университет (Благовещенск),

² Военный учебно-научный центр ВВС

«Военно-воздушная академия имени проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)

Аннотация

Приведены результаты численного моделирования и экспериментального исследования применения метода спекл-структур оптического излучения с использованием спиральных пучков лазерного излучения для определения параметров шероховатости и дефектации поверхности оптически непрозрачных деталей воздушного судна. Показано, что использование спирального волнового фронта в качестве зондирующего повышает чувствительность и точность метода.

Ключевые слова: спеклы, спиральные пучки, шероховатость, корреляционная функция.

Введение

В настоящее время контроль над состоянием оптически непрозрачных поверхностей авиационных деталей на этапах подготовки авиационной техники к полётам осуществляется с помощью оптико-визуального метода, результат измерений которого субъективен и зависит от опыта оператора. Поэтому актуальным является повышение эффективности оптических методов неразрушающего контроля (НК) поверхностей авиационных деталей для максимального снижения влияния субъективной человеческой составляющей на результаты контроля с целью повышения безопасности полётов воздушных судов (ВС).

Решению этой задачи способствует развитие современной элементной базы микроэлектроники – полупроводниковых лазерных диодов (способных заменить газовые лазеры), матричных фотоприёмников (ПЗС, КМОП и др. матрицы – новые системы ввода и получения изображений), а также возможность реализации различных алгоритмов обработки изображений на портативных ЭВМ. Сочетание данных элементов и средств позволяет создать мобильные, автономные и портативные средства диагностики, позволяющие выполнять весь перечень мероприятий по НК оптически непрозрачных поверхностей авиационных деталей на высоком технологическом уровне.

Для решения вышеуказанных задач используются методики корреляционной интерферометрии, и в частности, метод спекл-структур оптического излучения (МССОИ) [1]. Регистрируемые спекл-структуры несут информацию о рассеивающих свойствах объектов, поэтому исследование их статистических параметров актуально как с фундаментальной, так и с прикладной точек зрения. Этим исследованиям посвящены работы [2–4], в которых отражена проблематика анализа спекл-картин для определения параметров шероховатости и дефектации поверхностей деталей с использованием плоских или сферических зондирующих волновых фронтов.

Для расширения функциональных возможностей МССОИ предлагается применить сложноструктурированные пучки, что возможно при использовании дифракционных оптических элементов (ДОЭ) со слож-

ным профилем зон, которые позволяют формировать лазерные пучки с распределением интенсивности в виде заданной кривой, сохраняющие при распространении свою поперечную структуру с точностью до масштаба и вращения. Такие лазерные пучки с фазовой сингулярностью получили название спиральных, им посвящены многочисленные исследования и публикации российских учёных-оптиков и их зарубежных коллег [5-7], однако инженерно-технические аспекты их применения пока не разработаны, кроме как для задач манипулирования микрообъектами [8,9].

Таким образом, исследование метода спекл-структур с применением спиральных пучков лазерного излучения для задач дефектоскопии элементов ВС является актуальным. Целью настоящей работы была предварительная оценка возможностей диагностики и дефектоскопии при использовании спиральных зондирующих лазерных пучков.

1. Моделирование

Моделирование проводилось на основании предложенной математической модели процесса зондирования контролируемой поверхности спиральным пучком лазерного излучения [10]. Спиральный пучок описывался выражением [6]:

$$S(z, \bar{z} | \zeta(t), t \in [0, T]) = \exp(-z\bar{z} / \rho^2) \times \int_0^T \exp\left(-\frac{\zeta(t)\bar{\zeta}(t)}{\rho^2} + \frac{2z\bar{\zeta}(t)}{\rho^2} + \frac{1}{\rho^2} \times \int_0^t (\bar{\zeta}(\tau)\zeta'(\tau) - \zeta(\tau)\bar{\zeta}'(\tau)) d\tau\right) |\zeta'(t)| dt, \quad (1)$$

где $S(z, \bar{z})$ – функция спирального пучка; $z = (x + iy) / \rho$, $\bar{z} = (x - iy) / \rho$ – комплексные переменные; ρ – гауссов параметр пучка; $\zeta(t)$ – функция кривой распределения интенсивности спирального пучка; $\frac{1}{\rho^2} \int_0^t (\bar{\zeta}(\tau)\zeta'(\tau) - \zeta(\tau)\bar{\zeta}'(\tau)) d\tau$ – ориентированная площадь сектора, заметаемая при движении пучка вдоль кривой.

Распределение интенсивности и фазы спирального пучка представлены на рис. 1.

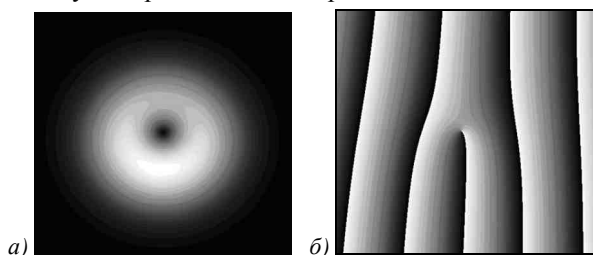


Рис. 1. Распределение интенсивности (а) и фазы (б) спирального пучка, формирующего световое кольцо, полученные при выполнении численного моделирования

При оценке шероховатости объект может рассматриваться как фазовый, а в качестве контролируемой поверхности выступает суперпозиция синусоидальных фазовых решёток, каждая из которых имеет функцию пропускания [10]:

$$T_a(x, y, z) = \exp \left[j \frac{\tilde{m}}{2} \sin(2\pi f_0 x) \right], \quad (2)$$

где $\tilde{m} = 2\pi(R_a / \lambda)$ – коэффициент модуляции; R_a – среднее арифметическое отклонение от средней линии профиля (параметр шероховатости поверхности); f_0 – частота решётки.

Для определения параметров шероховатости и дефектации поверхности контролируемой детали использовался корреляционный анализ регистрируемых спекл-картин. Оценка высотных параметров шероховатости производилась путём определения нормированной автокорреляционной функции (НАФ) распределения интенсивности поля в плоскости наблюдения:

$$\rho(\Delta x) = \frac{[I(x) - \bar{I}][I(x + \Delta x) - \bar{I}]}{[\overline{I(x) - \bar{I}}]^2}, \quad (3)$$

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

При проведении численных исследований была выявлена важная особенность, характеризующая зависимость величины НАФ распределения интенсивности спирального пучка в плоскости регистрации от параметров шероховатости и размеров дефекта, расположенного на контролируемой поверхности: если параметр шероховатости R_a и размеры дефектов a, b, c (ширина, длина, глубина) увеличиваются, то ширина функции автокорреляции (радиус корреляции) уменьшается и наоборот (рис. 2–3).

2. Результаты экспериментального исследования

Для формирования спиральных пучков лазерного излучения использовался фазовый ДОЭ. Схема экспериментальной установки, на которой был реали-

зован процесс зондирования исследуемого объекта, представлен на рис. 4.

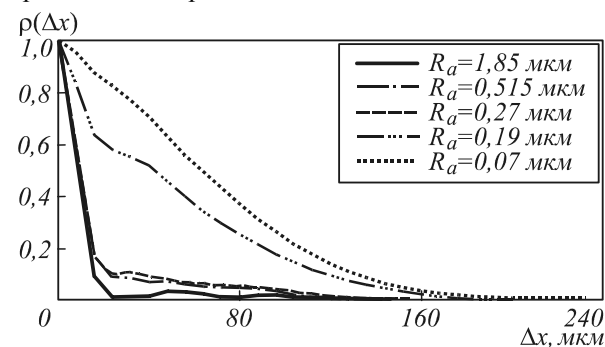


Рис. 2. Результаты моделирования: зависимости НАФ спекл-картин от параметров шероховатости R_a контролируемой поверхности при $\lambda=630$ нм и $f_0=700$ штрих/мм

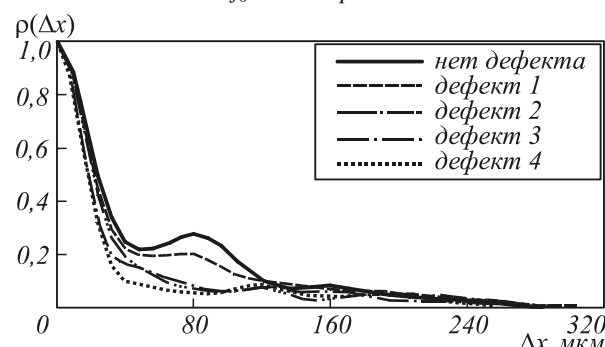


Рис. 3. Результаты моделирования: зависимости НАФ спекл-картин от параметров дефекта при условии, что $a_1 b_1 c_1 < a_2 b_2 c_2 < a_3 b_3 c_3 < a_4 b_4 c_4$ при $\lambda=630$ нм и $f_0=700$ штрих/мм

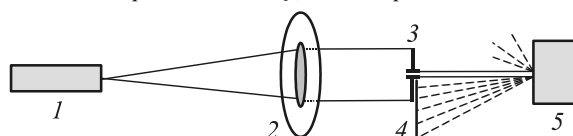


Рис. 4. Схема экспериментальной установки, используемой в эксперименте: 1 – лазер ГН-40; 2 – ДОЭ; 3 – диафрагма; 4 – ПЗС-матрица; 5 – контролируемый объект (металлический параллелепипед, лопатка авиационного двигателя)

В качестве источника когерентного излучения применялся He-Ne лазер ГН-40 с длиной волны $\lambda=630$ нм и мощностью 40 мВт (или лазерный диод с близкими параметрами). Регистрирующим элементом выступала ПЗС-матрица от цифровой видеокамеры АСЕ-S560СНВ с разрешением 640×480 пикселей, регистрирующая изображения в чёрно-белых тонах. Расстояние от контролируемой поверхности до плоскости наблюдения составляло 22 см.

Для исследования были выбраны следующие объекты:

1. Эталонный образец (заготовка в виде металлического параллелепипеда), каждая грань которого была предварительно обработана шлифовальным аппаратом с разными параметрами шероховатости, а параметры каждой грани измерены при помощи профилометра тип 296.

2. Лопатка авиационного двигателя (АД).

С целью определения степени повышения чувствительности МССОИ при использовании спирально-го пучка в ходе работы каждая из поверхностей металлического параллелепипеда подвергалась зондированию сначала плоским волновым фронтом, затем спиральным. Часть рассеянного излучения фиксировалась матрицей ПЗС-приёмника и передавалась в виде цифрового изображения на компьютер, где оно записывалось в виде матрицы действительных значений интенсивности, далее проводилась корреляционная обработка регистрируемых спекл-картин.

В результате корреляционной обработки определялась НАФ (3) и энергетический спектр поля регистрируемых спекл-картин:

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

В ходе эксперимента было установлено, что при зондировании контролируемой поверхности плоским и спиральным волновыми фронтами величина НАФ спекл-картины, регистрируемой в процессе зондирования от каждой грани параллелепипеда, непосредственно зависит от параметра шероховатости R_a , что отчётливо наблюдается на графиках функции автокорреляции (рис. 5).

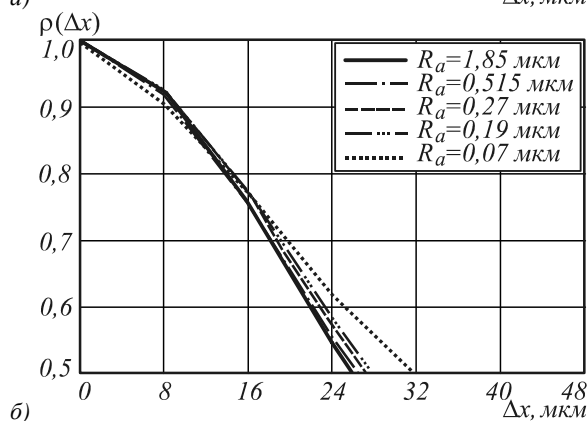
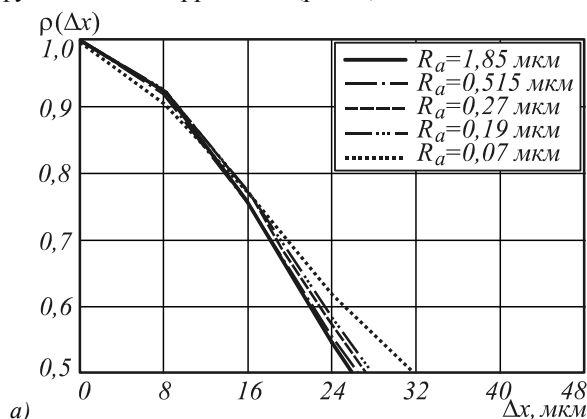


Рис. 5. Результаты корреляционного анализа: зависимости величины НАФ спекл-картин, регистрируемых при зондировании: плоским (а) и спиральным (б) волновым фронтом лазерного излучения, от уровня шероховатости R_a . Доверительный интервал для экспериментальных точек по вертикальной оси – не более 0,02

Чем больше R_a , тем ширина НАФ (интервал корреляции) спекл-картины меньше, и наоборот, величина энергетического спектра-поля (4) обратно пропорциональна НАФ (рис. 6а, б).

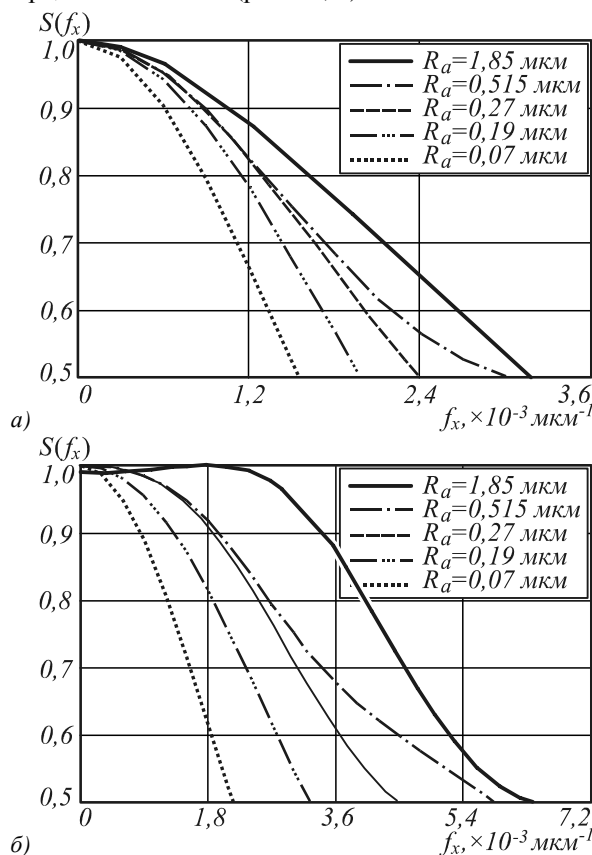


Рис. 6. Результаты корреляционного анализа: зависимость величины энергетического спектра поля спекл-картин, регистрируемых при зондировании плоским (а) и спиральным (б) волновым фронтом лазерного излучения, от параметров шероховатости поверхности параллелепипеда R_a

Оценка эффективности использования спирального волнового фронта определялась по характеристике чувствительности метода спекл-структур. Для этого рассчитывались характеристики интервала корреляции и ширины энергетического спектра поля спекл-картин (5), зарегистрированных при измерении параметров шероховатости исследуемого металлического параллелепипеда:

$$r_{кор} = \int_0^{\infty} \rho(\Delta x) d\Delta x; \Delta f = \int_0^{\infty} S(f) df. \quad (5)$$

По результатам эксперимента (рис. 7) видно, что при использовании спирального волнового фронта в качестве зондирующего, чувствительность системы возрастает, так как прирост сигнала (изменение величины интервала корреляции) на единицу изменения шероховатости в 0,1 мкм увеличивается.

В ходе выполненных расчётов установлено, что при использовании в качестве зондирующего спирального волнового фронта на участках измерения параметров шероховатости $R_a < 0,3$ мкм чувствительность системы возрастает примерно на 40%, что по-

звояет расширить диапазон измерения параметров R_a и тем самым увеличить точность измерений.

Для расчёта погрешности разрабатываемого метода было выполнено 200 операций по измерению параметров шероховатости R_a поверхности грани металлического параллелепипеда с параметром шероховатости 1,85 мкм.

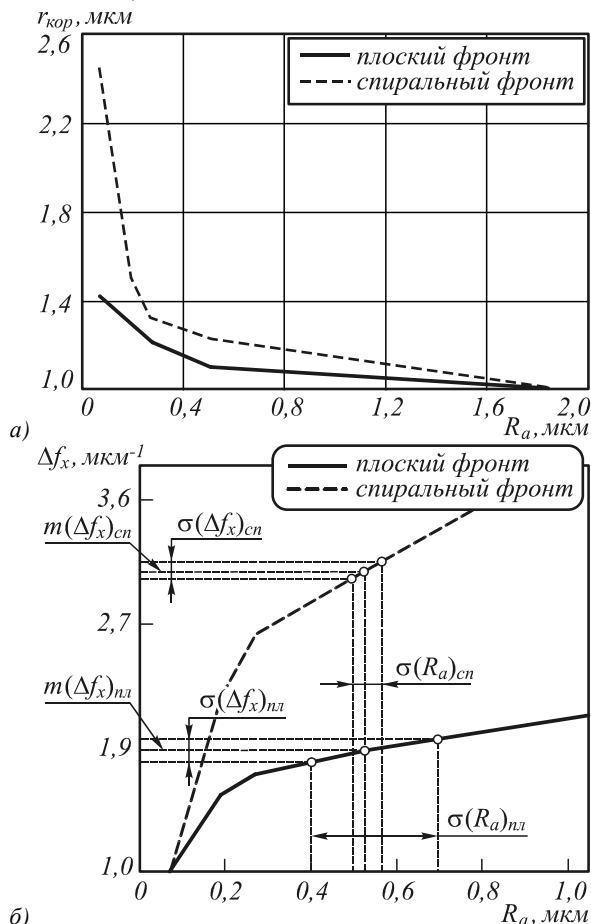


Рис. 7. Графики зависимости: интервала корреляции (а) и ширины энергетического спектра (б) спекл-картин от параметров шероховатости поверхности параллелепипеда R_a при зондировании плоским и спиральным волновыми фронтами излучения

Было произведено одинаковое количество измерений при зондировании как плоским, так и спиральным волновым фронтом. Регистрируемые с помощью ПЗС-матрицы спекл-картины подвергались корреляционному анализу. В результате обработки изображений вычислялась величина энергетического спектра поля оптических полей. Далее в ходе статистического анализа определялось математическое ожидание величины энергетического спектра-поля регистрируемых спекл-полей как при использовании плоского, так и при использовании спирального волнового фронта:

$$m(\Delta f_{x_{nl}}) = \sum_{i=1}^n \Delta f_{x_{nl}}^i; \quad m(\Delta f_{x_{cn}}) = \sum_{i=1}^n \Delta f_{x_{cn}}^i. \quad (6)$$

Погрешность измерения параметров шероховатости при использовании МССОИ при зондировании плоским и спиральным волновыми фронтами вычисляется по формулам:

$$\sigma(R_a)_{nl} = \frac{\sigma(\Delta f_{x_{nl}})}{K}; \quad \sigma(R_a)_{cn} = \frac{\sigma(\Delta f_{x_{cn}})}{K}, \quad (7)$$

где $K = tg(\Delta f_x / R_a)$ – величина, характеризующая крутизну характеристики $f(\Delta f_x) = R_a$. Результаты вычислений показали, что при использовании в качестве зондируемого волнового фронта спирального погрешность измерения параметров шероховатости составляет 0,03 мкм.

Заключение

Таким образом, применение в качестве зондирующего спирального волнового фронта в МССОИ для оценки параметров шероховатости деталей достаточно эффективно, что подтверждается результатами, полученными в ходе численного моделирования и экспериментальным путём. 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.

Благодарности

Авторы благодарят Н.В. Петрова за помощь в подготовке к проведению работ по выполнению численного моделирования и экспериментальной части исследования. Работа выполнена в рамках государственного контракта ГК 14.740.12.08.41.

Литература

- ГОСТ Р 53696-2009 Контроль неразрушающий. Методы оптические. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2010. – 7 с.
- Кульчин, Ю.Н. Корреляционный метод обработки спекловой картины сигналов с одноволоконных многомодовых интерферометров с использованием приборов с зарядовой связью / Ю.Н. Кульчин, О.Б. Витрик, А.Д. Ланцов // Квантовая электроника. – 2006. – № 4(36). – С. 339-342.
- Бадалян, Н.П. 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.
- 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. Вып. 2. – Иркутск: ИВВАИУ, 2008. – С. 5-71.
- McMorgan, V. Electron vortex beams with high quanta of orbital angular / Benjamin J. McMorgan, Amit Agrawal, Ian M. Anderson, Andrew A. Herzing, Henri J. Lezec, Jabez J. McClelland, John Unguris // Science. – 2011. – P. 192-195.
- Абрамочкин, Е.Г. Современная оптика гауссовых пучков / Е.Г. Абрамочкин, В.Г. Волостников – М.: Физматлит, 2010. – 184 с.
- Котляр, В.В. Вращение лазерных пучков, не обладающих орбитальным угловым моментом / В.В. Котляр

- ляр, С.Н. Хонина, Р.В. Скиданов, В.А. Соيفер // Компьютерная оптика. – 2007. – № 31. – С. 35-38.
8. **Соифер, В.А.** Оптическая микроманипуляция с использованием многопорядковых ДОО / В.А. Соифер, В.В. Котляр, С.Н. Хонина, Р.В. Скиданов // Официальные материалы научно-практической конференции «Голография в России и за рубежом. Наука и практика», 2006. – С. 57-59.
 9. **Волостников, В.Г.** Манипуляция микрообъектами с помощью пучков с ненулевым орбитальным моментом / В.Г. Волостников, С.П. Котова, Н.Н. Лосевский, М.А. Рахматулин // Квантовая электроника. – 2002. – Т. 32, № 7. – С. 565-566.
 10. **Павлов, П.В.** Применение спиральных пучков для дефектоскопии и неразрушающего контроля / П.В. Павлов, А.Н. Малов, А.Н. Бородин, А.В. Сычевский // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. Ч. 1. – Томск: ТУСУР. – 2010. – № 2 (22). – С. 70-74.

References

1. GOST R 53696-2009 destructive testing. Metody optical terms and definitions. / Moscow: "Standartinform" Publisher, 2010. – 7 p. – (In Russian).
2. **Kulchin, J.N.** Correlation method for processing signals from the picture speckle fiber multimode multi-interferometer using in-hog with a CCD / J.N. Kulchin, O.B. Vitrik, A.D. Lantsov // Quantum Electron. – 2006. – № 4 (36). – P. 339-342. – (In Russian).
3. **Badalian, N.P.** Laser speckle interferometry remote. Model for the formation of the speckle structure / N.P. Badalian, V.V. Kiiko, V.I. Kislov, A.B. Kozlov // Quantum Electron. – 2008. – N 5(38). – P. 477-481. – (In Russian).
4. **Borodin, A.N.** Speckle-optical methods for studies of the rough surface and subsurface structure of objects / A.N. Borodin, A.A. Vaychas, A.N. Malov, B.M. Mironov, A.V. Neupokoeva, I.A. Sinitsyn, A.N. Onatsky, A.V. Sychevsky, S.A. Chuprakov // Physics of high technology. N 2. – Irkutsk: IVVAIU Publisher, 2008. – P. 571. – (In Russian).
5. **McMorran, B.** Electron vortex beams with high quanta of orbital angular / Benjamin J. McMorran, Amit Agrawal, Ian M. Anderson, Andrew A. Herzing, Henri J. Lezec, Jabez J. McClelland, John Unguris // Science. – 2011. – P. 192-195.
6. **Abramochkin, E.G.** Modern optics of Gaussian beams / E.G. Abramochkin, Volostnikov V.G.– M.: Fizmatlit. – 2010. – 184 p. – (In Russian).
7. **Kotlyar, V.V.** Rotation of the laser beams that have no give the orbital angular momentum / V.V. Kotlyar, S.N. Khonina, R.V. Skidanov, V.A. Soifer // Computer Optics. – 2007. – N 31. – P. 35-38. – (In Russian).
8. **Soifer, V.A.** Optical micromanipulation with the use of many order DOE / V.A. Soifer, V.V. Kotlyar, S.N. Khonina, R.V. Skidanov // Officially materials science and practical conference "Holography in Russia and abroad. Science and practice", 2006. – P. 57-59. – (In Russian).
9. **Volostnikov, V.G.** Manipulation of microobjects by using beams with nonzero orbital angular momentum / V.G. Volostnikov, S.P. Kotova, N.N. Losevsky, M.A. Rakhmatulin // Quantum Electron. – 2002. – Vol. 32(7). – P. 565-566. – (In Russian).
10. **Pavlov, P.V.** The use of spiral beams for flaw detection and nondestructive inspection / P.V. Pavlov, A.N. Malov, A.N. Borodin, A.V. Sychevsky // Proceedings of the Tomsk State University of Control Systems and Radio Electronics. Part 1. – Tomsk: TUSUR Publisher, 2010. – N 2(22). – P. 70-74. – (In Russian).

DETERMINATION OF SURFACE ROUGHNESS PARAMETERS OPTICALLY OPAQUE PARTS BY SPECKLES USING SPIRAL BEAMS

A.N. Malov¹, P.V. Pavlov²,

¹ The Amur State University (Blagoveshchensk),

² Military Science and Education Centre VVS

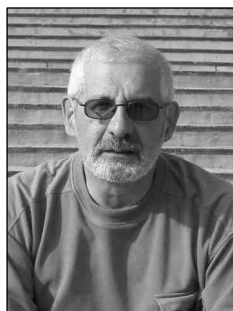
"Air Force Academy named after prof. N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin" (Voronezh)

Abstract

The results of numerical simulation and experimental study of the speckle method with the use of spiral laser beams to determine the roughness parameters and fault detection surface of an optically opaque parts of the aircraft are discussed. It is shown that use of the probing the spiral wave front of increases the sensitivity and accuracy of the method.

Key words: speckle, spiral beams, surface roughness, correlation function.

Сведения об авторах



Малов Александр Николаевич, 1953 г. рождения, окончил специальный факультет физики Московского инженерно-физического института (МИФИ) в 1975 г., аспирантуру Физического института им. П.Н. Лебедева АН СССР (ФИАН) в 1978 г., доктор физико-математических наук (1997 г.), профессор (2000 г.). Область научных интересов: голография, лазерные нанотехнологии, лазерная биофизика и медицина. В списке научных работ Малова А.Н. более 150 научных публикаций, 29 авторских свидетельств и патентов.

E-mail: cohol2007@yandex.ru.

Alexander Nikolayevich Malov (b. 1953) graduated (1975) from Special physics faculty of Moscow Physical- Engineering Institute (MEPhI), postgraduated study of P.N. Lebedev Physical Institute (FIAN) in 1978, the doctor of science (physics & mathematics, 1997), the professor (2000). Area of scientific interests: holography, laser nanotechnologies, laser biophysics&medicine. He is co-author of more than 150 scientific publications and 29 patents.



Павлов Павел Владимирович, 1982 года рождения. В 2004 году окончил факультет Авиационного оборудования Иркутского военного авиационного инженерного института по специальности «Техническая эксплуатация авиационных электросистем и пилотажно-навигационных комплексов», в 2011 году адъюнктуру Военного авиационного инженерного университета. В настоящее время является преподавателем кафедры Электрооборудования (и оптико-электронных систем) ВУНЦ ВВС «ВВА им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж). Область научных интересов: дифракционная и спекл-оптика, цифровая обработка изображений. Является автором 22 научных статей и одного патента на изобретение.

E-mail: pashok8208@mail.ru.

Pavel Vladimirovich Pavlov, born in 1982. In 2004 he graduated from the Irkutsk Aviation Equipment Air Force Engineering Institute as a “Maintenance of aircraft electrical systems and flight control and navigation systems”, and adjuncture of Military Aviation Engineering University in 2012. He is currently a lecturer at the Department of Electrical Equipment (and opto-electronic systems) VUNTS VVS “VVA them. prof. N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin” (Voronezh). Research interests: diffraction, speckle optics, digital image processing. He is the author of 22 scientific articles and one patent.

Поступила в редакцию 22 мая 2012 г.