

Информационно-диагностический комплекс дефектоскопического контроля

Павлов П.В. *, Попов Ф.Н. **

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: pavlov.pave@yandex.ru*

***e-mail: popovfeodor@live.ru*

Аннотация

Рассматриваются пути по реализации и применению информационно-диагностического комплекса дефектоскопического контроля, позволяющего производить контроль технического состояния узлов и агрегатов воздушного судна (ВС) с использованием устройств, принцип действия которых основан на методе спекл-структур оптического излучения (МССОИ). Программное обеспечение разработано в среде программирования Java Standard Edition и реализует алгоритмы обработки цифровых спекл-изображений на основе алгоритмов автокорреляционного анализа, метода «шахматной доски» и способа неразрушающего контроля подповерхностной структуры полупрозрачных объектов.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, дефектоскопия, спекл, композиты, шероховатость, обработка изображений, Java SE.

1. Введение

Согласно основным планам реформирования и перевооружения Российской армии к 2020 году авиапарк Вооруженных сил Российской Федерации должен полностью быть переоснащен и обновлен новыми типами авиационной техники. На сегодняшний день многие строевые части Военно-космических сил МО РФ переходят на эксплуатацию современной авиационной техники, авиапарк пополняется новыми вертолетами, самолетами и беспилотными летательными аппаратами. В производстве конструкции и деталей планера современных воздушных судов применяются легкие, высокопрочные материалы – композитные. Устройства неразрушающего контроля (НК), которые находятся на вооружении предприятий промышленности [1] и в строевых частях ВКС МО РФ не позволяют на высоком технологическом уровне проводить работы по дефектоскопическому контролю деталей из композитных материалов. Таким образом, возникли обстоятельства, требующие разработки новых, высокоточных устройств, принцип действия которых будет основан на новых способах и методах НК. Современная элементная база оптоэлектроники позволила разработать опытную партию устройств, принцип работы которых основан на использовании МССОИ [2].

В качестве инструмента обработки цифровых спекл-изображений в данных устройствах использовалось оригинальное программное обеспечение (ПО) [3] реализованное на алгоритмах автокорреляционного анализа цифровых спекл-изображений. Анализ их эффективности показал [4], что предел измерения параметров шероховатости и дефектоскопический контроль поверхностного и

подповерхностного слоя полупрозрачных материалов зависит от длины волны источника излучения, что в свою очередь ограничивает предел измерений и не позволяет проводить операции по определению глубины залегания дефекта во внутренней структуре полупрозрачных материалов.

Таким образом, цель настоящей работы заключается в разработке информационного диагностического комплекса дефектоскопического контроля, способного расширить возможность устройств НК, принцип действия которых основан на использовании МССОИ, за счет оптимизации алгоритмов обработки цифровых спекл-изображений, увеличения эргономики среды обработки и выполнении комплексной оценке параметров поверхностей контролируемых деталей по анализу параметров цифровых спекл-изображений.

Работу построим следующим образом, на первом этапе рассмотрим математические аппараты предлагаемых для реализации алгоритмов обработки цифровых спекл-изображений, на втором этапе представим результаты практической реализации предлагаемых способов и далее проведем экспериментальное исследование по практическому применению, разработанного ПО.

2. Алгоритмы обработки цифровых спекл-изображений

2.1 Алгоритм обработки спекл-изображений методом «шахматной доски»

Данный метод обработки спекл-изображений позволяет анализировать динамику изменения параметров дефекта, путем анализа изменения параметров шероховатости исследуемой поверхности [5].

Метод шахматной доски позволяет выявить корреляцию элементов (спекл-пятен) изображения с элементами (клетками) шахматной доски. Для простой модели одномерного случая можно определить:

$$t(p) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \text{rect}\left(\frac{x}{d_{cn}} + nd_{cn}\right), \quad (1)$$

$$t(d) = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} a_m \text{rect}\left(\frac{x}{d_{uu}} + md_{uu}\right), \quad (2)$$

где $t(p)$ – распределение яркостей пикселей спекл-изображения, $t(d)$ – распределение яркостей пикселей по шахматной доске, $a_m = 0$, при четном m , d_{cn} – размер спекл-пятна, d_{uu} – размер клетки шахматной доски.

Уравнение (2) предполагает, что изображение состоит из одинаковых по размеру спекл-пятен (или их подавляющее большинство).

Для обработки непрерывного распределения яркостей изображений, описываемых уравнениями (1) и (2) необходимо произвести их дискретизацию, для этого используем гребенку Дирака [6] в результате получим:

$$(p) = \text{rect}\left(\frac{x}{d_{cn}}\right) * \text{comb}\left(\frac{x}{d_{uu}}\right) \quad (3)$$

$$t(d) = \text{rect}\left(\frac{x}{d_{uu}}\right) * \text{comb}\left(\frac{x}{d_{uu}}\right) \quad (4)$$

где $*$ – знак операции свертки, $\text{comb}(x) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} (x - n)$ гребенка Дирака.

Для нахождения Фурье – спектра дискретных функций (3) и (4), воспользуемся Прямым Фурье преобразованием, в результате которого получим:

$$\hat{F}\{t(p)\} = \sin c(f_x d_{cn}) \text{comb}(f_x d_{cn}) \quad (5)$$

$$\hat{F}\{t(p)\} = \sin c(f_x d_{uu}) \text{comb}(f_x d_{uu}) \quad (6)$$

После получения Фурье спектров (5), (6) необходимо их перемножить, а затем выполнить обратное Фурье преобразование, в результате которого получается функция корреляции спекл-изображения к шахматной доске.

В случае если, $d_{uu} = d_{cn}$ то при перемножении спектров (5), (6) появляются слагаемые вида $\text{sinc}^2(f_x d_{\phi})$, обратное преобразование Фурье которых равно

$$\text{rect}^2\left(\frac{x}{d_{uu}}\right), \text{ что по определению является треугольной функцией } \text{tri}\left(\frac{x}{d_{uu}}\right).$$

Переходя от одномерного случая к двумерному, результатом будет структура типа пирамидки в пределах одной клетки шахматной доски. При наличии достаточно большого количества спекл-пятен примерно одинакового размера, будет возникать структура шахматной доски с элементами в виде таких пирамид (рис. 1).

В случае если $d_{uu} > d_{cn}$ или $d_{uu} < d_{cn}$, то при перемножении спектров (5), (6) структура шахматной доски будет неравномерной и начнет съезжаться в цепочку, что будет свидетельствовать изменению размеров спеклов, а значит и изменению шероховатости поверхности в большую или в меньшую сторону относительно размера клеток шахматной доски.

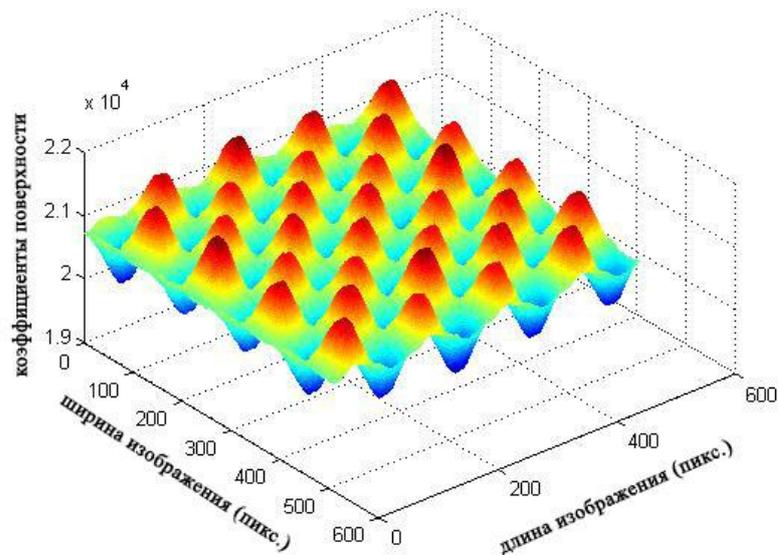
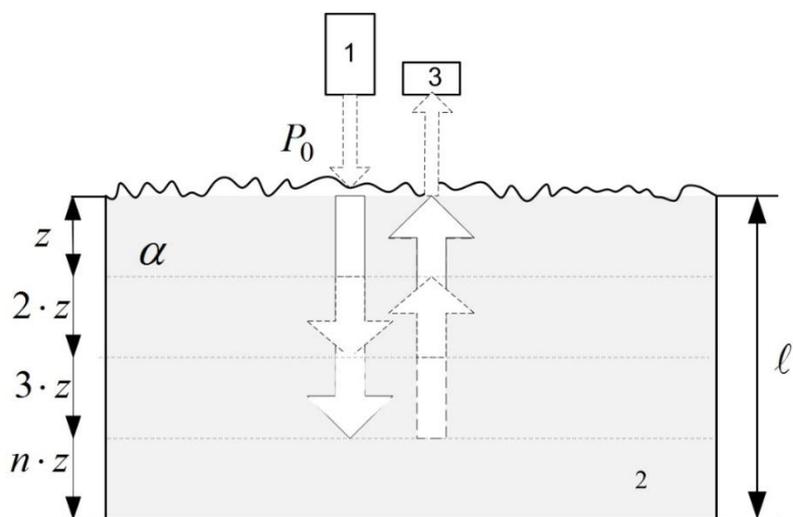


Рис. 1 – Результирующее изображение со структурой в виде шахматной доски

2.2 Способ неразрушающего контроля подповерхностной структуры полупрозрачных объектов

Принцип действия предлагаемого способа заключается в следующем (Рис. 2): осуществляют поэтапное зондирование контролируемой поверхности, при этом на первом этапе поверхность контролируемого объекта зондируют с мощностью источника когерентного излучения (КИ), равной P_0 , соответствующей полному отражению КИ от контролируемой поверхности, а на последующих этапах зондируют с мощностью источника КИ равной (7): где $n = \overline{1..N}$, соответствующей полному отражению КИ от поверхности подповерхностного слоя контролируемого объекта на глубине $n \cdot z$, где $N = \frac{l}{z}$ – количество контролируемых слоев, P_n, P_{n-1} – мощность источника КИ при n -ом, $(n-1)$ -ом этапе зондирования соответственно, α – коэффициент поглощения контролируемого объекта и Z – толщина контролируемого слоя при n -ом зондировании, определяют разность

интенсивностей спекл-изображений, зарегистрированной при n -ом этапе со спекл-изображением регистрируемом при мощности КИ равной P_0 .



1 – регулируемый по мощности источник КИ, 2 – контролируемый объект,
3 – приемник оптического излучения.

Рис. 2 – Принцип реализации способа НК внутренней структуры полупрозрачного материала

$$P_n = \exp(2n\alpha z) \cdot P_{n-1}, \quad (7)$$

Далее вычисляют интервал корреляции этой разности и сравнивают его с эталонным интервалом корреляции спекл-изображения, если выполняется условие $r_{kor,n,0} < r_{kor,разности}$, где $r_{kor,n,0}$ – интервал корреляции разности спекл-изображений, зарегистрированных при мощности КИ P_0 и n -ом и этапе зондирования, а $r_{kor,разности}$ – интервал корреляции разности эталонного спекл-изображения, полученной от неповрежденного слоя при соответствующей мощности облучения P_n , то принимают решение о нарушении внутренней структуры контролируемого объекта на глубине $n \cdot z$ и прекращают дальнейшее измерение, в противном случае осуществляют повторное зондирование с увеличением мощности сигнала пропорционально выражению (7) [7].

3. Реализация алгоритма обработки спекл-изображений методом «шахматной доски»

Разработка программного модуля обработки цифровых спекл-фотографий методом «шахматной доски» было реализовано на языке программирования Java Standard Edition в среде разработки Eclipse для MS Windows. Программный комплекс предоставляет возможность за счет кросс-платформенности языка программирования Java Standard Edition, использовать его на версиях Windows, начиная с версии Windows XP, и заканчивая последней версией на сегодняшний день Windows 8, а так же на семействе ОС Linux.

При разработке модуля, который реализует метод «шахматной доски», одной из проблем реализации было определить нахождение оптимального размера клетки накладываемой шахматной доски на исследуемое спекл-изображение для получения четко выраженной структуры типа шахматная доска, т.е. размер клетки должен быть равен размеру спеклов исследуемого изображения. Решение этой проблемы было реализовано путем перебора всех имеющихся в базе данных шахматных досок, и накладыванием их на исследуемое спекл-изображение, при наложении каждой шахматной доски строится контур поверхности из рассчитанных коэффициентов. Для нахождения оптимального размера клеток вырезаются несколько участков из полученного контура поверхности равных размеру клеток накладываемой шахматной доски, и находится коэффициент корреляции между вырезанными участками. В случае если коэффициент корреляции имеет высокое значение, это означает, что при наложении текущей шахматной доски на спекл-изображение сохраняется структура

типа шахматной доски, и оно будет принято за эталон. После нахождения оптимального размера клеток шахматной доски производится дальнейший анализ спекл-изображений с той же поверхности, с уже определенной шахматной доской, и находится корреляция, между найденным эталонным изображением и исследуемым.

Интерфейс разработанного программного модуля представлен на рис. 3, который состоит из:

1) панель меню, которая позволяет, создавать новый проект, в котором выбирается метод обработки спекл-изображений либо автокорреляционный, либо метод шахматной доски; 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;

2) поле для вывода значения коэффициента корреляции между эталонным изображением и исследуемым;

3) форма для добавления в базу данных новых шахматных досок;

4) координатная плоскость для построения контура поверхности;

5) поле для отображения найденного эталонного изображения;

б) поле для отображения загруженных из базы данных, либо сделанных в режиме реального времени спекл-изображений.

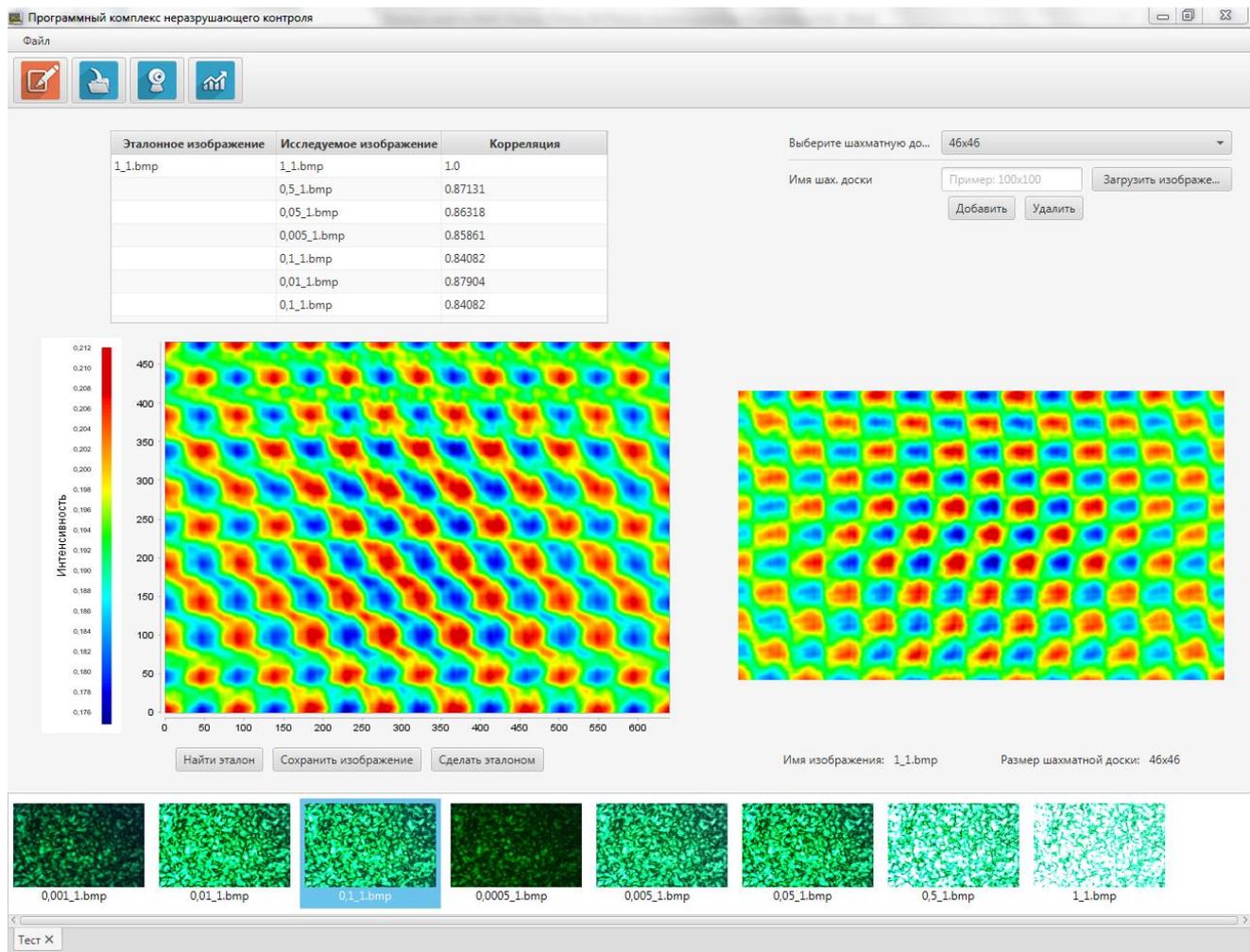


Рис. 3 – Интерфейс модуля обработки спекл-изображений методом «шахматной доски»

4. Экспериментальное исследование разработанных программных модулей дефектоскопического контроля

4.1 Экспериментальное исследование программного модуля обработки цифровых спекл-изображений методом «шахматной доски»

Применение метода «шахматной доски» при обработке спекл-изображений в большей мере приводится к отслеживанию изменения параметров дефекта во время эксплуатации воздушного судна, поэтому для демонстрации работы метода был смоделирован жизненный цикл детали, от её эталонных значений параметров шероховатости, до появления микротрещин на её поверхности. В результате с

помощью разработанного программного модуля [8] были смоделированы результирующие спекл-изображения от поверхностей с соответствующими параметрами шероховатости. Длина волны источника КИ, составила 650 нм, зондирование контролируемого участка осуществлялось через 5, 10, 15, 30 и 45 тысяч циклов испытаний на кручение и изгиб, при этом параметры шероховатости поверхности менялись от 0,1 мкм до 1,3 мкм (Таблица 2 средний ряд).

Для анализа изменения параметров шероховатости поверхности детали с увеличением количества циклов испытаний – N , регистрируемые спекл-картины обрабатывались методом «шахматной доски». Для начала работы метода, была найдена четкая регулярная структура типа шахматная доска для эталонного изображения, путем наложения на данное изображение шахматных досок различных размеров от 5x5 до 100x100 пикселей с шагом 5 пикселей, пока не получится наиболее четко выраженная структура типа «шахматная доска», а затем с таким же размером шахматной доски были проанализированы и остальные спекл-изображения. Далее был рассчитан коэффициент корреляции эталонного изображения с каждым из анализируемых, и представлен в таблице 1 в нижнем ряду вместе с полученными изображениями со структурой типа шахматная доска.

По результатам испытания программного модуля установлено, что с увеличением параметров шероховатости поверхности детали вся регулярная структура типа шахматная доска начинает съезжать в цепочку, что ведет к уменьшению коэффициента корреляции с 1 до 0,5. На данном этапе на поверхности детали начинают образовываться микротрещины, которые через 15 тыс. циклов

работы приводят к образованию трещины, в результате происходит полное разрушение структуры типа шахматная доска. Зависимость коэффициента корреляции от количества циклов представлено на рис. 4.

Для оценки эффективности метода шахматной доски по отношению к автокорреляционному анализу спекл-изображений, были обработаны спекл-картины от поверхностей с параметрами шероховатости $R_a = 0,2 \dots 2,6$ мкм с шагом 0,2 мкм.

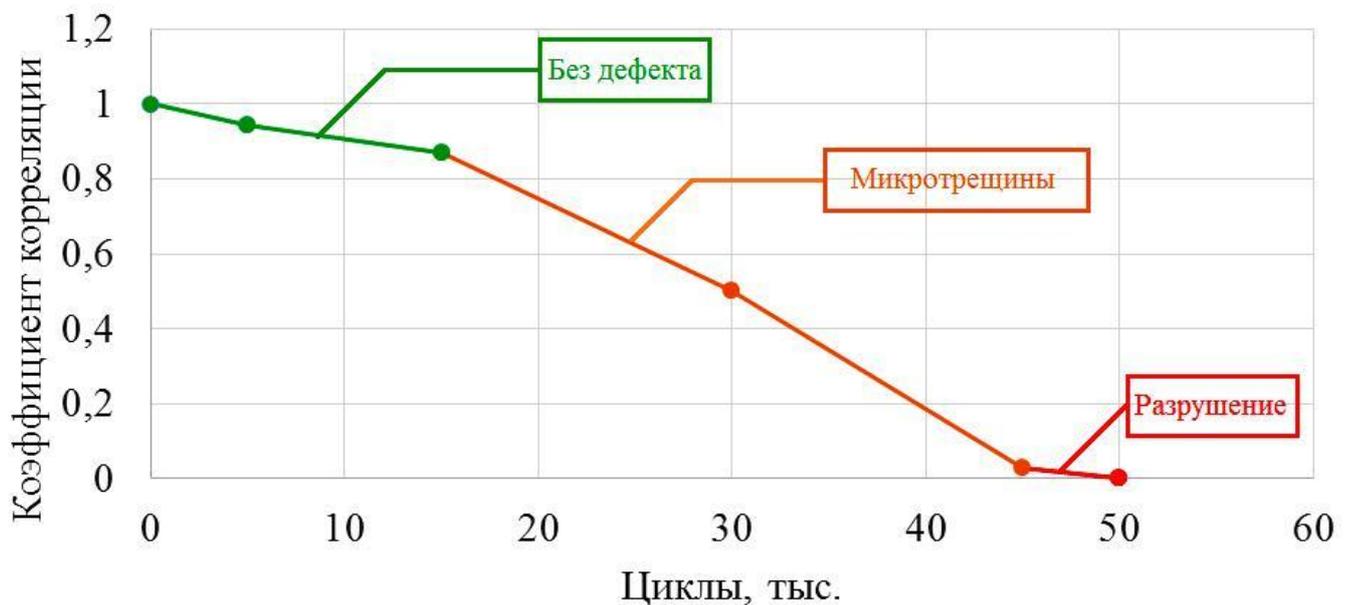
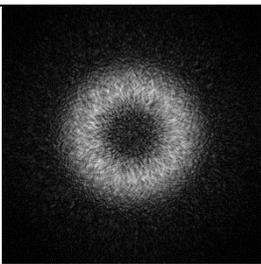
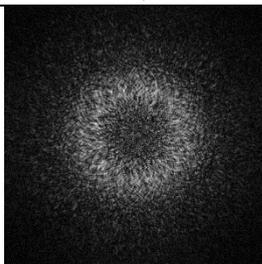
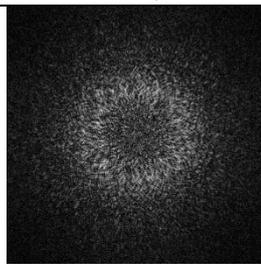
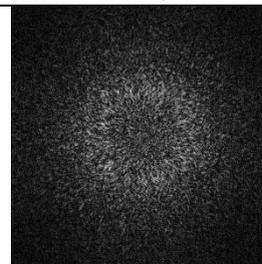
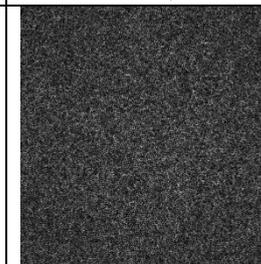
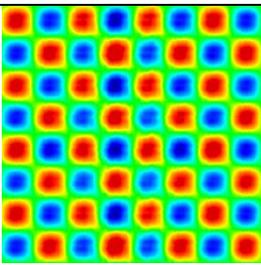
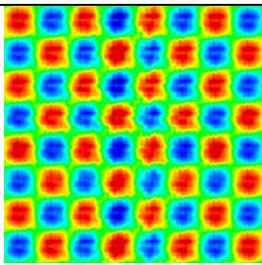
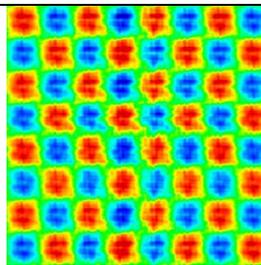
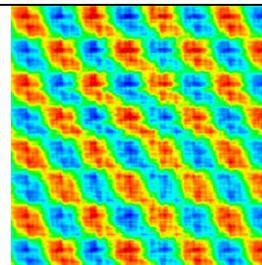
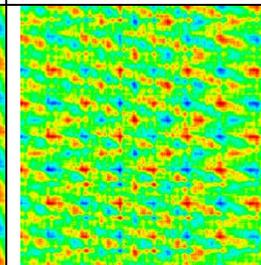


Рис. 4 – Результаты эксперимента

Графики функций автокорреляции регистрируемых спекл-картин приведены на рис. 5.

Для оценки эффективности метода шахматной доски по отношению к автокорреляционному анализу спекл-изображений, были обработаны спекл-картины от поверхностей с параметрами шероховатости $R_a = 0,2 \dots 2,6$ мкм с шагом 0,2 мкм.

Результаты эксперимента: верхний ряд – смоделированные спекл-изображения, средний ряд – обработанные методом «шахматной доски», нижний ряд – коэффициент корреляции эталонного изображения с исследуемыми

эталон	5 тыс. циклов	15 тыс. циклов	30 тыс. циклов	45 тыс. циклов
				
				
K = 1	K = 0,944	K = 0,87	K = 0,5	K = 0,03

Таким образом, предельное измеряемое значение Ra для автокорреляционного метода составляет 2 мкм при длине волны источника КИ $\lambda=650$ нм.

Для оценки предела измерения Ra с использованием метода шахматной доски использовались те же спекл-изображения (рис.7).

На первом этапе исследования метода шахматной доски была определена четкая регулярная структура типа набора пирамид для спекл-изображения с $Ra=0,2$ мкм, а затем с таким же размером элементов (клеток шахматной доски) были проанализированы и остальные спекл-изображения. Далее был рассчитан коэффициент корреляции K эталонного изображения с каждым из анализируемых. Результаты вычислений представлены в таблице 1.

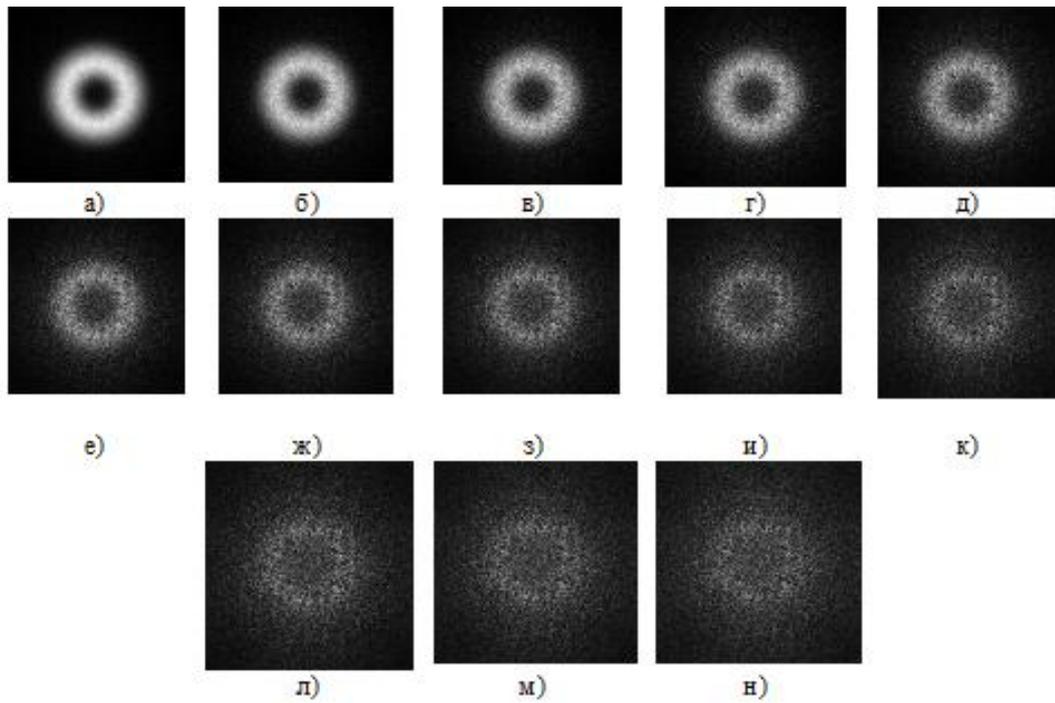


Рис. 7 – Спекл-изображения, полученные от поверхностей с параметрами шероховатости R_a : а) 0,2 мкм; б) 0,4 мкм; в) 0,6 мкм; г) 0,8 мкм; д) 1 мкм; е) 1,2 мкм; ж) 1,4 мкм; з) 1,6 мкм; и) 1,8 мкм; к) 2 мкм; л) 2,2 мкм; м) 2,4 мкм; н) 2,6 мкм

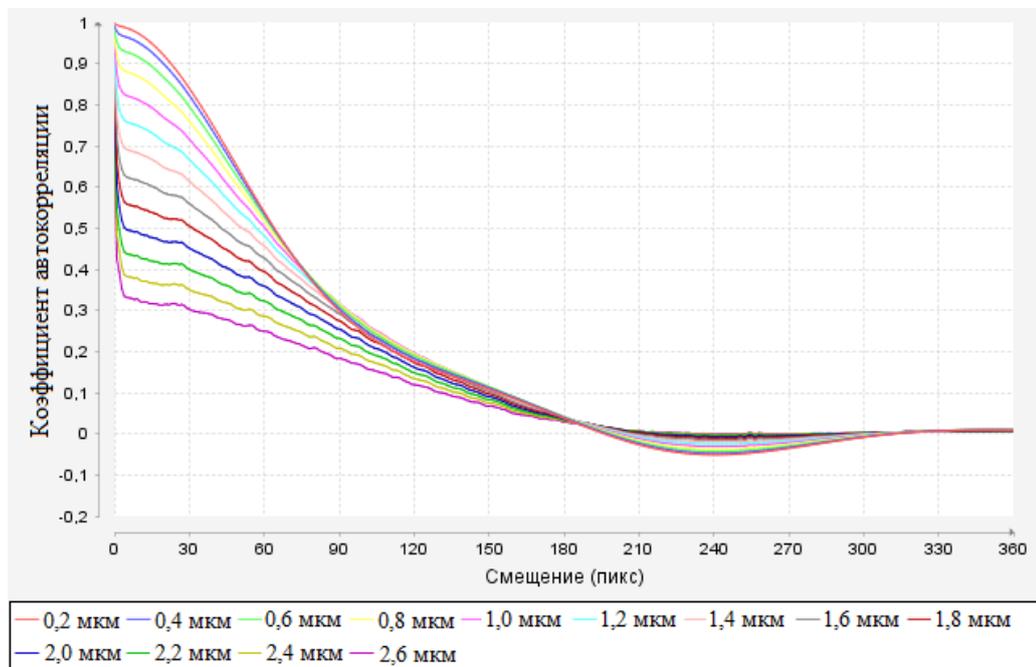


Рис. 5 – Функции автокорреляции спекл-изображения от поверхностей с параметрами шероховатости $R_a=0,2-2,6$ мкм

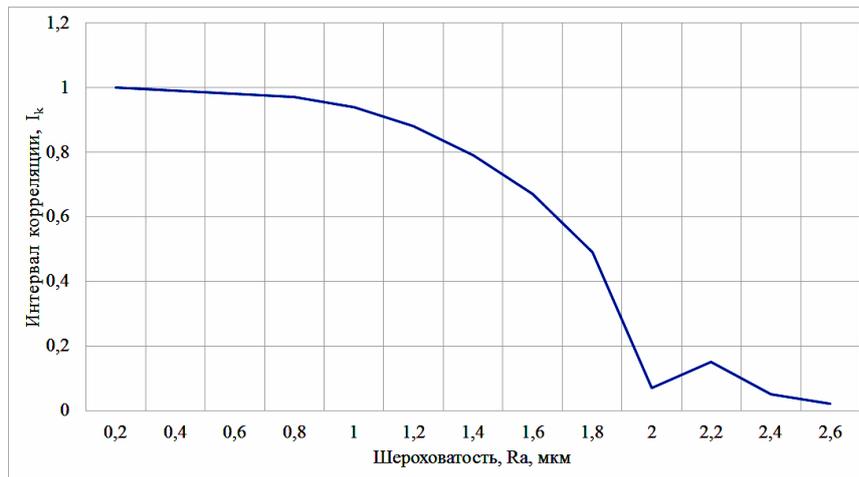


Рис.6 График зависимости нормированного значения интервала корреляции спекл-изображений I_k от параметра шероховатости R_a

График зависимости нормированного значения коэффициента корреляции K от параметров шероховатости R_a приведен на рис.7.

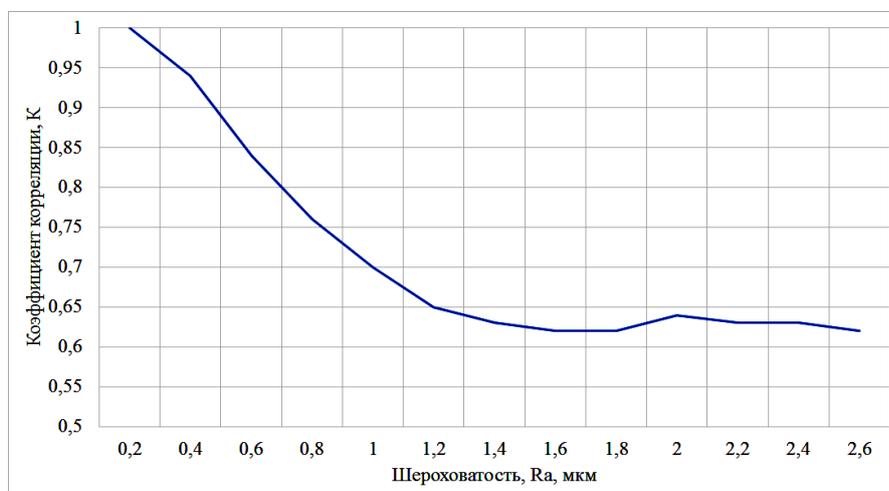


Рис. 7 – График зависимости нормированного значения коэффициента корреляции K от параметров шероховатости R_a

Из рис.7 видно, что при $R_a=1,6$ мкм погрешность измерений увеличивается.

Для уменьшения погрешности измерений на интервале шероховатости $R_a=1,6 - 2,6$ мкм за эталон принимается изображение, полученное в результате

подбора соответствующей шахматной доски к спекл-изображению для шероховатости $R_a=1,2$ мкм. Полученные значения коэффициента корреляции K представлены в таблице 2.

Таблица 2

Результаты вычислений коэффициента корреляции спекл-изображений на участке с параметрами шероховатости $R_a=1,6 - 2,6$ мкм

R_a , мкм	1,2	1,4	1,6	1,8	2	2,2	2,4	2,6
K	1	0,98	0,97	0,95	0,92	0,89	0,85	0,83

На основании полученных результатов построен график зависимости коэффициента корреляции от параметров шероховатости R_a (рис.8).

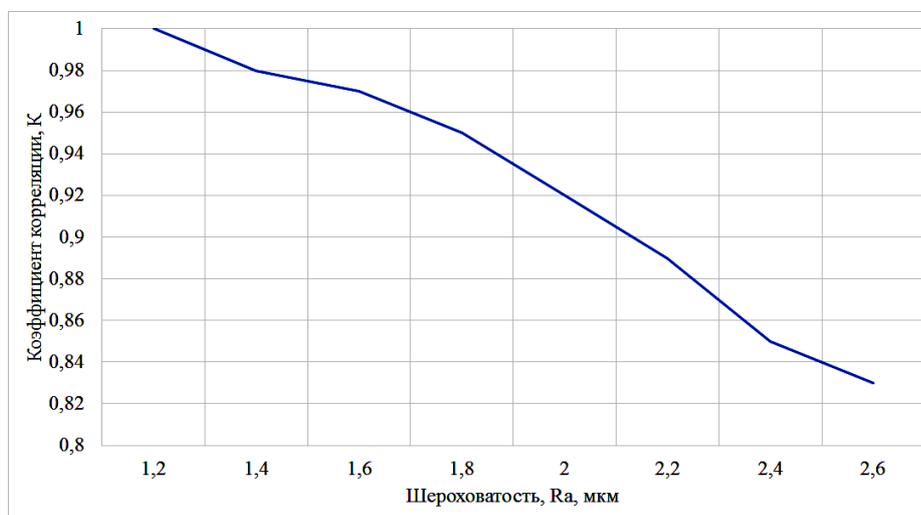


Рис. 8 – График зависимости коэффициента корреляции K от параметров шероховатости

$R_a=1,6 - 2,6$ мкм

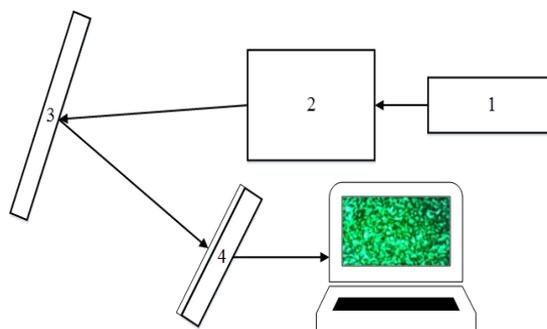
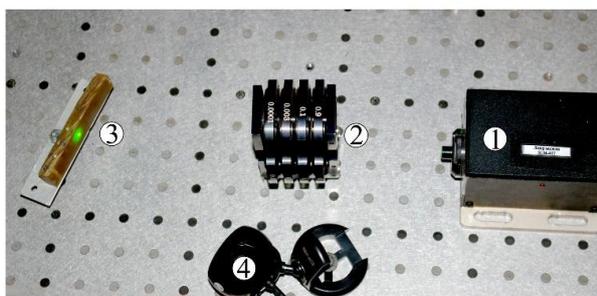
Из графика видно, что зависимость имеет почти линейный характер, что свидетельствует о снижении погрешности измерений при определении параметра шероховатости R_a .

Таким образом, из сравнения алгоритма автокорреляционного анализа и метода «шахматной доски» следует:

- метод «шахматной доски» имеет «гибкий» характер, что позволяет, путем соответствующего подбора необходимого типа шахматной доски (размера «клетки шахматной доски») расширить пределы измерения параметров шероховатости,
- снизить погрешность измерений без изменения параметров оптической системы диагностического комплекса.

3.4 Экспериментальное исследование программного модуля неразрушающего контроля подповерхностной структуры полупрозрачных объектов

Способ неразрушающего контроля подповерхностной структуры полупрозрачных объектов применяется для определения наличия дефекта в полупрозрачных (композитных) материалах, а также для определения глубины его залегания. Для экспериментального исследования был подготовлен образец из композитного материала лопасти несущего винта вертолета МИ-28Н – препрег стеклонить ВПС-7 со связующим ЭДТ-10П толщиной 10 мм. Во внутренней структуре данного объекта на глубине 2,5 и 5 мм имитировались дефекты сквозными отверстиями диаметром 2 мм. Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 9.



1 – лазер SLM-417 ($\lambda=532$ нм); 2 – аттенюатор; 3 – композит; 4 – ПЗС-матрица; 5 – ПК

Рис.9 – Внешний вид и схема экспериментальной установки используемой в эксперименте

В ходе эксперимента зондированию было подвергнуто три участка контролируемого объекта: 1 – не поврежденный участок (без дефекта); 2 – участок с внутренним дефектом на глубине 2,5 мм; 3 – участок с внутренним дефектом на глубине 5 мм. Зондирование осуществлялось в несколько этапов от использования излучения с минимальной до максимальной мощностью с последующей регистрацией спекл-изображений ПЗС-матрицей разрешением 640×480 пикселей. Регистрируемые излучению различной мощностью, в результате что позволило определить состояния объекта на различных глубинах. Зависимость интервала корреляции от мощности излучения представлена в таблице 3 и рис. 10.

Таблица 3

Зависимость интервала корреляции от мощности излучения

Без дефекта		
№	Мощность, мВт	Rk
1	5,09	1,000
2	5,19	0,828
3	5,28	0,813
4	5,38	0,799
5	5,47	0,798
6	5,56	0,809

Дефект 1		
№	Мощность, мВт	Rk
1	5,09	1,000
2	5,19	0,825
3	5,28	0,568
4	5,38	0,567
5	5,47	0,564
6	5,56	0,569

Дефект 3		
№	Мощность, мВт	Rk
1	5,09	1,000
2	5,19	0,784
3	5,28	0,788
4	5,38	0,551
5	5,47	0,545
6	5,56	0,558

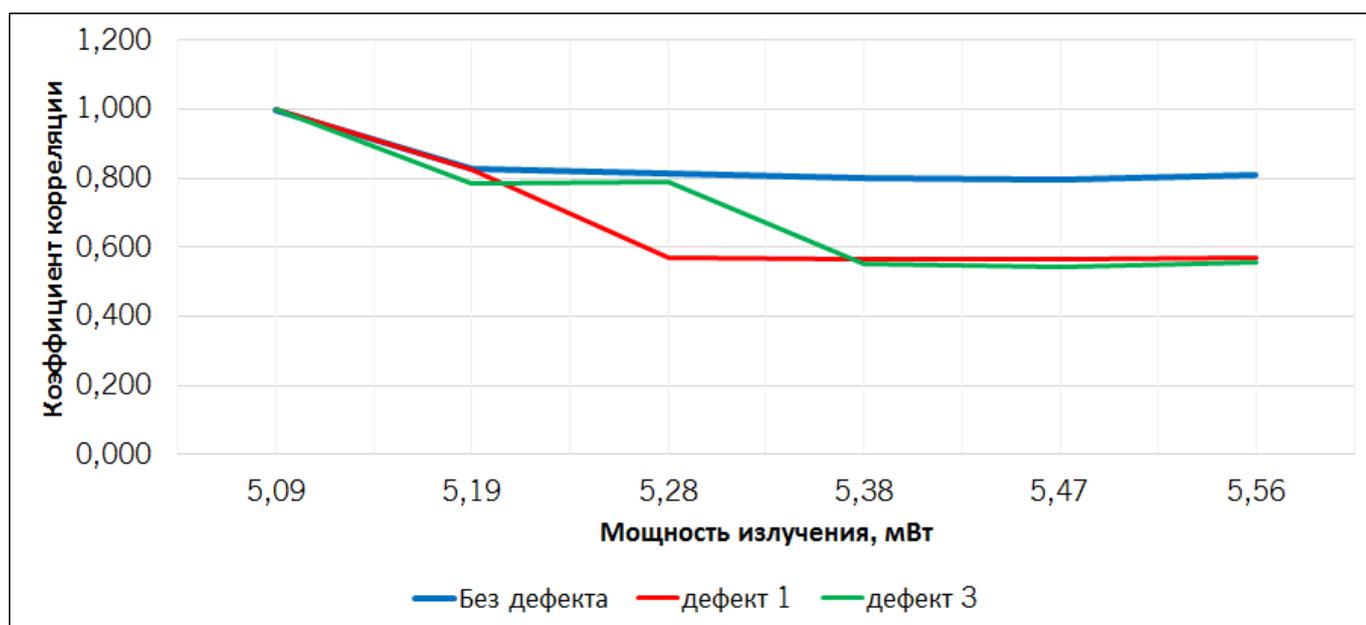


Рис. 10 – Результаты эксперимента

Заключение

Таким образом, внедрение разработанного информационно-диагностического комплекса позволит проводить дефектоскопический контроль узлов и агрегатов воздушного судна, по анализу параметров цифровых спекл-изображений с использованием базы данных эталонных значений, отслеживать динамику изменения параметров шероховатости и дефектов во время эксплуатации воздушного судна, а также проводить операции по дефектоскопическому контролю внутренней структуры полупрозрачных (композитных) материалов. Преимуществом данного программного комплекса является его универсальность – совместимость с различными операционными системами, доступный в восприятии интерфейс, что позволяет инженерно-техническому составу, имеющему базовые навыки владения компьютером, осуществлять операции по НК авиационных деталей на высоком технологическом уровне.

Библиографический список

1. Бойцов Б.В., Васильев С.Л., Громашев А.Г., Юргенсон С.А. Методы неразрушающего контроля, применяемые для конструкций из ПКМ // Труды МАИ, 2013, №49: http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=28061&PAGEN_2=2
2. Павлов П.В., Горюнов А.Е. Аппаратно-программный комплекс неразрушающего контроля // Труды МАИ, 2015, №80: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=57019>
3. 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.
4. Gorjunov A.E., Pavlov P.V., Petrov N.V. Evaluating the effectiveness of correlation digital speckle photography method for non-destructive testing of rough surfaces // Journal of Physics: Conference Series. 2014. T. 536. 012017.
5. Malov A.N., Pavlov P.V., Neupokoeva A.V. A testing method for the machine details state by means of the speckle image parameters analysis // Journal of Physics: Conference Series. 2016 T. 737. 012056.
6. Гудмен Дж. Статистическая оптика. – М.: Мир, 1988. - 528 с.
7. Способ неразрушающего контроля подповерхностной структуры полупрозрачных объектов / Патент РФ №2563334 / Петров О.С., Павлов П.В., Левшин Е.А., Ткаченко С.С., Вольф И.Э., Малов А.Н., Петров Н.В. Бюл. №26. 7 с.

8. Павлов П.В., Петров Н.В. Компьютерное моделирование процессов распространения вихревых лазерных пучков // Материалы XV международной научно-методической конференции «Информатика: Проблемы, методология, технологии». Воронеж, 12 – 13 февраля 2015 года, С. 364 – 369.