

УДК 535.35

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ШЕРОХОВАТОСТИ И ДЕФЕКТАЦИЯ  
ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ ВОЗДУШНОГО СУДНА С ПРИМЕНЕНИЕМ  
СПИРАЛЬНЫХ ПУЧКОВ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ****П.В. Павлов, Н.В. Петров, А.Н. Малов**

Исследован метод спекл-структур оптического излучения с применением спиральных пучков лазерного излучения как средство определения параметров шероховатости и дефектации поверхности оптически непрозрачных деталей воздушного судна. Получены графики зависимости величины интервала корреляции регистрируемых спекл-картин от высотных параметров шероховатости и глубины дефекта контролируемой поверхности. В ходе численного моделирования установлено и экспериментально показано, что использование в качестве зондирующего спирального волнового фронта повышает чувствительность метода спекл-структур.

**Ключевые слова:** шероховатость, дефектоскопия, спекл, корреляция, спиральные пучки, лазер.

**Введение**

В настоящее время контроль состояния оптически непрозрачных поверхностей авиационных деталей на этапах подготовки авиационной техники к полетам осуществляется при помощи оптико-визуального метода, результат измерений которого зависит от возможностей человеческого зрения. Таким образом, необходимо повысить эффективность использования оптических методов неразрушающего контроля (НК) поверхностей авиационных деталей для максимального снижения влияния субъективных оценок на результаты контроля с целью повышения безопасности полетов воздушных судов (ВС).

Решению этой проблемы способствуют развитие современной элементной базы микроэлектроники – полупроводниковых лазерных диодов (способных заменить существующие газовые лазеры), матричных фотоприемников, 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 рассматриваемой проблемы используются методики корреляционной интерферометрии, 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 (ДОО) со сложным 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 ученых-оптиков и их зарубежных коллег [5–7], однако инженерно-технические аспекты их применения пока не разработаны, за исключением задач манипулирования микрообъектами [8, 9].

Таким образом, исследование метода спекл-структур, полученных от 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.

**Моделирование процесса определения параметров шероховатости и дефектации поверхности контролируемой детали при зондировании спиральным волновым фронтом лазерного излучения**

Моделирование проводилось на основании разработанной математической модели процесса зондирования контролируемой поверхности спиральным пучком лазерного излучения [10]. Для определения параметров шероховатости и дефектации поверхности контролируемой детали использовался корреляционный анализ регистрируемых спекл-картин. Оценка высотных параметров шероховатости производилась путем определения автокорреляционной функции распределения интенсивности поля в плоскости наблюдения (радиуса корреляции) (1):

$$\rho(a) = \overline{(I - \bar{I}_x) \cdot (I - \bar{I}_{x+a})}. \quad (1)$$

При проведении численных исследований была выявлена важная особенность, характеризующая зависимость величины функции автокорреляции распределения интенсивности поля спирального пучка в плоскости регистрации от параметров шероховатости и размеров дефекта, расположенного на контролируемой поверхности: если параметр шероховатости  $Ra$  и размеры дефектов  $a, b, c$  (ширина, длина, глубина) увеличиваются, то ширина функции автокорреляции уменьшается, и наоборот (рис. 1).

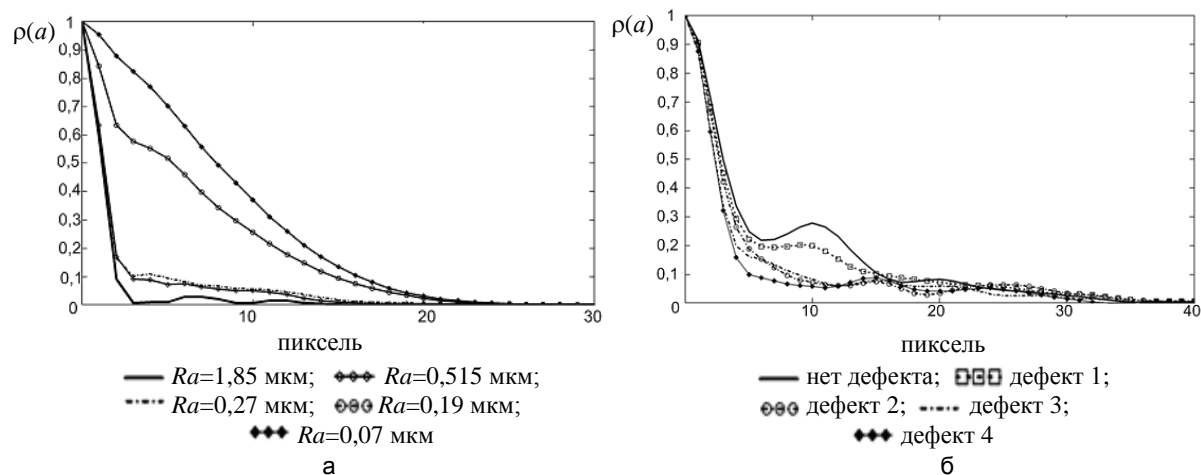


Рис. 1. Результаты моделирования: характеристика зависимости функции автокорреляции (радиус корреляции) спекл-картин от параметров шероховатости  $Ra$  (а); характеристика зависимости интервала корреляции спекл-картин от параметров дефекта при условии, что  $a_1, b_1, c_1 < a_2, b_2, c_2 < a_3, b_3, c_3 < a_4, b_4, c_4$  (б)

### Экспериментальное исследование процесса зондирования контролируемой поверхности плоским и спиральным волновым фронтом лазерного излучения

Для формирования спиральных пучков лазерного излучения использовался фазовый ДОО. Внешний вид и схема экспериментальной установки, на которой был реализован процесс зондирования исследуемого объекта, представлен на рис. 2.

В качестве источника когерентного излучения применялся He-Ne лазер ГН-40 с длиной волны  $\lambda=630$  нм и мощностью 40 мВт. Регистрирующим элементом выступала ПЗС-матрица от камеры видеонаблюдения ACE-S560CHB с разрешением  $640 \times 480$  пикселей, позволяющая регистрировать черно-белые изображения. Расстояние от контролируемой поверхности до плоскости наблюдения составляло 22 см.

Для исследования были выбраны следующие объекты:

1. Заготовка в виде металлического параллелепипеда, каждая грань которого была предварительно обработана шлифовальным аппаратом с разными параметрами зернистости и измерены параметры шероховатости при помощи профилометра тип 296.
2. Лопатка авиационного двигателя (АД).

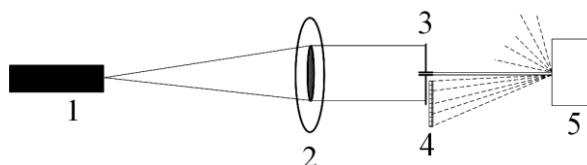
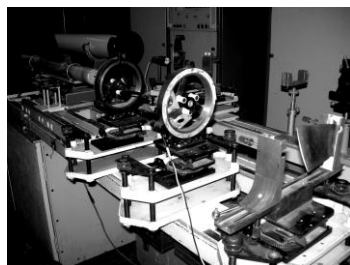


Рис. 2. Внешний вид и схема установки, используемой в эксперименте: 1 – лазер ГН-40; 2 – ДОО; 3 – диафрагма; 4 – ПЗС-матрица; 5 – контролируемый объект (металлический параллелепипед, лопатка АД)

С целью оценки степени повышения информативности МССОИ за счет замены плоского пучка на спиральный в ходе работы каждая из поверхностей металлического параллелепипеда подвергалась зондированию сначала плоским волновым фронтом, затем спиральным. Часть рассеянного излучения фиксировалась матрицей ПЗС-приемника и передавалась в виде цифрового изображения на компьютер, где

записывалось в виде матрицы действительных значений интенсивности (спекл-картин), далее проводилась корреляционная обработка регистрируемых спекл-картин.

В результате корреляционной обработки определялась функция автокорреляции и энергетический спектр поля регистрируемых спекл-картин. Результаты вычислений представлены на рис. 3.

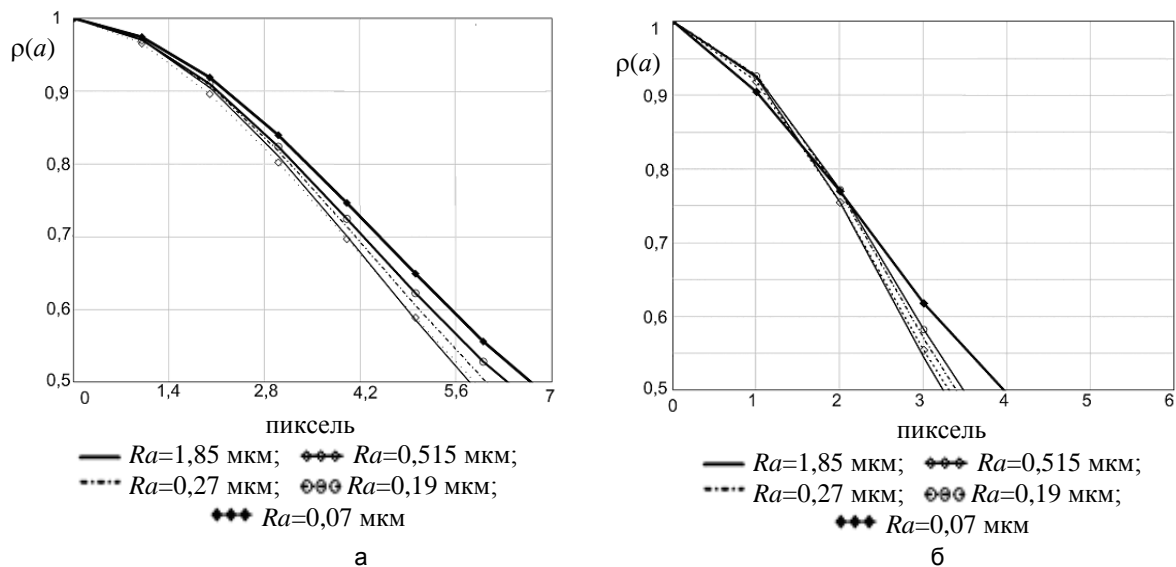


Рис. 3. Результаты корреляционного анализа: зависимость величины функции автокорреляции (радиус корреляции) спекл-картин, регистрируемых при зондировании: плоским (а) и спиральным (б) волновым фронтом лазерного излучения от параметров шероховатости Ra

В ходе эксперимента было установлено, что при зондировании контролируемой поверхности плоским и спиральным волновым фронтом величина функции автокорреляции спекл-картины, регистрируемой в процессе зондирования от каждой грани параллелепипеда, непосредственно зависит от параметра ее шероховатости Ra, что отчетливо наблюдается на графиках функции автокорреляции (рис. 3), чем больше Ra, тем ширина функции автокорреляции (радиус корреляции) спекл-картины меньше, и наоборот. Во второй части эксперимента в качестве контролируемого объекта выступала лопатка АД, входная кромка которой исследовалась. На поверхности исследуемого образца находилось две забоины с параметрами: 1 – ширина 0,5 мм, глубина 0,8 мм; 2 – ширина 0,8 мм, глубина 1 мм.

Результаты корреляционного анализа регистрируемых спекл-картин при контроле кромки лопатки АД представлены на рис. 4, на которых видно, что величина функции автокорреляции (радиус корреляции) напрямую зависит от размеров дефектов, находящихся на поверхности кромки лопатки АД: чем больше глубина и ширина повреждения, тем уже функция автокорреляции, и наоборот.

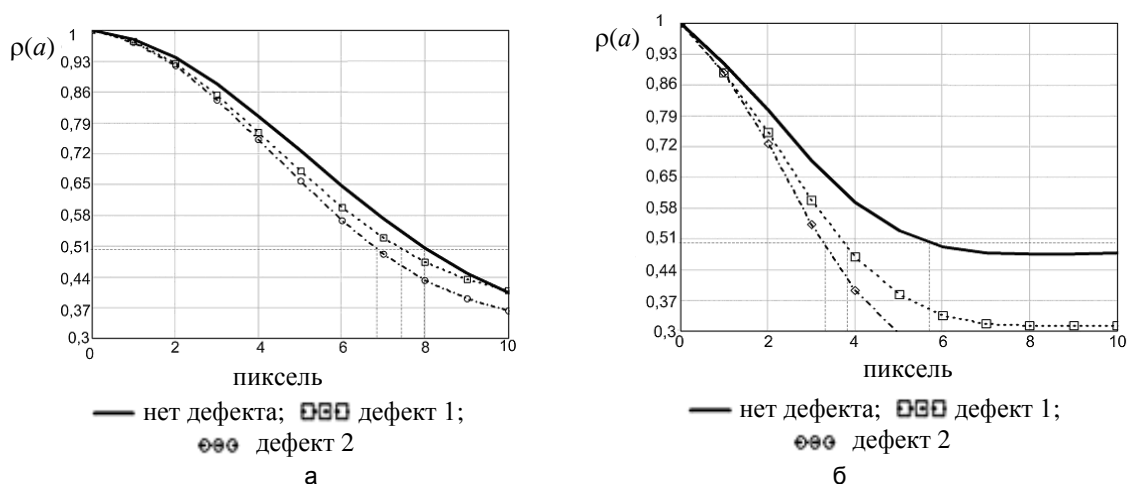


Рис. 4. Результаты корреляционного анализа: зависимость величины функции автокорреляции (радиуса корреляции) спекл-картин, зарегистрированных при зондировании кромки лопатки АД плоским (а) и спиральным (б) волновым фронтом лазерного излучения

При оценке эффективности метода НК важнейшим параметром является его чувствительность. Для оценки чувствительности на этом интервале можно использовать прирост сигнала при изменении

шероховатости на 0,1 мкм. Для оценки чувствительности системы можно использовать величину интервала корреляции спекл-картин (2), зарегистрированных при измерении параметров шероховатости исследуемого металлического параллелепипеда,

$$r_k = \frac{\int_0^{\infty} R(r) dr}{R(0)}. \quad (2)$$

Эксперимент показал (рис. 5, а), что при использовании зондирующего спирального волнового фронта по сравнению с плоским волновым фронтом на интервале от начала координат до величины шероховатости 0,3 мкм угол наклона кривой к горизонтальной оси возрастает. Следовательно, прирост сигнала на единицу изменения шероховатости растет, что говорит о возможности повышения чувствительности системы.

В ходе выполненных расчетов установлено, что при использовании в качестве зондируемого волнового фронта спирального на участках измерения параметров шероховатости  $Ra < 0,3$  мкм чувствительность системы возрастает на 40%, что позволяет расширить диапазон измерения параметров  $Ra$  и тем самым увеличить точность системы.

Определение эффективности использования спирального волнового фронта по отношению к плоскому, как и ранее, осуществлялось путем оценивания чувствительности диагностической системы. 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.

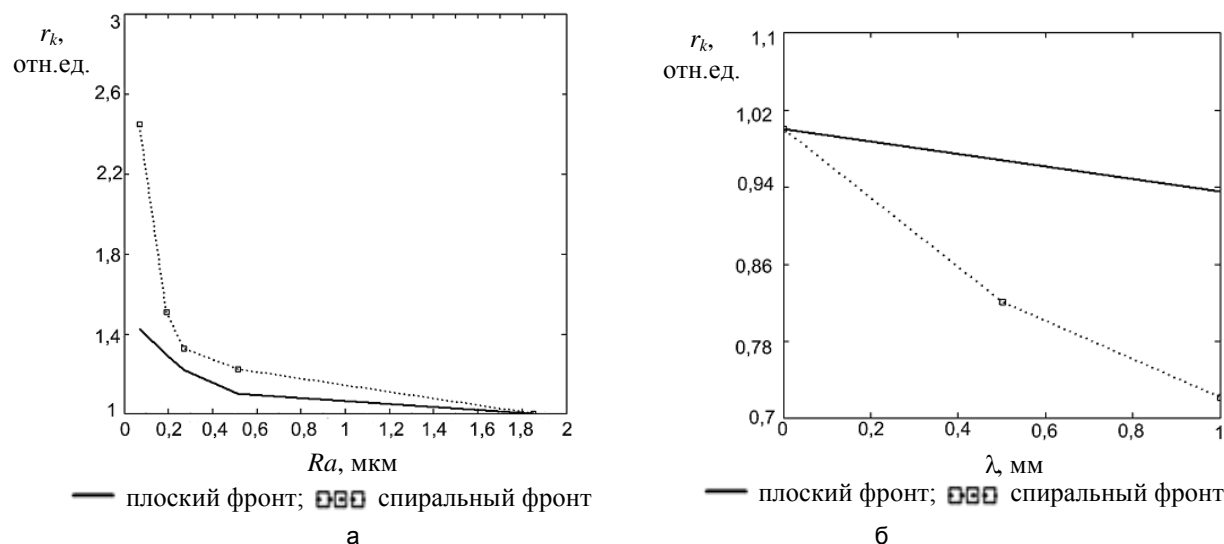


Рис. 5. График зависимости интервала корреляции спекл-картин от: параметров шероховатости  $Ra$  (а) и глубины дефекта  $l$  (б) при зондировании граней металлического параллелепипеда и кромки лопатки АД плоским и спиральным волновым фронтом излучения

Погрешности экспериментальных данных определяются нестабильностями лазерного излучения, шумами матричного фотоприемника и ошибками оцифровки сигнала и суммарно составляли не более 5%. Результаты, полученные в ходе эксперимента (рис. 5, б), подтверждают гипотезу о повышении эффективности системы дефектации кромки лопатки АД при использовании в МССОИ спирального зондирующего волнового фронта, а именно, на участках с забоинами, превышающими по глубине  $l > 0,7$  мм (критическое значение), возможно возрастание чувствительности системы до 60% по отношению к системе, использующей плоский волновой фронт.

### Заключение

В ходе численного моделирования и экспериментов показана возможность бесконтактного определения параметров шероховатости  $Ra$  в пределах 0,03–1,85 мкм и дефектации кромки лопатки авиационного двигателя при глубине забоины  $l = 0–0,8$  мм путем обработки зарегистрированных на ПЗС-матрице спекл-картин методом корреляционного анализа.

При использовании в МССОИ спирального зондируемого волнового фронта в процессе измерения параметров шероховатости чувствительность системы повышается на 40%, а при выявлении поверхностных дефектов контролируемой детали – примерно на 60%.

Работа выполнена в рамках государственного контракта ГК 14.740.12.08.41 при поддержке Министерства образования и науки РФ.

#### Литература

1. ГОСТ Р 53696-2009. Контроль неразрушающий. Методы оптические. Термины и определения. – Введ. 01.01.2011. – М.: Стандартиформ. – 2010. – 7 с.
2. Кульчин Ю.Н., Витрик О.Б., Ланцов А.Д. Корреляционный метод обработки спекловой картины сигналов с одноволоконных многомодовых интерферометров с использованием приборов с зарядовой связью // Квантовая электроника. – 2006. – № 4 (36). – С. 339–342.
3. Бадалян Н.П., Кийко В.В., Кислов В.И., Козлов А.Б. Лазерная дистанционная спекл-интерферометрия. Модель формирования спекл-структуры // Квантовая электроника. – 2008. – № 5 (38). – С. 477–481.
4. Бородин А.Н., Вайчас А.А., Малов А.Н., Миронов Б.М., Неупокоева А.В., Синицын И.А., Онацкий А.Н., Сычевский А.В., Чупраков С.А. Спекл-оптические методы исследования шероховатых поверхностей и подповерхностной структуры объектов // Физика наукоемких технологий. Вып. 2. – Иркутск: ИВВАИУ, 2008. – С. 5–71.
5. Benjamin J. McMorran, Amit Agrawal, Ian M. Anderson, Andrew A. Herzing, Henri J. Lezec, Jabez J. McClelland, John Unguris. Electron vortex beams with high quanta of orbital angular // Science. – 2011. – P. 192–195.
6. Абрамочкин Е.Г., Волостников В.Г. Современная оптика гауссовых пучков. – М.: Физматлит, 2010. – 184 с.
7. Котляр В.В., Хонина С.Н., Скиданов Р.В., Сойфер В.А. Вращение лазерных пучков, не обладающих орбитальным угловым моментом // Компьютерная оптика. – 2007. – № 31. – С. 35–38.
8. Сойфер В.А., Котляр В.В., Хонина С.Н., Скиданов Р.В. Оптическая микроманипуляция с использованием многопорядковых ДОО // Официальные материалы научно-практической конференции «Голография в России и за рубежом. Наука и практика». – 2006. – С. 57–59.
9. Волостников В.Г., Котова С.П., Лосевский Н.Н., Рахматулин М.А. Манипуляция микрообъектами с помощью пучков с ненулевым орбитальным моментом // Квантовая электроника. – 2002. – Т. 32. – № 7. – С. 565–566.
10. Павлов П.В., Малов А.Н., Бородин А.Н., Сычевский А.В. Применение спиральных пучков для дефектоскопии и неразрушающего контроля // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – Ч. 1. – Томск: ТУСУР, 2010. – № 2 (22). – С. 70–74.

**Павлов Павел Владимирович**

– Военный авиационный инженерный университет (г. Воронеж), аспирант, pashok8208@mail.ru

**Петров Николай Владимирович**

– Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат физ.-мат. наук, Nickolai.petrov@gmail.com

**Малов Александр Николаевич**

– ООО «Технологии прогресса» (г. Иркутск), доктор физ.-мат. наук, профессор, зам. директора, cohol2007@yandex.ru