

УДК 535.34

## **Аппаратно-программный комплекс неразрушающего контроля авиационных деталей**

**Павлов П.В.\*, Горюнов А.Е.\*\***

*Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия  
имени профессора Н.Е.Жуковского и Ю.А.Гагарина», ул. Старых Большевиков, 54а,  
Воронеж, 394064, Россия*

*\*e-mail: [pashok8208@mail.ru](mailto:pashok8208@mail.ru)*

*\*\*e-mail: [fadedflower@mail.ru](mailto:fadedflower@mail.ru)*

### **Аннотация**

В работе представлены результаты численного моделирования и экспериментальных исследований по использованию метода спекл-структур оптического излучения для диагностики деталей воздушных судов, а так же опытный макет устройства и программный комплекс спекл-лазерного контроля.

**Ключевые слова:** неразрушающий контроль, шероховатость, спекл, корреляция.

### **1. Введение**

Согласно статистики авиационных происшествий и авиационных инцидентов ежегодный ущерб от авиационных происшествий государственной авиации (ГА) России составляет более 2 млрд. рублей.

Происходящее перевооружение авиационных частей на дорогостоящую технику увеличивает ущерб от одного авиационного происшествия более чем в 10 раз.

При сохранении существующих показателей аварийности обновление парка воздушных судов (ВС) приведет к росту ущерба от авиационных происшествий до 8 – 10 млрд. рублей в год [1].

Модернизация существующих и разработка перспективных авиационных комплексов вооружения позволила расширить их диапазон применения, что непосредственно сказалось на увеличении нагрузок на все агрегаты воздушного судна в процессе эксплуатации. Одним из важных факторов, обуславливающих высокую аварийность ВС государственной авиации РФ является несовершенство находящихся на вооружении строевых частей устройств неразрушающего контроля (НК).

Так например, в основе дефектоскопических работ по осмотру некоторых поверхностей высоконагруженных деталей ВС лежит оптико-визуальный метод НК, следовательно, поэтому от эффективности его использования будет зависеть безопасность полетов авиапарка ГА РФ [2]. Основным недостатком оптико-визуального метода неразрушающего контроля является влияние человеческой составляющей на результат контроля и отсутствие возможности определения глубины повреждения (дефекта) детали. Таким образом, возникли обстоятельства, требующие от предприятий промышленности, и, в частности, от учреждений, занимающихся выпуском устройств НК, разработки новых, высокоточных оптических устройств НК, которые бы позволяли производить весь комплекс операций по дефектоскопическому контролю поверхностей авиационных деталей, узлов и агрегатов при подготовки авиационной техники к полетам на высоком технологическом уровне.

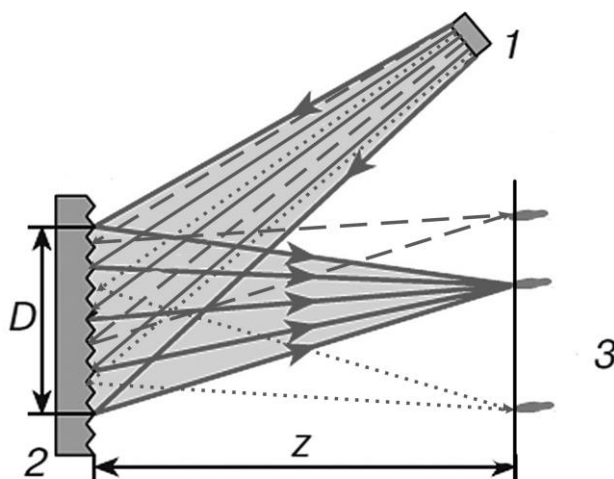
Наличие современной элементной базы оптоэлектроники – полупроводниковые лазерные диоды (способных заменить существующие газовые лазеры), матричные

фотоприемники (ПЗС, КМОП и др. матрицы – новые системы ввода и получения изображений), а так же возможность реализации различных алгоритмов обработки изображений на портативных ЭВМ позволяет создать мобильные, автономные и портативные средства диагностики, удовлетворяющие всему перечню мероприятий по НК поверхностей авиационных деталей на высоком технологическом уровне.

Анализ лазерных методов дефектоскопического контроля показал, что самым оптимальным и легкорезализуемым, является метод спекл-структур оптического излучения (МССОИ) [3].

Физический смысл МССОИ состоит в следующем. Если освещать шероховатый предмет когерентным пучком излучения (лазером), то изображение, которое наблюдается, либо глазом, либо при помощи оптической системы, имеет ярко выраженную зернистую структуру (спекл-картина) (рис. 1). Характер и структура спекл-картины полностью зависит от структуры облучаемой поверхности, поэтому при образовании мельчайшего дефекта соизмеримым с длиной волны излучения) на контролируемой поверхности происходит изменение структуры спекл-изображения.

Регистрируемые спекл-структуры несут информацию о рассеивающих свойствах поверхностей объектов, поэтому исследование их статистических параметров актуально как с фундаментальной, так и с прикладной точек зрения.



1 – лазер; 2 – освещаемый объект; 3 – зона формирования спекл-картины,  $Z$  – расстояние для установки ПЗС-матрицы

Рис. 1 – Формирование отраженной спекл-картины шероховатой поверхностью

На сегодняшний момент можно выделить ряд конкретных областей, где применение оптических методов НК на основе анализа спекл-структур имеет большие перспективы. Это такие области, как:

- исследование степени деформации конструкций объектов с использованием методов спекл-интерферометрии [4];

- исследование состояния организма по биоспеклам кожи, где решается задача определения скорости передвижения различных биологических объектов, что необходимо для решения диагностических проблем сердечно-сосудистой и нервной деятельности [5];

- исследование концентрированных потоков энергии при помощи спекл-голографических интерферометров [6].

Однако, остается открытым вопрос по разработке устройств НК принцип действия которых основан на использовании МССОИ поэтому актуальным является

решение научно-прикладной задачи по созданию портативных устройств, принцип действия которых основан на МССОИ.

**Целью настоящей работы** является повышение эффективности оптических методов НК путем разработки устройств НК поверхностей высоконагруженных узлов, агрегатов и деталей ВС на основе использования МССОИ.

Работу построим следующим образом. Сначала мы представим результаты численного моделирования и экспериментальных исследований по оценке состояния поверхностной и подповерхностной структуры контролируемых объектов с использованием МССОИ, далее на основе результатов численного моделирования и экспериментального исследования с учетом реализации МССОИ разработаем макет устройства и программный комплекс НК.

## **2. Результаты численного моделирования**

В ходе численного моделирования рассмотрим процесс регистрации спекл-картин при прохождении и отражении плоского волнового фронта от поверхности с различными параметрами шероховатости. Пусть рельеф поверхности задается двумерной функцией  $h(x, y)$  по средней линии профиля. Для расчета распределение комплексной амплитуды поля в плоскости регистрации волновое поле, падающего на шероховатую поверхность, необходимо умножить на функцию фазового запаздывания  $\exp[i\varphi(x, y)]$  где  $\varphi(x, y) = 2kh(x, y)$ , после чего амплитуду и фазу следует отобразить горизонтально, как в случае отражения от зеркала.

Размеры шероховатостей моделируемых поверхностей будем характеризовать средним арифметическим отклонением профиля  $R_a$ , который вычисляется по всей рабочей области, разбитой на  $M \times N$  интервалов:

$$R_a = \frac{1}{MN} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N |h(x_m, y_m) - \langle h \rangle|, \quad (1)$$

где  $\langle h \rangle$  определяет среднюю линию профиля:

$$\langle h \rangle = \frac{1}{MN} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N h(x_m, y_n). \quad (2)$$

В ходе моделирования был проведён расчёт волнового поля в плоскости регистрации изображения путём реализации алгоритма свёртки [7].

Расчётная формула для поля прошедшего через оптическую систему выглядела следующим образом:

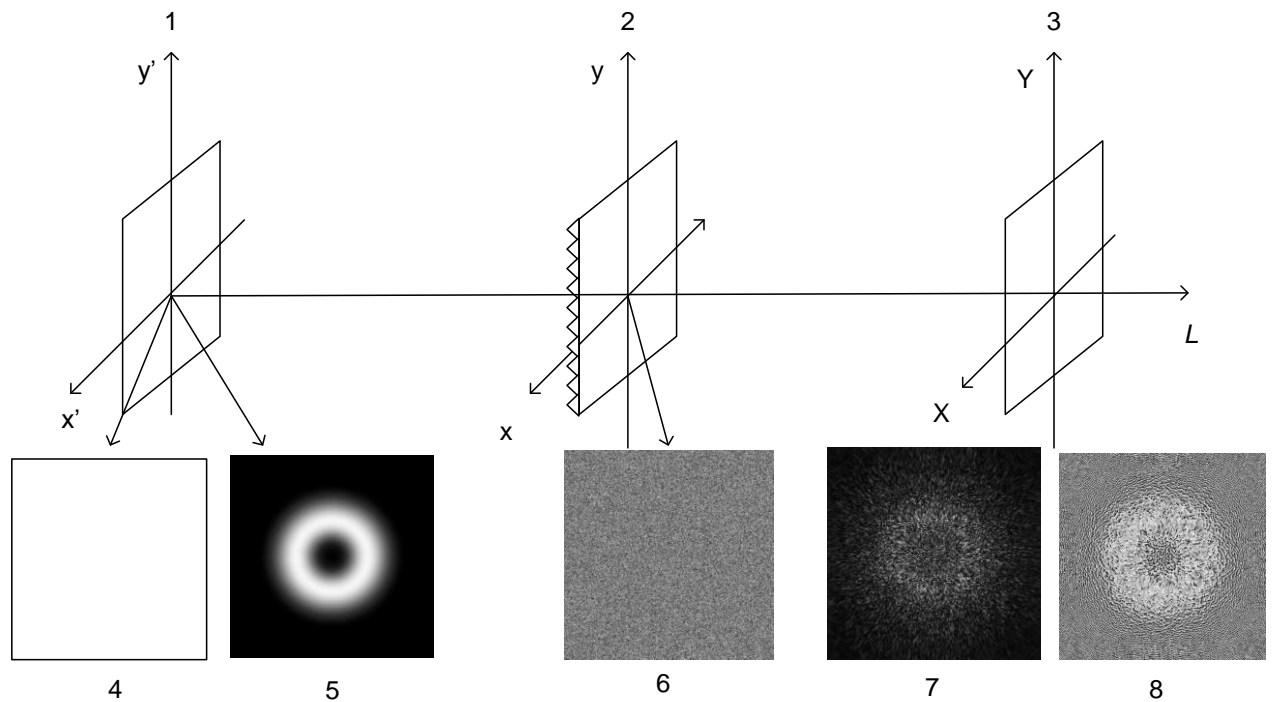
$$u(x, y, l) = FFT^{-1} \{ FFT[U_0(x', y')] \times FFT \left[ \frac{\exp\{ikr\}}{i\lambda r} \cdot \frac{l}{r} \right] \}, \quad (3)$$

где:  $U_0$  – начальное распределение амплитуды;  $kr$  – множитель, задающий начальную фазу лазерного пучка;  $l$  – расстояние до плоскости наблюдения картины;  $\lambda$  – длина волны излучения;  $r$  – расстояние до точки наблюдения картины;  $x', y'$  – координаты точки в плоскости исходного пучка;  $x, y$  – координаты точки в плоскости регистрации спекл-изображения;  $u(x, y, l)$  – функция, описывающая волновое поле в плоскости регистрации спекл-изображения;  $FFT$  – быстрое преобразование Фурье;  $FFT^{-1}$  – обратное преобразование Фурье.

Моделирование осуществлялось при помощи программного пакета LabView и проводилось для двух случаев: с отражением излучения от поверхности и

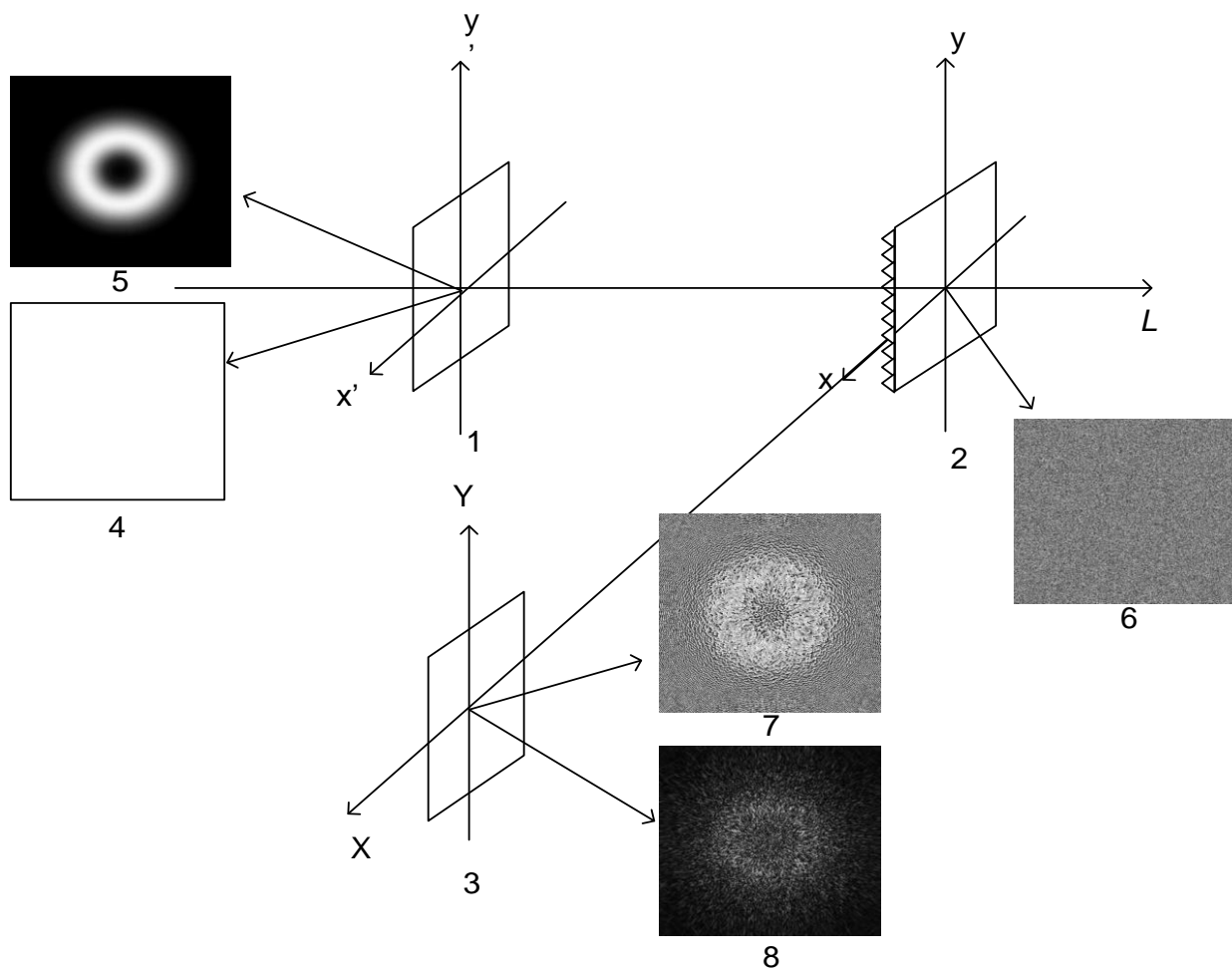
прохождением излучения в глубину материала. Параметры оптической системы, используемые при моделировании имели следующие значения:  $\lambda=0,5$  мкм,  $Ra=2,6$  мкм,  $L=39$  мм, размер экрана –  $D=0,096$  мм, число пикселей  $512*512$ ,  $n=1,5$  – показатель преломления среды образца,  $L_{2,3}=2l_0$  – расстояние от поверхности образца до плоскости регистрации, где  $l_0$  – граница ближней и дальней зон дифракции, число Френеля  $F=30$ .

Ниже представлены схемы моделируемой оптической системы на пропускание (рис. 2) и на отражение (рис. 3):



1 – плоскость исходного пучка, 2 – шероховатая поверхность, 3 – матрица регистрации спекл-картины, 4 – исходное распределение фазы пучка, 5 – исходное распределение амплитуды пучка, 6 – поверхность образца, 7 – спекл-картина распределения амплитуды пучка в плоскости регистрации, 8 – спекл-картина распределения фазы пучка в плоскости регистрации

Рис. 2 – Схема оптической системы НК с пропусканием лазерного излучения через материал



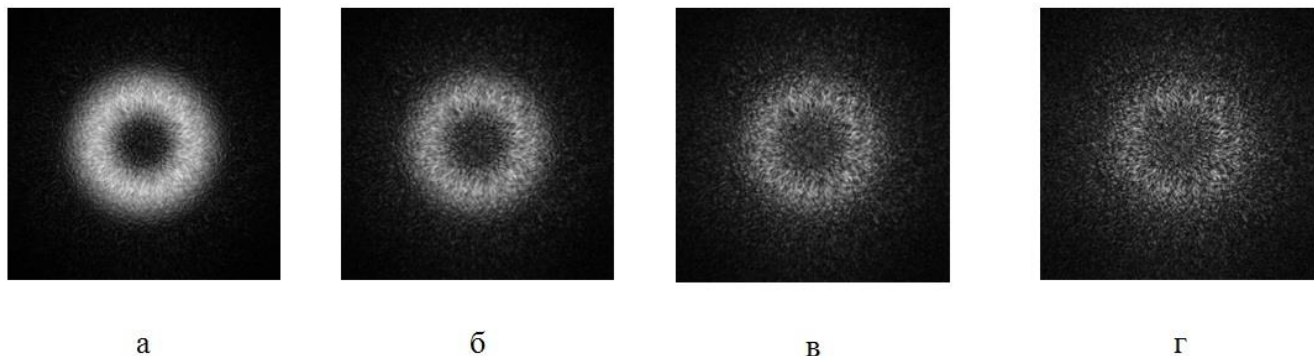
1 – плоскость исходного пучка, 2 – шероховатая поверхность, 3 – матрица регистрации спекл-картины, 4 – исходное распределение фазы пучка, 5 – исходное распределение амплитуды пучка, 6 – поверхность образца, 7 – спекл-картина распределения амплитуды пучка в плоскости регистрации, 8 – спекл-картина распределения фазы пучка в плоскости регистрации

Рис. 3 – Схема оптической системы НК с отражением лазерного излучения от поверхности образца

В ходе численного моделирования были получены результирующие распределения интенсивности отраженного (рис. 4) и прошедшего через материал лазерного излучения (рис. 5) с плоским волновым фронтом. По характеру структуры изображения видно, что в нарушение распределения интенсивности зондируемого пучка непосредственно вносит вклад изменение высотных параметров

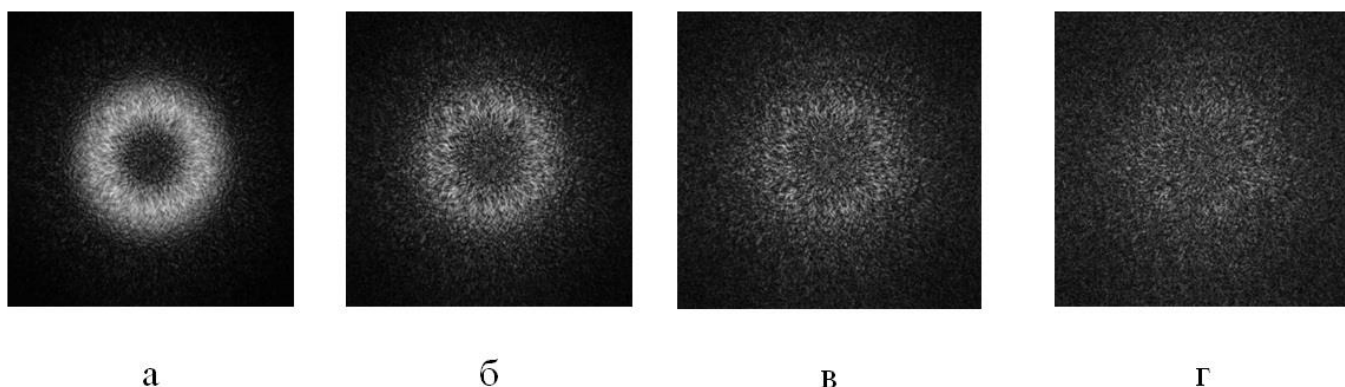


контролируемой поверхности, чем больше высота неровностей  $h$ , тем сильнее разрушается поперечная структура пучка, тем больше спеклов формируется на изображении.



а –  $h=0,5$  мкм, б –  $h=1$  мкм, в –  $h=1,5$  мкм, г –  $h=2$  мкм

Рис. 4 – Спекл-картины зарегистрированные при прохождении плоского волнового фронта через объект с показателем преломления  $n=1,5$  и с различными значениями высоты неровностей

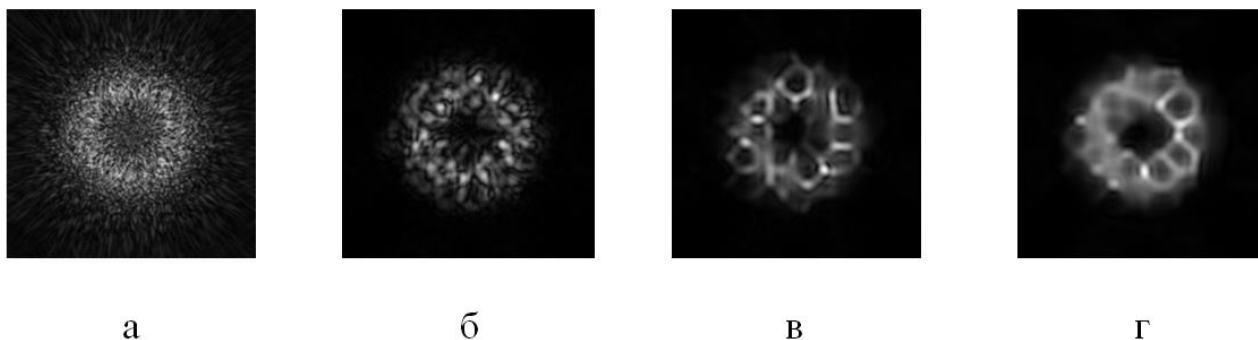


а –  $h=0,5$  мкм, б –  $h=1$  мкм, в –  $h=1,5$  мкм, г –  $h=2$  мкм

Рис. 5 – Спекл-картины зарегистрированные при отражении плоского волнового фронта от шероховатых поверхностей с различными значениями высоты неровностей

Так же в ходе численного моделирования произведена оценка состояния поверхности с различным шагом неровностей  $S_m$  с использованием МССОИ, результирующие спекл-картины, полученные в ходе исследований представлены на рис. 6. В ходе численного исследования были использованы следующие параметры

оптической системы:  $l=0,61$  мм – расстояние от плоскости источника излучения до исследуемой поверхности, длина волны излучения  $\lambda=0,5$  мкм. Параметры исследуемой поверхности:  $\Delta x = 0,1$  мкм (размер пикселя), высота неровностей  $h=2$  мкм  $D= 51,2$  мкм (размер экрана и зондируемой поверхности). В ходе численного моделирования величина шага неровностей  $S_m$  варьировалась в пределах от 0,1 до 1,7 мкм.



а –  $S_m=0,1$  мкм, б –  $S_m =0,8$  мкм, в –  $S_m =1,3$  мкм, г –  $S_m =1,7$  мкм

Рис. 6 – Спекл-картины полученные при отражении плоского волнового фронта от шероховатых поверхностей с различными значениями шага неровностей  $S_m$

Из рис. 6 можно видеть, что при небольших значениях шага неровностей  $S_m$  большой вклад в изменение распределения амплитуды спекл-поля лазерного излучения вносит параметр  $h$ , по мере увеличения шага расстояние между ближайшими выступами поверхности растёт (поверхность становится более плоской), следовательно, изображение деформируется слабее.

Оценка параметров контролируемой поверхности при использовании МССОИ осуществлялась по определению нормированной автокорреляционной функции (НАФ) (4) распределения интенсивности поля в плоскости наблюдения и по ее радиусу корреляции (5):

$$\rho(\Delta x) = \frac{\overline{[I(x) - \bar{I}][I(x + \Delta x) - \bar{I}]}}{\overline{[I(x) - \bar{I}]^2}}, \quad (4)$$

$$R_{кор} = \int_0^{\infty} \rho(\Delta x) d\Delta x. \quad (5)$$

На основании полученных результатов были построены графики зависимостей интервала корреляции регистрируемых спекл-картин  $R_{кор}$  от высотных параметров контролируемой поверхности при отражении и пропускании когерентного излучения через образец (рис.7).

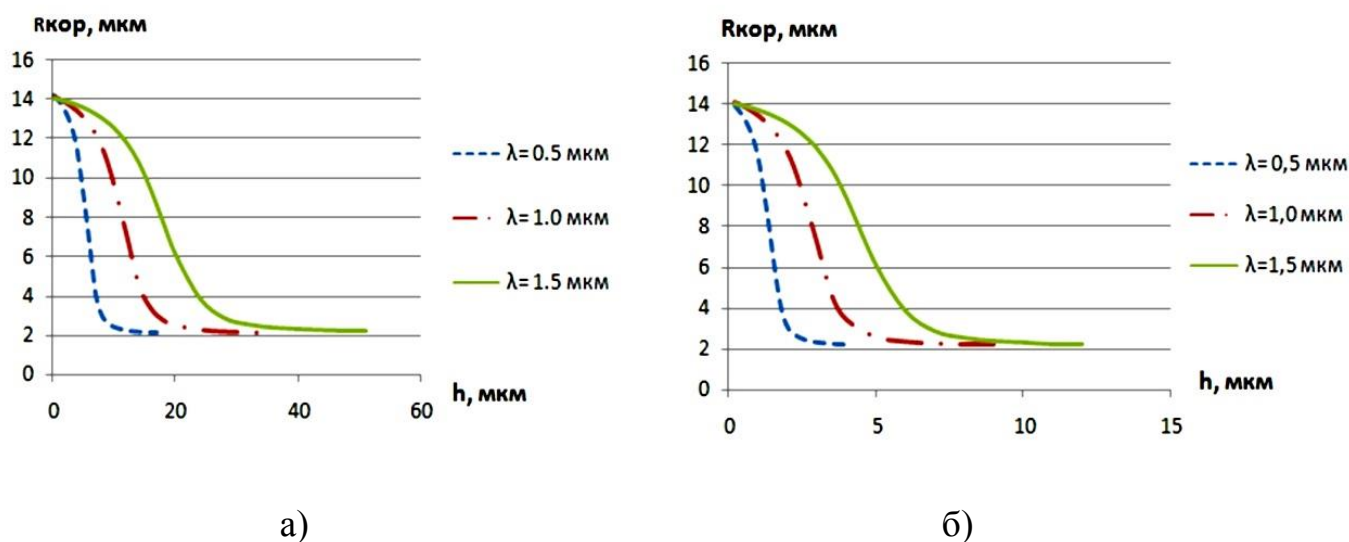


Рис. 7 – Зависимости интервала корреляции регистрируемых спекл-картин от высотных параметров шероховатости  $h$  а) при прохождении излучения через оптическую систему б) при отражении от поверхности

В результате моделирования были определены предельные значения высотных параметров неровностей  $h$ , которые доступны для диагностики МССОИ с использованием корреляционного анализа. Данные значения представлены в таблице 1.

Таблица 1

## Результаты моделирования для схемы с отражением и пропусканием излучения

	Отражение			Пропускание		
	$\lambda=0,5$ мкм	$\lambda=1$ мкм	$\lambda=1,5$ мкм	$\lambda=0,5$ мкм	$\lambda=1$ мкм	$\lambda=1,5$ мкм
Высотный параметр h	4 мкм	8 мкм	11 мкм	16 мкм	34 мкм	50 мкм

Из результатов, приведённых в таблице 1 можно видеть, что в случае регистрации спекл-картины при прохождении излучения через оптическую систему (через материал образца) диапазон размеров неровностей, в пределах которого применим метод корреляционной обработки больше примерно в 4 раза, чем в случае отражения волнового фронта от поверхности с последующей регистрацией картины сразу на матрицу экрана ( $h_{\max} \leq 8\lambda$  – для отражения,  $h_{\max} \leq 32\lambda$  – для пропускания).

### 3. Результаты экспериментального исследования

Для практических исследований МССОИ в лабораторных условиях была разработана экспериментальная установка, внешний вид и схема которой представлена на рис. 8.

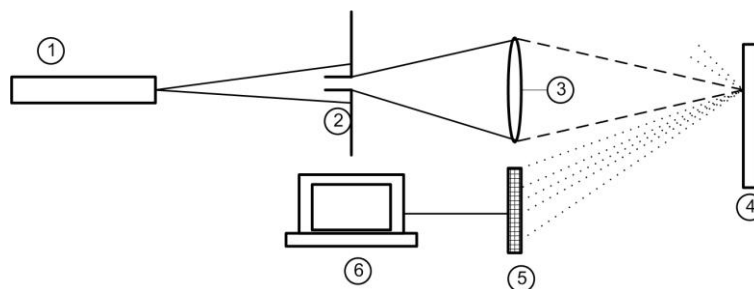
Данная установка позволяет проводить работы по дефектоскопическому контролю поверхностей авиационных деталей, определению параметров шероховатости контролируемой поверхности, а так же осуществлять контроль внутреннего состояния деталей из полупрозрачных материалов.

В качестве источника когерентного излучения применялся He-Ne лазер ЛГН-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 ACE-S560CHB с разрешением  $640 \times 480$  пикселей, регистрирующая изображения в черно-белых тонах. Расстояние от контролируемой поверхности до плоскости наблюдения составляло 22 см.



а)



б)

1 – лазер ЛГН-40; 2 – диафрагма; 3 – линза; 4 – металлический шестигранник (или лопатка компрессора АД); 5 – ПЗС-матрица; 6 – вычислительное устройство

Рис. 8 – Внешний вид а) и схема установки б), используемой в эксперименте

Для исследования контролируемых объектов на отражение было выбрано два тестовых объекта:

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

2. Лопатка компрессора АД с двумя забоинами на входной кромке. Первая забоина имела глубину 0,8 мм и ширину 0,5 мм, а вторая глубину 1 мм и ширину 0,8 мм.

3. Заготовки из композитных материалов лопасти несущего винта вертолета МИ-28Н – препрег стеклонить ВППС-7 со связующим ЭДТ-10П. Каждый образец

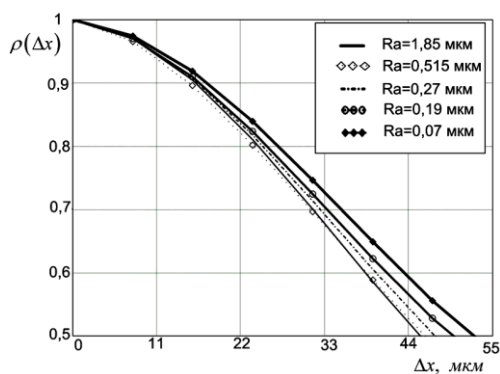
имел определенную толщину (4 мм и 10 мм) соответственно. Дефекты имитировались сквозными отверстиями диаметром 2, 3, и 4 мм в торце образцов.

В первой части эксперимента с целью определения параметров шероховатости с помощью МССОИ каждая из поверхностей металлического шестигранника подвергалась зондированию, часть рассеянного излучения фиксировалась матрицей ПЗС-приемника и передавалась в виде цифрового изображения на компьютер, где оно записывалось в виде матрицы действительных значений интенсивности, далее проводилась корреляционная обработка регистрируемых спекл-картин.

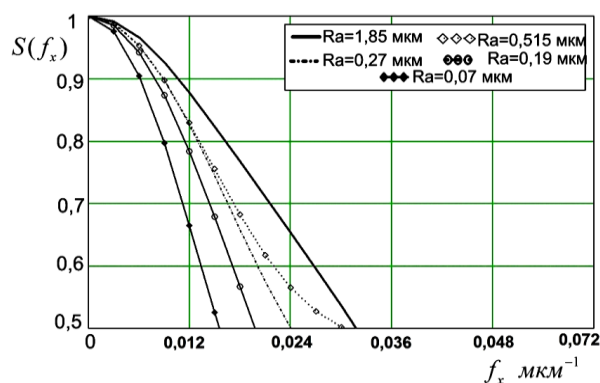
В результате корреляционной обработки определялась НАФ (4) и энергетический спектр поля регистрируемых спекл-картин (6):

$$S(f_x) = \int_{-\infty}^{+\infty} \rho(\Delta x) e^{-2\pi i f_x \Delta x} d\Delta x \quad (6)$$

В ходе эксперимента было установлено, что: при зондировании контролируемой поверхности плоским волновым фронтом величина НАФ спекл-картины, регистрируемой в процессе зондирования каждой грани параллелепипеда, непосредственно зависит от параметра шероховатости  $R_a$ , что отчетливо наблюдается на графиках НАФ (рис. 9а). Чем больше  $R_a$ , тем ширина НАФ (интервал корреляции) спекл-картины меньше, и наоборот, величина энергетического спектра-поля (6) обратно пропорциональна НАФ (рис. 9б). Таким образом, зная параметры регистрируемых спекл-картин можно производить оценку параметров шероховатости  $R_a$  контролируемой поверхности.



а)



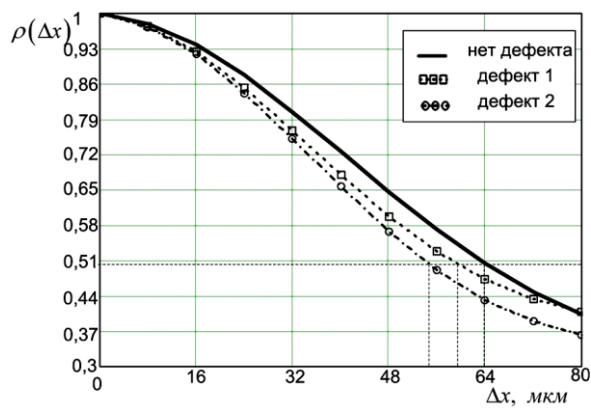
б)

Рис. 9 – Результаты корреляционного анализа: а) – зависимости величины НАФ спекл-картин и б) – зависимость величины энергетического спектра поля спекл-картин от параметра шероховатости  $R_a$ .

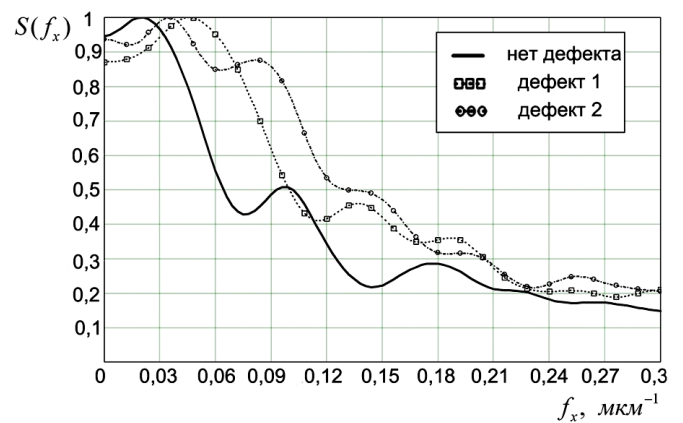
Во второй части экспериментального исследования при контроле входной кромки лопатки АД предлагаемым методом НК было установлено, что: при зондировании контролируемой поверхности величина НАФ спекл-картины, регистрируемой в процессе зондирования от каждого участка входной кромки лопатки, непосредственно зависит от глубины и ширины забоины, что отчетливо наблюдается на графиках НАФ (рис. 10).

В ходе эксперимента установлено, чем больше глубина  $\ell$  и ширина забоины, тем ширина НАФ (интервал корреляции) спекл-картины меньше, и наоборот, величина энергетического спектра-поля обратно пропорциональна НАФ спекл-картины.

Для реализации третьей части эксперимента была разработана экспериментальная установка, позволяющая производить контроль состояния внутренней структуры полупрозрачных объектов, в частности из композитных материалов с использованием МССОИ.



а)



б)

Рис. 10 – Результаты корреляционного анализа: а) – зависимости величины НАФ спекл-картин и б) – зависимость величины энергетического спектра поля спекл-картин от параметров дефекта

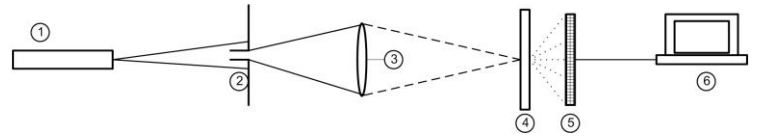
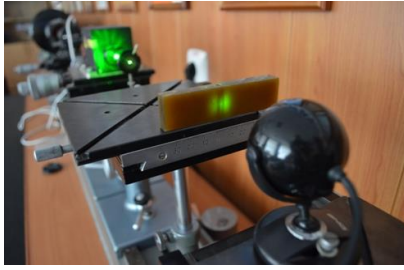
Внешний вид и схема экспериментальной установки представлена на рис. 11.

В качестве источника излучения применялся регулируемый по мощности одномодовый твердотельный лазер с диодной накачкой SLM-417 (5 – 20 мВт) с длиной волны 532 нм. Приемником оптического излучения выступала цветная цифровая камера SDU-415C с матрицей разрешением 768x576 и размером пикселя 8,3\*8,3 мкм.

В ходе эксперимента каждый из образцов подвергался зондированию, сначала неповрежденная часть, затем излучение пропускали через участки с дефектами диаметр которых составлял 2, 3 и 4 мм. Зарегистрированные на матрице фотокамеры спекл-картины распределения интенсивности прошедшего лазерного излучения также подвергались корреляционной обработке.

По полученным результатам получены графики функции автокорреляции регистрируемых спекл-картин. (рис.12), а так же определены их радиусы корреляции и ширина энергетического спектра (таблица 2).





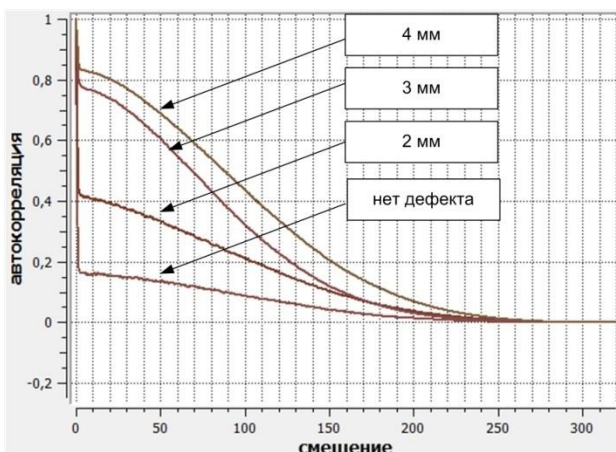
а)

б)

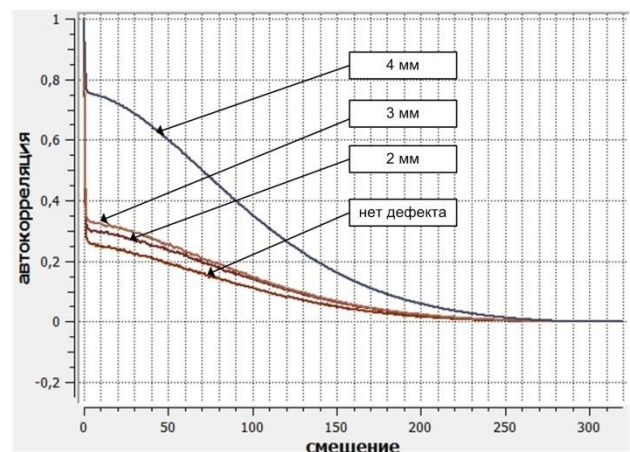
1 – лазер SLM-417; 2 – диафрагма; 3 – линза; 4 – образец из композитного материала; 5 – камера SDU-415C; 6 – вычислительное устройство

Рис. 11 – Внешний вид а) и схема установки б), используемой в эксперименте

По полученным экспериментальным данным было установлено, что при увеличении размера дефекта значение величины радиуса корреляции увеличивается, а ширины энергетического спектра уменьшается, что объясняется меньшим пропусканием лазерного излучения через материал в области с большим диаметром внутреннего дефекта. Установлено, что наиболее чувствительным параметром регистрируемых спекл-картин при использовании корреляционного анализа является радиус корреляции.



а)



б)

Рис. 12 –Графики функций автокорреляции регистрируемых спекл-картин при зондировании образца толщиной 4 мм – а) и 10 мм – б)

Значения радиусов корреляции и ширины энергетического спектра поля спекл-картин

	Композит 4 мм		Композит 10 мм	
	Мощность 5 мВт		Мощность 10 мВт	
	Интервал корреляции, мкм	Ширина энергетического спектра, мкм	Интервал корреляции, мкм	Ширина энергетического спектра, мкм
Без дефекта	0,44126	0,321342	0,482012	0,346863
2 мм	1,03167	0,318413	0,526801	0,335655
3 мм	68,7291	0,315739	0,583114	0,331772
4 мм	87,6644	0,310277	7,10781	0,330841

Для проведения комплекса мероприятий по применению и оценке эффективности использования МССОИ по определению параметров шероховатости и дефектоскопического контроля поверхностей деталей ВС, разработан и исполнен макет мобильного спекл-лазерного дефектоскопа «ЛСДС-2», способного выполнять комплекс операций по НК деталей ВС.

В основу реализации данного устройства легли материалы патента РФ на полезную модель «Устройство бесконтактного определения шероховатости» [8]. Структура и внешний вид макета опытного образца прибора представлен на рис. 13.

Принцип действия прибора основан на следующем: исследуемый объект освещается когерентным пучком света от полупроводникового лазерного диода,

часть рассеянного исследуемой поверхностью излучения фиксируется ПЗС-матрицей и передается в виде цифрового изображения на компьютер, где оно записывается в виде матрицы действительных значений интенсивности и обрабатывается с помощью программы. Полученные изображения затем подвергаются корреляционному и статистическому анализу для построения пространства признаков и для выяснения степени поврежденности поверхности по корреляционным, вейвлет или другим алгоритмам, реализуемым с помощью специализированного программного обеспечения на ноутбуке.

Для обработки спекл-изображений с использованием инструментария Qt, библиотек QWT и компилятора GNU C++ разработан программный продукт, который позволит автоматизировать процесс дефектоскопического контроля поверхностей авиационных деталей при подготовке ВС к полетам [9].

Программный комплекс выполняет задачи автоматизации захвата изображения с мобильного спекл-лезерного дефектоскопа, вычисления функции автокорреляции и величины энергетического спектра поля спекл-картин.

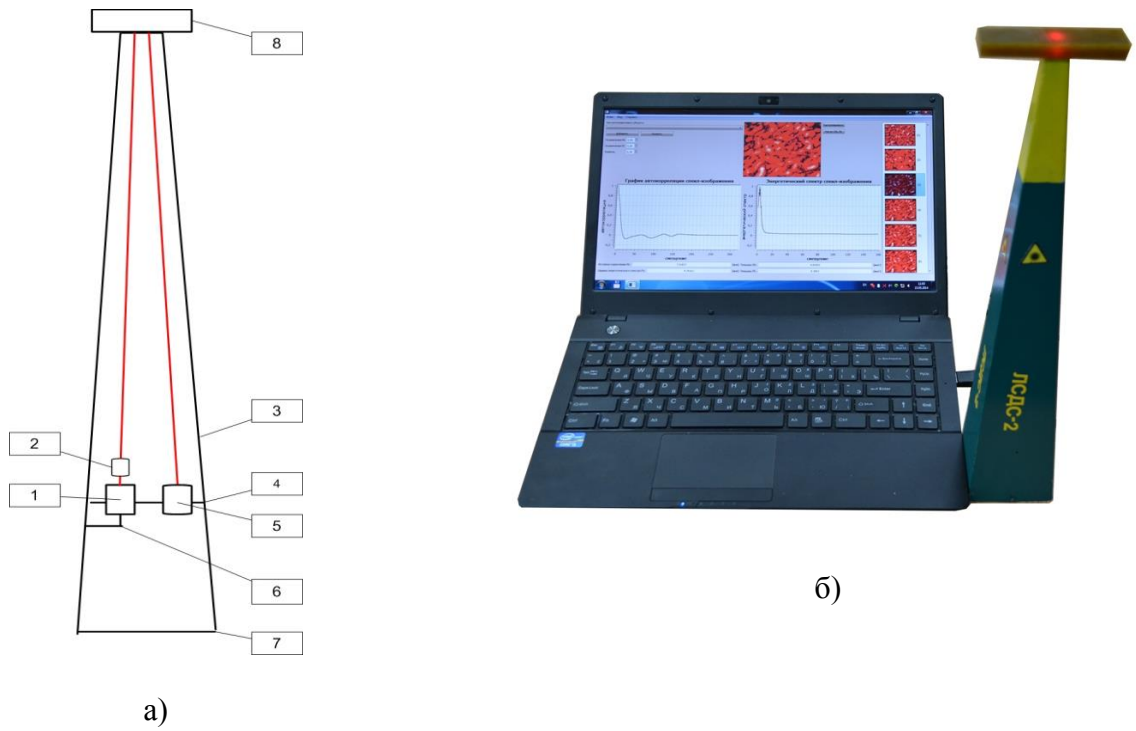


Рис. 14 – Структура и внешний вид прибора: 1 – источник лазерного излучения; 2 – расширитель лазерного пучка; 3 – корпус; 4 – подложка; 5 – ПЗС-матрица; 6 – юстировочное устройство; 7 – основание корпуса; 8 – контролируемый объект

Для вычисления функции автокорреляции выполняются следующие функции: функция пошагового смещения спекл-картины по осям и с шагом  $\Delta=1$  пиксель относительно первоначального положения; функция вычисления коэффициента корреляции Пирсона (7) между распределением интенсивностей спекл-картины в начальном положении и положении со сдвигом; функция построения графика зависимости коэффициента корреляции от смещения спекл-картины на плоскости.

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^m ((x)_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^m ((x)_i - \bar{x})^2 (y_i - \bar{y})^2}} = \frac{\text{cov}(x, y)}{\sqrt{s_x^2 s_y^2}}, \quad (7)$$

где:  $\bar{x}, \bar{y}$  – выборочные средние  $x^m, y^m$ ;  $s_x^2, s_y^2$  – выборочные дисперсии;  $r_{xy} \in [-1; 1]$ .

Для вычисления энергетического спектра поля спекл-картин была реализована функция обратного дискретного преобразования Фурье (8), зависимости энергетического спектра поля от смещения спекл-картины на плоскости:

$$x_n = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^K X_k e^{\frac{-2\pi i k n}{K}}, \quad (8)$$

где:  $N$  – количество значений корреляционной функции;  $X$  – множество значений корреляционной функции.

Интерфейс программного продукта был разработан с учетом невысокого уровня подготовки оператора (рис. 14).

Результаты вычислений сохраняются в памяти персонального компьютера, либо на любом другом носителе, предоставляющем возможность перезаписи информации. Для обеспечения унификации хранимых данных разработана база данных, в таблицах которой заносятся типы исследуемых авиационных деталей, значения функций автокорреляции, интервалов функции автокорреляции, ширины энергетического спектра регистрируемых спекл-картин полученных от контролируемых участков поверхностей.

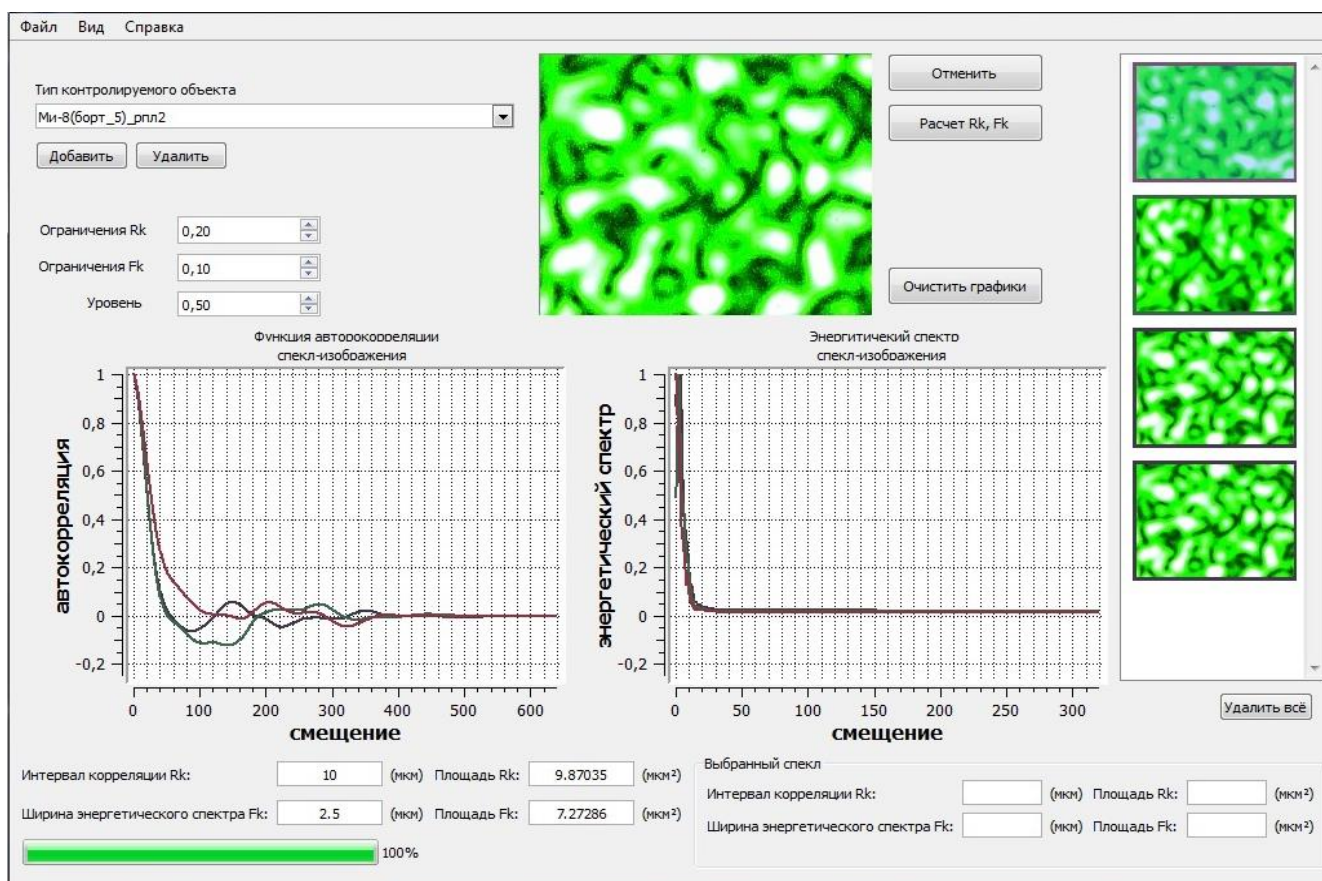


Рис. 14 – Графический пользовательский интерфейс программного комплекса обработки спекл-изображений

#### 4. Заключение

Таким образом, создание аппаратно-программного комплекса НК, включающего в себя мобильный спекл-лазерный дефектоскоп и информационно-программный комплекс НК позволит автоматизировать процесс дефектоскопического контроля, повысить достоверность результатов измерений, сократить время диагностики, и как следствие время на подготовку воздушного судна к полетам. Внедрение данного устройства на производстве, а так же в полевых условиях при подготовке ВС к полетам, позволит своевременно и с необходимой точностью (согласно требованиям нормативной документации) производить операции по НК поверхностей авиационных деталей на высоком технологическом уровне, исключая при этом влияние

человеческого фактора на результат контроля, и тем самым уменьшить количество случаев пропуска неисправных (бракованных) авиационных деталей.

*Авторы благодарят научного руководителя профессора Малова А.Н. за обсуждения результатов исследований, Петрова Н.В. за помощь в подготовке работ по выполнению численного моделирования, а так же Полиенко А.А. за предоставленные образцы из композитного материала.*

### **Библиографический список**

1. Пшизов А.К. Состояние аварийности государственной авиации Российской Федерации // Сборник трудов общества независимых расследований авиационных происшествий. 2011. Выпуск № 23. С. 44 – 59.
2. Белокопытов В.А., Разиньков В.В., Трофимов Г.М. О необходимости дифференцированного подхода к эксплуатации рычагов поворота лопастей втулок несущих винтов вертолетов семейства Ми-8 и типа Ми-24 // Научный вестник МГТУ ГА. 2011. №163 (1). С. 176 – 182.
3. Контроль неразрушающий. Методы оптические. Термины и определения. ГОСТ Р 53696-2009. - М.: Стандартиформ, 2010. - 7 с.
4. Владимиров А.П. Динамическая спекл-интерферометрия деформируемых тел. - Екатеринбург: УрО РАН, 2004. - 241 с.
5. Тучин В.В. Лазерная диагностика в биологии и медицине. - М.: Наука, 1989. – 237 с.

6. Клименко И. С. Голография сфокусированных изображений и спекл-интерферометрия. - М.: Наука, 1985. - 224 с.
7. Doval, A. and Trillo, C. Dimensionless formulation of the convolution and angular spectrum reconstruction methods in digital holography. Proc. SPIE Vol. 7387, pp. 73870U (2010).
8. Устройство бесконтактного определения шероховатости. Патент №112991 РФ / Павлов П.В., Малов А.Н., Малов А.Н., Онацкий А.Н. Заявка № 2010126070/27, заявл. 25.06.10; опубл. 27.01.12, Бюл. №3. 6 с.
9. Колесов С.С., Вольф И.Е., Малов А.Н. Программный комплекс неразрушающего контроля на основе использования метода спекл-структур оптического излучения // Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2014617227. Зарегистрировано Роспатентом в Реестре программ для ЭВМ 15.07.2014.