



УДК 535.38
ГРНТИ 59.45.37

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА СПЕКЛ-СТРУКТУР ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ЗАДАЧАХ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

*П.В. ПАВЛОВ, кандидат технических наук
ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)
И.Э. ВОЛЬФ, кандидат технических наук
ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)
Н.В. МОСКВИН, оператор научной роты
ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)*

В статье рассматриваются пути по реализации устройств неразрушающего контроля, принцип действия которых основан на использовании метода спекл-структур оптического излучения, а также основные алгоритмы дефектоскопического контроля, реализованные в разработанном специализированном программном обеспечении, предназначенном для управления и автоматизированного контроля спекл-лазерным дефектоскопом.

Ключевые слова: неразрушающий контроль; дефектоскопия; спекл; обработка изображений; лазер.

OPTICAL RADIATION SPEL-STRUCTURES METHOD APPLICATION IN THE PROBLEMS OF NON-DESTRUCTIVE CONTROL

*P.V. PAVLOV, Candidate of Technical Sciences
MESC AF "N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy" (Voronezh)
I.E. WOLF, Candidate of Technical Sciences
MESC AF "N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy" (Voronezh)
N.V. MOSKVIN
MESC AF "N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy" (Voronezh)*

In the article considered ways on realization of non-destructive testing devices are considered. The principle of their operation is based on the use of the speckle structures method of optical radiation, as well as the basic algorithms of flaw detection that are implemented in the developed specialized software designed for control and automated control by a speckle laser flaw detector.

Keywords: non-destructive control; flaw detection; speckle; image processing; laser.

Введение. Последние события на международной политической арене показали, что одну из главных ролей в стабилизации мирового паритета и борьбе с терроризмом отводится Воздушно-космическим силам (ВКС). В связи с этим за последние годы нагрузка на все типы воздушных судов (ВС) увеличилась. Возросло число случаев, повышающих аварийность государственной авиации РФ по причине разрушения или нарушении прочности высоконагруженных узлов и агрегатов ВС. Зачастую это происходит из-за пропуска недопустимых повреждений и несовершенства находящихся на вооружении устройств дефектоскопического контроля.

Актуальность. Одним из самых распространенных методов дефектоскопического контроля на этапе подготовки ВС к полетам является оптико-визуальный, и, следовательно, от его результатов будет зависеть безопасность полетов. Главным недостатком данного метода является человеческий фактор, который влияет на достоверность результатов контроля, а также отсутствие возможности определения глубины залегания дефекта на поверхности детали. Посту-



пающие в строевые части ВКС МО РФ современные лаборатории неразрушающего контроля (ЛАБНК) не имеют в своем составе современных высокоточных оптических устройств НК. Поэтому разработка и внедрение прецизионных оптических устройств НК является актуальной научно-практической задачей.

Принципы работы современных оптико-электронных устройств НК построены на использовании свойств интерференции и дифракции волн лазерного излучения, которые легли в основу таких методов, как компьютерная голография, метод спекл-структур оптического излучения (МССОИ) и лазерная интерферометрия. Чувствительность лазерных методов НК позволяет выполнять измерения с разрешением, соизмеримым с длиной волны когерентного источника. Проанализировав принципы построения оптических устройств НК, а также элементную базу источников и приемников когерентного излучения в широком спектре длин волн выделяет МССОИ в один из перспективных методов НК [1]. При зондировании контролируемой поверхности детали когерентным излучением, часть рассеянного излучения, отражаясь или проходя через полупрозрачную среду претерпевает диффузное рассеяние и приобретает спекл-модуляцию. Таким образом, проводя анализ параметров и регистрируемого спекл-поля различными приемниками оптического излучения можно оценивать состояние зондируемых объектов. Вследствие интерференции отраженных волн, образующихся от разных точек зондируемой поверхности, в плоскости наблюдения (регистрации) образуются спекл-картины, несущие информацию об облучаемом объекте.

На сегодняшний момент можно выделить ряд областей, где МССОИ уже широко применяется в различных сферах диагностики:

- контроль состояния диффузно-рассеивающих объектов и сред [2-4];
- в астрономии для наблюдения астрономических объектов через турбулентную атмосферу Земли [5];
- системы восстановления волнового фронта [6] и формирования изображений рассеивающих объектов [7,8];
- системы зрительного восприятия человека [9];
- в биомедицинских приложениях [10].

Однако вопрос о практическом применении МССОИ в задачах дефектоскопического контроля на транспорте рассмотрен не был. Таким образом, **цель работы** заключается в оценке потенциальных возможностей МССОИ как инструмента дефектоскопического контроля авиационных деталей, выполненных из непрозрачных, полупрозрачных и композитных материалов.

Для решения поставленной цели в работе рассматриваются вопросы по практической реализации специализированного программного обеспечения, предназначенного для управления работой лазерного дефектоскопа с последующей обработкой и выдачей результатов измерений на основе использования алгоритмов цифровой обработки спекл-изображений. Для демонстрации возможностей МССОИ представлены результаты натуральных испытаний разработанных оптико-электронных систем, предназначенных для определения процесса трещинообразования и дефектоскопического контроля силовых элементов ВС.

Методы обработки цифровых спекл-фотографий.

Для реализации МССОИ известны способы построения оптических систем регистрации спекл-картин, которые могут быть реализованы по схемам записи с линзовой и безлинзовой фурье-спеклограмм со съёмным и несъёмным объективом цифровой камеры, с учетом характеристик источников и приемников оптического излучения, а также с учетом расстояния от рассеивающего объекта до плоскости регистрации спекл-картин [11].

Наиболее сложным этапом в реализации МССОИ является разработка инструмента компьютерной обработки регистрируемых цифровых спекл-картин. Для разработки специализированного программного обеспечения в качестве инструментов обработки спекл-изображений были использованы алгоритмы автокорреляционного анализа [12] и алгоритмы обработки методом «шахматной доски» [13].



Сущность метода автокорреляционного анализа заключается в определении параметров зондируемого объекта по анализу параметров функции автокорреляции регистрируемых спекл-картин (ширина и площадь функции автокорреляции). Принцип работы алгоритма автокорреляционного анализа заключается в осуществлении циклического сдвига исходного спекл-изображения относительно самого себя по осям координат OX, или OY, с шагом смещения, равный одному пикселю. При каждом таком смещении рассчитывается коэффициент автокорреляции исходного изображения и смещенного по формуле (1), после выполнения всех сдвигов получается множество коэффициентов автокорреляции со значениями, изменяющимися от 1, что свидетельствует о полном сходстве обрабатываемых изображений при шаге смещения равным нулю и до 0, что говорит о полном различии исходного и смещенного изображений. На завершающем этапе работы метода строится график автокорреляционной функции (рисунок 1) из рассчитанного множества коэффициентов автокорреляции:

$$r_{\tau} = \frac{(n-\tau) \sum_{t=1}^{n-\tau} x_t x_{t+\tau} - \sum_{t=1}^{n-\tau} x_t \sum_{t=1}^{n-\tau} x_{t+\tau}}{\sqrt{(n-\tau) \sum_{t=1}^{n-\tau} x_t^2 - (\sum_{t=1}^{n-\tau} x_t)^2} \sqrt{(n-\tau) \sum_{t=1}^{n-\tau} x_{t+\tau}^2 - (\sum_{t=1}^{n-\tau} x_{t+\tau})^2}}, \quad (1)$$

Таблица 1 – Результаты расчетов параметров регистрируемых спекл-картин

	Ширина функции автокорреляции	Площадь функции автокорреляции
Без дефекта	58,48	93,2
Глубина дефекта 1,2 мм	10,72	29,4
Глубина дефекта 1,4 мм	9,4	18,9
Глубина дефекта 1,6 мм	8,24	16,6

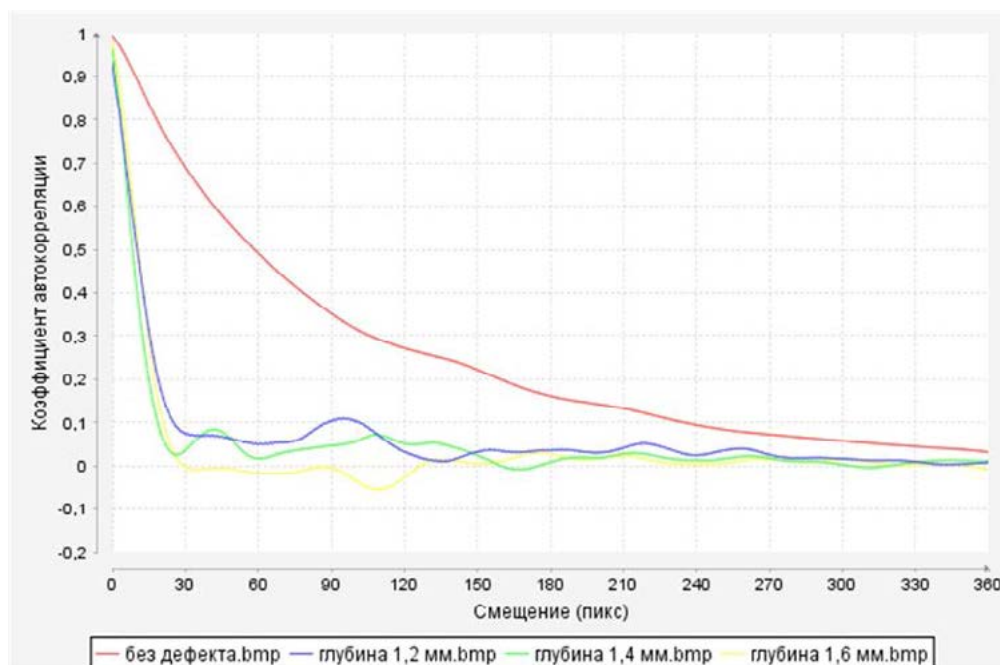


Рисунок 1 – Графики функций автокорреляции спекл-картин

где x_t – значение яркости пикселя в точке t ; $x_{t+\tau}$ – значение яркости пикселя в точке t , в момент смещения τ ; n – количество пикселей, τ – шаг смещения. Количество смещений соответствует размеру спекл-изображения, ширине в случае если производится смещение вдоль оси OX, и высоте в случае смещения по оси OY.



Данный метод позволяет в режиме реального времени проводить анализ параметров поверхности деталей, изготовленных из различных материалов путем сопоставления рассчитанных характеристик с эталонными значениями, полученными в тот момент времени, когда поверхность детали не имела дефектов.

Автокорреляционный анализ спекл-картин обычно сталкивается с трудностью в виде сложной формы функции корреляции, что не позволяет адекватно определить размер спекл-пятна и, соответственно, размер исходной неоднородности. Поэтому в другом методе должны быть реализованы алгоритмы, позволяющие определять средний размер спекл-пятна на регистрирующей спекл-структуре. С этой целью предлагается использовать метод, основанный на сопоставлении среднего размера спекл-пятна с размером клетки шахматной доски, разрешение которой совпадает с разрешением обрабатываемой спекл-структуры.

Пусть P – это регистрируемая спекл-структура, D – изображение шахматной доски, тогда p_{ij} – это матрица, представленная в виде пикселей изображения P ; d_{ij} – матрица, представленная в виде пикселей изображения D .

Для обработки спекл-структур методом «шахматной доски» необходимо:

1. Представить спекл-структуру в виде массива пикселей с палитрой RGB, т.к. пиксель это точка, состоящая из 3-х цветов (Red, Green, Blue), наиболее важной составляющей пикселя для данного метода является значение красного цвета, так как длина волны источника когерентного излучения соответствует 650 нм, поэтому необходимо оставить в значении пикселя только его, а все остальные цвета обнулить.

2. После этого необходимо произвести нормировку полученной матрицы, для этого делим все элементы матрицы на значение 255 (т.к. максимальное значение яркости равно 255, то после деления все элементы матрицы будут принимать значения от 0 до 1):

$$P_n = \frac{P_{ij}}{255}. \quad (2)$$

3. После нормировки матрицы необходимо получить спектр данного изображения, для чего используем дискретное двумерное преобразование Фурье и в результате получаем матрицу Fp_{i_1, i_2} , содержащую комплексные значения:

$$Fp_{i_1, i_2} = \frac{1}{I_1 I_2} \sum_{k_1=0}^{I_1-1} \sum_{k_2=0}^{I_2-1} P_{k_1, k_2} \exp \left(j \frac{2\pi}{I_1} i_1 k_1 + j \frac{2\pi}{I_2} i_2 k_2 \right), \quad (3)$$

где I_1 – высота изображения P , I_2 – ширина изображения P , P_{k_1, k_2} – коэффициенты матрицы P_n , $j = \sqrt{-1}$.

После получения спектра спекл-структуры необходимо получить спектр для изображения шахматной доски. Для этого выполняется та же последовательность действий (размеры изображения шахматной доски, должны быть равны среднему размеру спекл-пятна спекл-структуры). В результате получаем матрицу Fd_{i_1, i_2} , содержащую комплексные значения.

Для того, чтобы наложить шахматную доску на спекл-структуру производим почленное умножение спектров Fp на Fd :

$$Fdp = Fp \cdot Fd. \quad (4)$$

Выполняем обратное преобразование Фурье для матрицы Fdp и получаем матрицу Fdp^{-1} :



$$Fd_{i_1, i_2}^{-1} = \frac{1}{I_1 I_2} \sum_{k_1=0}^{I_1-1} \sum_{k_2=0}^{I_2-1} P_{k_1, k_2} \exp\left(j \frac{2\pi}{I_1} i_1 k_1 + j \frac{2\pi}{I_2} i_2 k_2\right), \quad (5)$$

где I_1 – число столбцов матрицы Fdp , I_2 – число строк матрицы Fdp , P_{k_1, k_2} – коэффициенты матрицы Fdp , $j = \sqrt{-1}$.

В полученной матрице Fdp^{-1} отбрасываем мнимую часть значений и получаем матрицу S , и строим контур поверхности по коэффициентам матрицы S .

В результате получается контур поверхности с регулярной структурой типа шахматной доски. В большинстве случаев данный контур является нечетко выраженным или вообще не похожим на структуру шахматной доски. Причиной этого является неправильно выбранный размер клеток шахматной доски. Для получения четкого изображения структуры типа шахматной доски необходимо методом перебора накладывать на спекл-изображение шахматные доски с разным размером клеток (рекомендуется использовать шаг размеров клетки в 1 пиксель). После получения четко выраженной регулярной структуры типа шахматной доски (как представлено на рисунке 2) для анализируемой спекл-структуры можно считать, что она является эталонным, что необходимо для дальнейшего анализа спекл-структур, полученных от исследуемой поверхности.

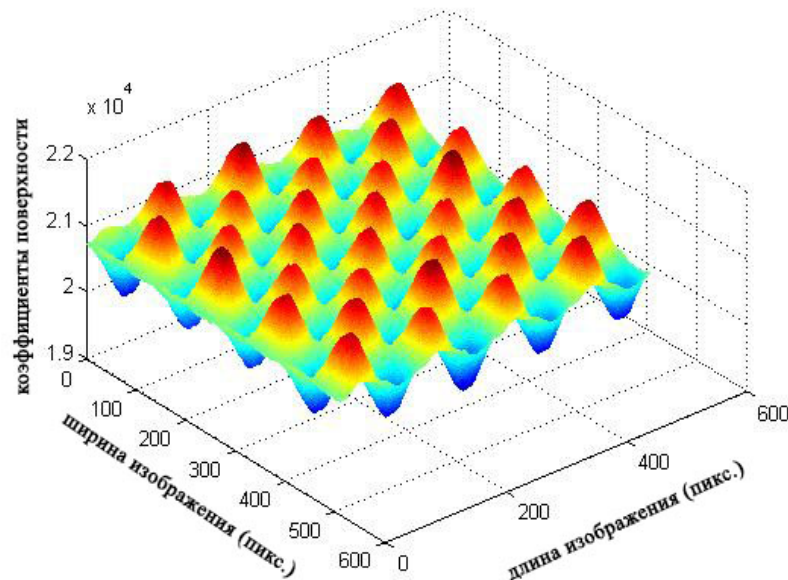


Рисунок 2 – 3D модель результирующего изображения со структурой в виде шахматной доски

В дальнейшем для следующих спекл-структур, например, при анализе образования усталостных трещин, строится результирующее изображение с шагом доски равному эталонному.

Критерием наличия дефекта на исследуемой поверхности является изменения в структуре типа шахматной доски в сравнении с эталонным изображением, которые проявляются в виде слипшихся в цепочку спеклов, а также нахождением коэффициента корреляции эталонного изображения с исследуемым, используя следующую формулу:

$$K = \frac{n \sum_{t=1}^n x_t y_t - \sum_{t=1}^n x_t \sum_{t=1}^n y_t}{\sqrt{n \sum_{t=1}^n x_t^2 - \left(\sum_{t=1}^n x_t\right)^2} \sqrt{n \sum_{t=1}^n y_t^2 - \left(\sum_{t=1}^n y_t\right)^2}}, \quad (6)$$



где x_t – значение яркости пикселя контура поверхности в точке t , эталонной спекл-структуры, y_t – значение яркости пикселя контура поверхности в точке t , исследуемой спекл-структуры, n – общее количество пикселей.

Данный коэффициент начинает уменьшаться в том случае, если эталонная структура, в виде шахматной доски начинает размываться, что свидетельствует о изменении параметров шероховатости или появлении дефектов на исследуемой (зондируемой) поверхности.

Метод «шахматной доски» эффективно применять на этапах отслеживания процесса изменения размера дефекта или параметров шероховатости металлоконструкций высоконагружаемых деталей.

Для демонстрации работы метода был смоделирован жизненный цикл детали от её эталонных значений параметров шероховатости до появления микротрещин на её поверхности.

С помощью разработанного ранее программного обеспечения [14] было выполнено моделирование результирующих спекл-структур от поверхностей с параметрами шероховатости R_a от 0,1 мкм до 1,3 мкм (таблица 1, средний ряд). Длина волны лазера составила 650 нм, зондирование контролируемого участка осуществлялось через 5, 10, 15, 30 и 45 тысяч циклов испытаний контролируемой детали на кручение и изгиб.

Для оценки изменения параметров шероховатости поверхности детали после многоцикловых испытаний, регистрируемые цифровые спекл-структуры были подвергнуты обработки методом «шахматной доски». На первом этапе обработки была найдена четкая регулярная структура типа шахматной доски для спекл-структуры, полученной от поверхности детали до многоцикловых испытаний путем взаимодействия спекл-структуры с моделированной структурой типа шахматной доски. Перебор изображений производится до тех пор, пока не получится наиболее четко выраженная структура типа «шахматная доска», а затем с таким же размером шахматной доски были проанализированы и остальные спекл-структуры. На последнем этапе рассчитывается коэффициент корреляции K эталонного изображения с каждым из анализируемых, представленных в таблице 2 в нижнем ряду вместе с полученными изображениями со структурой типа шахматная доска.

Таблица 2 – Результаты эксперимента: верхний ряд – смоделированные спекл-структуры, средний ряд – результирующие картины, полученные при обработке спекл-структур методом «шахматной доски», нижний ряд – коэффициент корреляции эталонного изображения с исследуемыми

эталон	5000 циклов	15000 циклов	30000 циклов	45000 циклов
$K = 1$	$K = 0,94$	$K = 0,87$	$K = 0,5$	$K = 0,03$



В ходе полунатурных испытаний установлено, что с увеличением количества циклов испытаний происходит увеличение параметров шероховатости R_a контролируемой поверхности. В результате регулярная структура типа «шахматная доска» начинает съезжать в цепочку, что ведет к уменьшению коэффициента корреляции. На этапе испытаний через 15 тыс. циклов нагружения на поверхности детали начинают появляться микротрещины, которые приводят к нарушению целостности поверхности. В результате происходит полное разрушение структуры типа «шахматная доска» и коэффициент корреляции принимает значение, равное $K = 0,03$. Зависимость коэффициента корреляции от количества циклов представлена на рисунке 3.

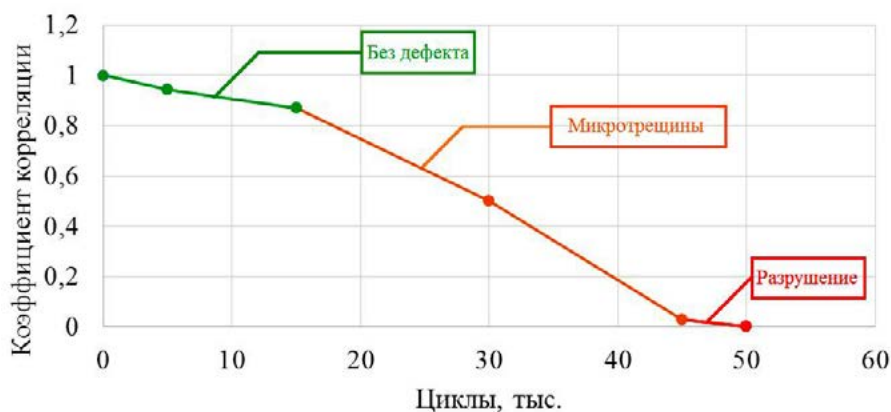


Рисунок 3 – Зависимость коэффициента корреляции от количества циклов

Практическая реализация метода спекл-структур оптического излучения.

Наличие современной элементной базы оптоэлектроники (полупроводниковые лазеры, матричные фотоприемники, портативные компьютеры) позволило создать два макета мобильных спекл-лазерных дефектоскопа: 1-ый вариант с коммутацией с ЭВМ через шину USB, 2-ой вариант через высокочастотный радиоканал wi-fi.



Рисунок 4 – Внешний вид и характеристики оптико-электронного комплекса неразрушающего контроля

Для удобства применения рассмотренных алгоритмов обработки спекл-структур был разработан программный комплекс, в который входят два программных модуля неразрушающего контроля, представленных на рисунке 5, реализованные на алгоритмах обработки цифровых спекл-структур автокорреляционным методом и «шахматной доской».

Структура программного комплекса построена так, что каждый модуль изолирован от остальных, а его классы упаковываются в отдельный *jar*-файл и загружаются в программу во время выбора типа проекта в открывшемся диалоге. Такая структура позволяет добавлять в установленную программу новые модули, что расширяет конфигурацию и возможности программного обеспечения. В программном комплексе используется свободно распространяемая библиотека с открытым исходным кодом *OpenCV*. Несмотря на то, что она написана на C++, она



имеет привязки для различных языков программирования, в том числе и на *Java*. Однако это вынуждает хранить рядом с *jar*-файлом предварительно скомпилированный файл библиотеки под конкретную платформу, но дает ощутимый выигрыш в производительности.

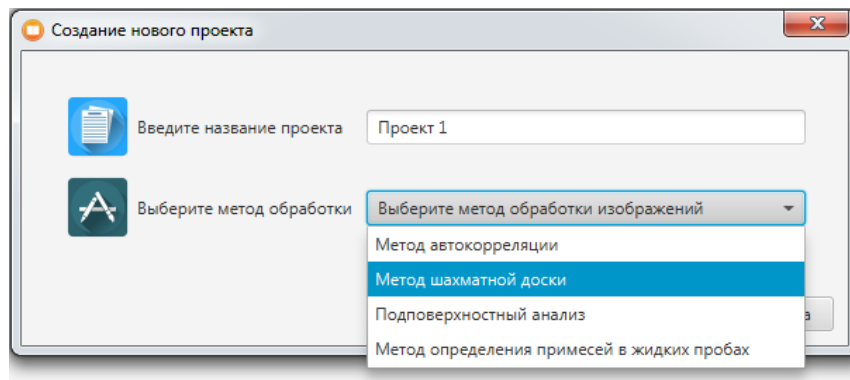


Рисунок 5 – Выбор типа программного модуля

Для применения разработанного аппаратно-программного комплекса неразрушающего контроля в задачах дефектоскопического контроля и определения параметров шероховатости, был разработан соответствующий программный модуль, в котором реализованы функции нахождения площади (по методу трапеции) и интервалов (по методу интерполяции) графиков автокорреляции и энергетического спектра. Интерфейс данного программного модуля представлен на рисунке 6, который содержит:

- 1) Панель графиков функции автокорреляции и энергетического спектра.
- 2) Таблицу с результатами вычислений.
- 3) Панель ввода ограничений, для подсветки в таблице результатов вычислений.
- 4) Панель с прокручивающимся списком готовых для обработки изображений.
- 5) Панель меню, которая позволяет создавать новый проект, загружать в программу ранее зарегистрированные спекл-изображения, соединяться со спекл-дефектоскопом для регистрации и обработки новых спекл-изображений.

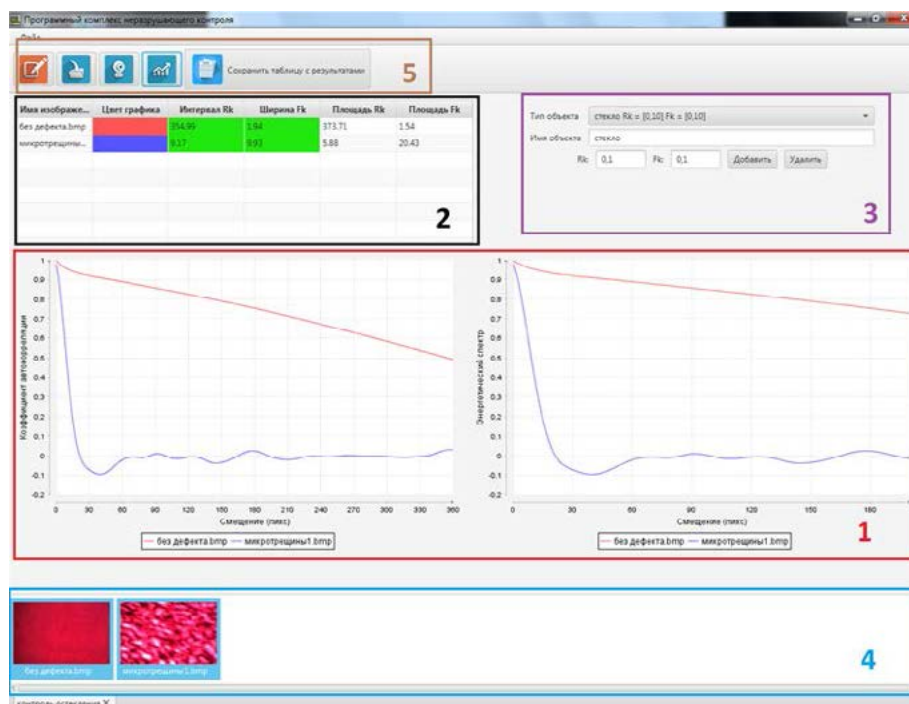


Рисунок 6 – Интерфейс программного модуля обработки спекл-структур методом автокорреляционного анализа



Для отслеживания динамики изменения параметров шероховатости с целью оценки остаточного ресурса конструкции планера и авиационной детали в течение жизненного цикла воздушного судна, разработан программный модуль, реализованный на алгоритмах обработки спекл-картин методом «шахматной доски», пользовательский интерфейс которого представлен на рисунке 7 и содержит следующие элементы:

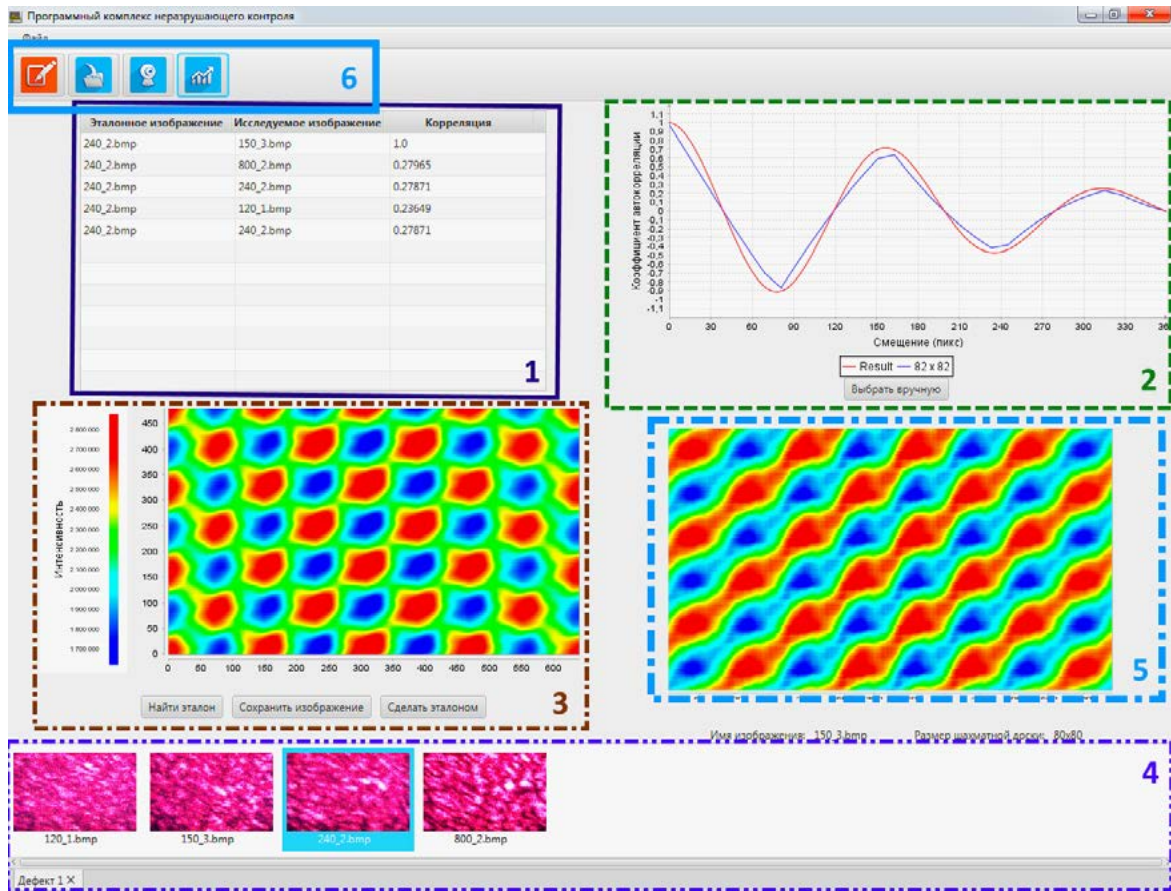


Рисунок 7 – Интерфейс программного модуля на основе использования метода «шахматной доски»

1) Таблица результатов вычислений, которая содержит имя обработанного изображения, имя изображения, взятого за эталон, коэффициент корреляции результатов «применения» выбранной за эталон шахматной доски к эталонному спекл-изображению и обрабатываемому.

2) Графики функций автокорреляции шахматной доски и результата «применения» этой же шахматной доски к спекл-изображению, выбранному за эталон. По схожести этих двух функций принимается решение о правильности подбора шахматной доски.

3) Координатная плоскость для отображения результата «применения» выбранной за эталон шахматной доски к выбранному спекл-изображению.

4) Панель с прокручивающимся списком готовых для обработки изображений.

5) Координатная плоскость для отображения результата «применения» подобранной шахматной доски к спекл-изображению, выбранному как эталон.

6) Панель меню, которая позволяет загружать в программу ранее зарегистрированные спекл-изображения; соединяться со спекл-дефектоскопом для захвата спекл-изображений в режиме реального времени; производить расчет характеристик для выбранного спекл-изображения.

Выводы. Таким образом, в ходе проведенных исследований рассмотрены пути по реализации устройств неразрушающего контроля, принцип действия которых основан на использовании МССОИ; разработан опытный макет аппаратно-программного комплекса



НК агрегатов воздушного судна и специализированное программное обеспечение, позволяющее автоматизировать процесс дефектоскопического контроля. Полученные результаты могут быть использованы при обосновании технических требований для разработки перспективных оптико-электронных устройств НК авиационных деталей. Преимуществом разработанного специализированного программного комплекса является его кроссплатформенность, возможность производить технический контроль инженерно-техническим составом, имеющим базовые навыки владения компьютером, отсутствие влияния человеческого фактора на конечный результат контроля позволит увеличить достоверность результатов измерений и уменьшить ошибку оператора при выполнении работ по дефектоскопическому контролю высоконагруженных силовых элементов конструкции воздушного судна.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 53696-2009 Контроль неразрушающий. Методы оптические. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2010. 7 с.
2. Адаптивные методы обработки спекл-модулированных полей / Ю.Н. Кульчин, О.Б. Витрик, А.А. Камшилин, Р.В. Ромашко. М.: Физматлит, 2009. 288 с.
3. Франсон М. Оптика спеклов. М.: Мир, 1980. 171 с.
4. Пространственный спектр (дифракционное гало) фурье-спеклограммы рассеивающего объекта / Б.Б. Горбатенко, А.А. Гребенюк, Л.А. Максимова, В.П. Рябухо // Компьютерная оптика. 2009. Т.33. №1. С.43-51.
5. Korff D. Analysis of a method for obtaining near-diffraction-limited information in the presence of atmospheric turbulence // J. Opt. Soc. Am. A. 1973. Vol. 63(6). P. 971-980.
6. Phase retrieval method for multiple wavelength speckle patterns / N.V. Petrov, V.G. Bepalov, A.A. Gorodetsky // Proc. SPIE. 2010, V.7387. P. 501-510.
7. Fienup J.R. Phase retrieval algorithms: a personal tour // Applied Optics. 2013. V. 52 (1). P. 45-56.
8. Реконструкция пространственного фазового распределения в дифракционном спекл-поле и восстановление изображения объекта по записи интенсивности / Б.Б. Горбатенко, В.П. Рябухо, Л.А. Максимова // Оптика и спектроскопия. 2006. Т.101. №5. С. 861-865.
9. Определение аберраций глаза в присутствии спекл-поля / А.В. Ларичев, П.В. Иванов, Н.Г. Ирошников, В.И. Шмальгаузен // Квантовая электроника. 2001. Т. 31(12). С. 1108-1112.
10. Тучин В.В. Оптика биологических тканей. Методы рассеяния света в медицинской диагностике 2-е изд. / В.В. Тучин - пер. с англ. М.: Физматлит, 2013. 811 с.
11. Физика наукоемких технологий. Спекл-оптические методы исследования шероховатых поверхностей и подповерхностной структуры объектов / А. Н. Бородин, А. А. Вайчас, А. Н. Малов [и др.]. Выпуск 2. Иркутск: ИВВАИУ, 2008. С. 5-71.
12. Лагошный И.С., Павлов П.В. Программный модуль автокорреляционной обработки цифровых спеклфотографий для настольных систем MS Windows и портативных устройств Android // Информационные технологии. Радиоэлектроника. Телекоммуникации. 2015. № 5-2. С. 26-31.
13. Павлов П.В., Енин С.С. Программный модуль обработки цифровых спекл-изображений методом шахматной доски // Информационные технологии. Радиоэлектроника. Телекоммуникации. 2017. №7. С. 399-405.
14. Численное моделирование распространения и отражения оптического вихря методами скалярной теории дифракции / Н.В. Петров, П.В. Павлов, А.Н. Малов // Квантовая электроника. 2013. Т.43. №6. С. 582-587.



REFERENCES

1. GOST R 53696-2009 Non-destructive testing. Optical methods. Terms and Definitions. M: Standartinform, 2010. 7 p.
2. Adaptive methods for processing speckle-modulated fields / Yu.N. Kulchin, O.B. Vitrik, A.A. Kamshilin, RV Romashko. M.: Phisialitol, 2009. 288 p.
3. Francon M. The optics of speckles. M.: Mir, 1980. 171 p.
4. Spatial spectrum (diffraction halo) of the Fourier spectrograph of the scattering object / B.B. Gorbatenko, A.A. Grebenyuk, L.A. Maksimova, V.P. Riabuho // Computer Optics. 2009. T.33. №1. P. 43-51.
5. Korff D. Analysis of a method for obtaining near-diffraction-limited information in the presence of atmospheric turbulence // J. Opt. Soc. Am. A. 1973. Vol. 63(6). P. 971-980.
6. Phase retrieval method for multiple wavelength speckle patterns / N.V. Petrov, V.G. Bespalov, A.A. Gorodetsky // Proc. SPIE. 2010, V.7387. P. 501-510.
7. Fienup J.R. Phase retrieval algorithms: a personal tour // Applied Optics. 2013. V. 52 (1). P. 45-56.
8. Reconstruction of the spatial phase distribution in the diffraction speckle field and reconstruction of the image of the object from the intensity record. Gorbatenko, V.P. Ryabuho, L.A. Maksimova // Optics and spectroscopy. 2006. T.101. №5. P. 861-865.
9. Determination of eye aberrations in the presence of a speckle field. Larichev, P.V. Ivanov, N.G. Iroshnikov, V.I. Schmalhausen // Quantum Electronics. 2001. Vol. 31 (12). P. 1108-1112.
10. Tuchin V.V. Optics of biological tissues. Methods of light scattering in medical diagnostics 2nd ed. / V.V. Tuchin - per. with English. Moscow: Fizmatlit, 2013. 811 p.
11. Physics of high technology. Speckle-optical methods for studying rough surfaces and the subsurface structure of objects / AN Borodin, AA Vaichas, A.N. Malov [and others]. Issue 2. Irkutsk: IVVAIU, 2008. P. 5-71.
12. Lagoshny I.S., Pavlov P.V. Program module of autocorrelation processing of digital specklephotographs for MS Windows desktops and portable Android devices // Information technology. Radioelectronics. Telecommunications. 2015. № 5-2. P. 26-31.
13. Pavlov P.V., Enin S.S. Program module for processing digital speckle images by chessboard method // Information technologies. Radioelectronics. Telecommunications. 2017. №7. P. 399-405.
14. Numerical simulation of the propagation and reflection of an optical vortex by the methods of the scalar theory of diffraction / N.V. Petrov, P.V. Pavlov, A.N. Malov // Quantum Electronics. 2013. T.43. №6. P. 582-587.

© Павлов П.В., Вольф И.Э., Москвин Н.В., 2018

Павлов Павел Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры эксплуатации авиационного оборудования, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, Pavlov.pave@yandex.ru

Вольф Игорь Эдуардович, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры электрооборудования (и оптико-электронных систем), Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, volfigor71@mail.ru

Москвин Никита Васильевич, оператор научной роты, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, mikta93@mail.ru