

КОНТРОЛЬ И ИСПЫТАНИЕ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ И ИХ СИСТЕМ

УДК 623.746.553.6

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ РЕНТГЕНОСКОПИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ И АНАЛИЗА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ ВОЗДУШНОГО СУДНА С СОТОВЫМ ЗАПОЛНИТЕЛЕМ

Крылов А.А.^{*}, Москаев В.А.^{}**

*Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина,
ул. Старых Большевиков, 54а, Воронеж, 394064, Россия*

^{} e-mail: Anatoliy_krylov@mail.ru*

*^{**} e-mail: moskaev82@mail.ru*

Статья поступила в редакцию 10.01.2019

Рассматривается методика рентгеноскопического контроля элементов конструкции воздушного судна (ВС) с сотовым заполнителем. Представлены экспериментальные данные проведения контроля элементов конструкции с сотовым заполнителем, раскрыт алгоритм дисперсионного анализа этих данных. Получены результаты фрактального анализа снимков структур конструкции с сотовым заполнителем без дефекта и с дефектом.

Ключевые слова: рентгеноскопический контроль, воздушное судно, обработка изображений, фрактальный анализ.

Введение

Широкое применение сотовых конструкций в различных элементах планера современных ВС позволяет существенно снизить их массу без потерь по характеристикам прочности, но при этом накладывает особые требования к эксплуатации в связи с чувствительностью сотовых конструкций к сосредоточенным нагрузкам [1].

Для решения практических задач эксплуатации удобно располагать общей картиной повреждаемости элементов конструкции планера ВС. Изменение начальных свойств и состояния элементов конструкции ВС является одной из причин потери им работоспособности. Оценка этого

процесса может быть выполнена посредством анализа параметров дефектов (вид, размеры), обнаруживаемых на протяжении всего периода эксплуатации ВС и при воздействии поражающих элементов [2, 3].

К наружным повреждениям сотовых конструкций относят отдельные вмятины, царапины, а также трещины, не вызывающие явного нарушения герметичности конструкции. Следующий вид – дефекты, частично нарушающие монолитность и герметичность конструкции: небольшие трещины на одной из обшивок, пробоины обшивок, смятие и повреждение граней сотового заполнителя.

Из опыта использования слоистых конструкций известно, что наиболее опасными дефектами являются влага в сотах и отслоения обшивки, вызывающие разгерметизацию сотовых конструкций, что может привести к возникновению аварийной ситуации. Количество этих дефектов по статистическим данным достигает 60—70% от полного перечня дефектов, возникающих при эксплуатации сотовых конструкций [4].

Эффективным способом поддержания требуемой надежности ВС с сотовыми конструкциями является использование в условиях эксплуатации и ремонта следующих трех методов неразрушающего контроля (НК) [5]: радиационного, ультразвукового и теплового. Тепловой метод контроля до сих пор является качественным и рекомендуется в качестве скринингового или дополнительного к ультразвуковому [6—8].

Для определения массы воды диагностические службы российских аэропортов используют ультразвуковой и радиационный методы, которые позволяют измерить водяной столбик высотой более 2 мм в отдельной соте. Недостатками ультразвукового метода неразрушающего контроля являются малая производительность (шаг сетки осмотра составляет около 1 см) и неспособность контролировать наклонные и вертикальные поверхности, например рули направления и фюзеляжные зализы [9, 10].

Результаты радиоскопического контроля фрагментов металлических, композиционных и неметаллических сотовых панелей с искусственными дефектами в ВИАМ [4] показали, что в сотовых конструкциях надежно могут быть обнаружены дефекты, связанные с геометрическими нарушениями сот и их соединений (зазоры, отсутствие сцепления ячеек); менее надежно обнаруживаются деформация сот и заполнение их ремонтным заполнителем.

В качестве объектов контроля при исследованиях были использованы фрагменты металлических сотовых панелей, представлявшие собой две обшивки, между которыми находилась ячеистая сотовая структура, состоящая из соединенных профилированных листов, образующих замкнутые ячейки шестигранной формы.

В статье рассмотрена методика проведения рентгеноскопического НК элементов конструкции ВС с сотовым заполнителем на основе рентгеноскопического метода НК [11] и дана оценка полученных снимков с использованием мультифрактальной параметризации, которая позволит более качественно проводить количественный анализ с целью выявления картины распределения

дефектов по отдельным типам сотовых конструкций планера ВС в процессе их образования на ранних стадиях.

Предлагаемая методика состоит из трех основных блоков:

1. Блок формирования исходных данных, ограничений и допущений:

а) варьируемые параметры рентгеноскопической установки (рентгенотелевизионная установка «Норка»);

б) неварьируемые параметры, характеризующие особенности конструкции ВС или объекта контроля (ОК).

2. Блок методики рентгеноскопического контроля элементов конструкции ВС с сотовым заполнителем и оценки параметров:

а) модель формирования базы снимков с учетом настройки параметров рентгеноскопической установки:

— построение схемы просвечивания ОК;

— формирование базы снимков при изменении значения анодного напряжения на излучателе, расстояния от излучателя до объекта контроля и угла положения излучателя. Характерные снимки для различных параметров (фокусное расстояние F , анодное напряжение U), полученные в рамках проведенного эксперимента, сведены в табл. 1;

Таблица 1

Варианты параметров рентгеноскопической установки

Варианты параметров	Фокусное расстояние F , мм	Анодное напряжение U , кВ
1	500	10
2	500	90
3	500	20

б) модель оценки качества снимка:

— экспертная оценка базы снимков, с расчетом коэффициента конкордации [5];

— дисперсионный анализ базы снимков. Для анализа экспериментальных данных применялся двухфакторный дисперсионный анализ [8]. При двухфакторном анализе исследуется влияние двух качественных факторов A (F) и B (U) на отклик X (качество снимка). В этом случае дисперсионный анализ основывается на результатах эксперимента, проводимого на различных уровнях каждого из факторов. Предполагается, что взаимосвязь между

факторами отсутствует. В эксперименте с повторными опытами результаты могут быть представлены в виде сводной таблицы данных.

Вычислительная схема двухфакторного дисперсионного анализа, предназначенная для оценки влияния модели настройки параметров рентгеноскопической установки на изменение характеристик базы снимков, представлена в работе [11];

в) выполнение дефектации ОК:

— корректировка параметров рентгенотелевизионной установки «Норка» согласно модели оценки качества снимков;

— дефектация объекта контроля согласно схеме просвечивания;

— расшифровка и анализ результатов проведения дефектации с помощью мультифрактальной параметризации ячеистых структур сотового заполнителя.

3. Блок формирования рекомендаций по дефектоскопии и ремонту элементов конструкции ВС с сотовым заполнителем.

Определение мультифрактальных характеристик ячеистых структур сотового заполнителя

Как известно [12], малогабаритная переносная радиоскопическая система «Норка» в сотовых конструкциях надежно выявляет наличие воды высотой от 2 мм и выше, а при использовании малого преобразователя позволяет получать снимки с двух-трехкратным увеличением исследуемой области; возможно определение дефектов клевого соединения, смятие сот, нарушение их геометрии, разрывы ячеек. Кроме этого, надежно обнаруживаемый минимальный уровень влаги на радиоскопическом снимке без обработки встроенными в систему программными средствами составил $2,5 \times 3$ мм, что в два раза больше, чем при проведении НК радиографическим методом (1,6 мм). Данная радиоскопическая система позволяет контролировать до 8×10 м²/ч сотовых панелей с одновременной выдачей заключения, без применения пленки и химикатов для фотообработки, что существенно снижает материальные и временные затраты на проведение исследований, увеличивает в несколько раз объем проводимого контроля, что позволит в дальнейшем рассматривать радиоскопическую систему «Норка» в качестве мобильной системы фиксации и учета повреждений сотовых конструкций ВС при внешнем предполетном осмотре, который является одной из основных составляющих предполетного технического обслуживания [13].

Известно [14], что традиционные стендовые механические испытания сотовой конструкции позволяют выявить лишь факт выхода ее параметров за предельный допуск и не дают информации о предстоящем поведении объекта, особенно в условиях динамических воздействий, когда возможны его отказ и даже неожиданное лавинообразное разрушение конструкции.

Для повышения эффективности радиоскопической системы и использования значительной части информации о структуре сотового заполнителя, получаемой в процессе рентгеноскопического НК, целесообразно использование мультифрактальной параметризации структур [15–17].

Фрактальный анализ радиоскопических снимков структур конструкций с сотовым заполнителем позволяет качественно определять нарушение строения границ сотового заполнителя и появление жидкости в нем [15–17], но однако не способен отразить количественно свойство неоднородности ячеистых структур сотового заполнителя, периодичности, организованности и т.п. Широкие возможности в этом отношении предоставляет мультифрактальный формализм [18].

В настоящей работе изображения структур сотового заполнителя были получены по второму варианту настройки параметров рентгеноскопической установки (табл. 1), а затем с помощью программы ImageJ и дополнительного модуля FracLac [19] были найдены мультифрактальные характеристики ячеистых сотовых структур (рис. 1) и сведены в табл. 2.

Фрактальная размерность анализируемых участков структур сотового заполнителя вычисляется по формуле [20]:

$$D_s = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{\ln N(\epsilon)}{\ln \frac{1}{\epsilon}}, \quad (1)$$

где $N(\epsilon)$ — минимальное число ячеек со стороной ϵ , необходимых для покрытия всех элементов изображения исследуемой структуры сотового заполнителя.

Фрактальная размерность D_s определяется по наклону регрессионной линии, рассчитанной методом наименьших квадратов в координатах $\ln \epsilon = f(\ln(N(\epsilon)))$.

Информационная размерность D_1 характеризует информацию, необходимую для определения местоположения точки в некоторой ячейке.

Функция мультифрактального спектра $f(\alpha(q))$, представляющая собой Хаусдорфову размерность

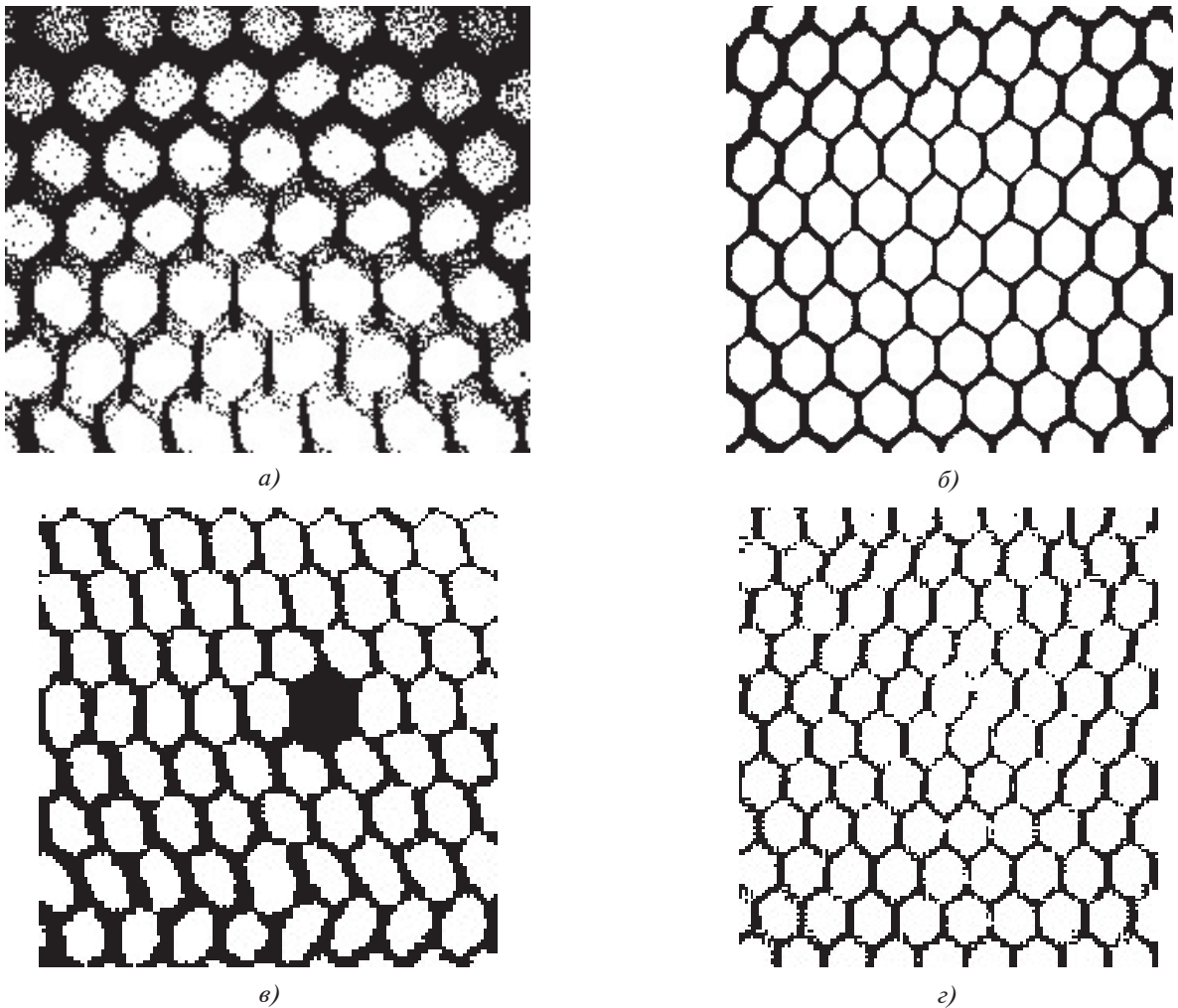


Рис. 1. Исследуемая структура сотового заполнителя: а — без дефекта — угол излучателя $\alpha = 10^\circ$; б — без дефекта — угол излучателя $\alpha = 0$; в — дефект — наличие влаги угол излучателя $\alpha = 0$; г — дефект — разрывы ячеек угол излучателя $\alpha = 0$

Мультифрактальные характеристики ячеистых структур

Структура	а	б	в	г
D_0	1,745	1,745	1,7783	1,7919
D_1	1,73	1,735	1,776	1,79
D_q	1,65	1,7	1,73	1,73
α_{max}	2,35	2,19	3,1	2,2
f_q	1,33	1,4	1,33	0,88
Δ_q	0,08	0,035	0,046	0,06
K	0,5	0,29	1,151	0,31

Таблица 2

некоторого однородного фрактального подмножества из исходного множества, которое вносит доминирующий вклад при заданном q [18,20]:

$$f(\alpha(q)) = q \cdot \alpha(q) - \tau(q). \quad (2)$$

Здесь $\alpha(q) = \frac{d\tau(q)}{dq}$; q — показатель сингулярности

α , который может принимать любые значения в диапазоне от $-\infty$ до $+\infty$ (в данной работе q изменялся от -10 до $+10$); $\tau(q)$ — нелинейная функция, показывающая, насколько исследуемое множество точек является неоднородным,

$$\tau(q) = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{\ln \sum_{i=1}^N p_i^q}{\ln \epsilon}, \quad (3)$$

где p_i – относительная заселенность, т.е. вероятность попадания точки в ячейку i размером ϵ .

Функция мультифрактального спектра

$$f(\alpha(q = \max)) = f(\alpha_{\min})$$

является эффективной характеристикой однородности структуры. Под степенью однородности понимается не традиционная качественная характеристика внешнего вида структуры, а показатель характера распределения единичных элементов структуры (точка в ячейке со значениями «1» – пиксель черного цвета) на изображении. Чем больше f_q , тем более однородна изучаемая с помощью мультифрактальной параметризации структура. Следует отметить, что кроме рассмотренного в данной статье равноячеечного способа разбиения изображения структуры, существует также способ равномассового разбиения, когда все меры ячеек одинаковы, а их размеры разные [18]. В работе [21] был представлен сегментальный параметр однородности ν , который был получен с помощью равномассового разбиения.

Наиболее информативными и рекомендуемыми являются характеристики D_q при положитель-

ных $q = \max$ (для данного расчета $q = 10$). Это связано с тем, что характеристики D_q несут некоторую количественную информацию о термодинамических условиях формирования исследуемых структур (большие значения D_q при $q = 10$ соответствуют большим значениям энтропии, что свидетельствует о движении системы к равновесному состоянию) [18]. Характеристика D_q может применяться в качестве эффективного средства при распознавании изучаемых структур сотового заполнителя, не различимых или слабо различимых при использовании традиционных методов.

Эффективной количественной характеристикой упорядоченности структуры сотового заполнителя является $\Delta q = D_1 - D_q$, $q = 10$: чем больше ее значение, тем более упорядочена структура, тем больше величина периодической составляющей (мера периодичности $K = D_{-q} - D_q = \alpha_{\max} - \alpha_{\min}$) [18]. На рис. 2 и 3 представлены графики $f(\alpha)$ -спектров и D_q -спектров размерностей Реньи, полученные в программном модуле FracLac.

Сравнивая полученные результаты расчетов мультифрактальных характеристик структур сотового заполнителя, представленные в табл. 2, можно сделать следующий вывод.

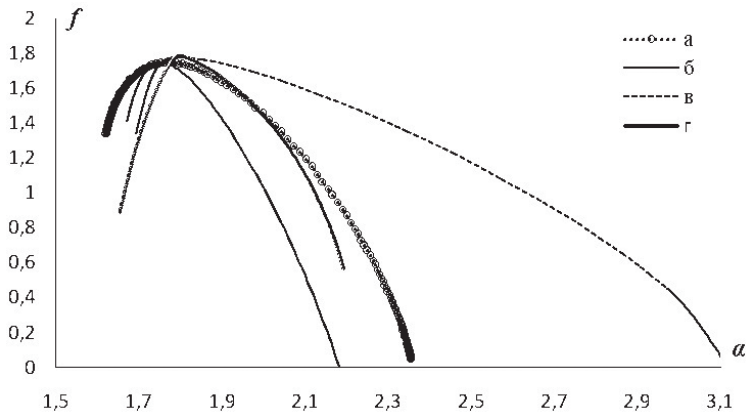


Рис. 2. Графики $f(\alpha)$ -спектров, полученные для изучаемых участков структур сотового заполнителя

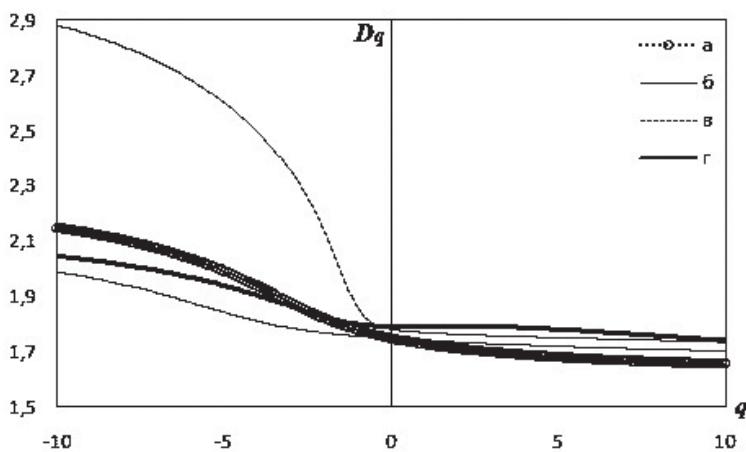


Рис. 3. Графики D_q -спектров размерностей Реньи, полученные для изучаемых участков структур сотового заполнителя

Равенство фрактальных размерностей D_0 изображений структур без дефекта, полученных при разных углах положения рентгенотелевизионной установки «Норка» (см. рис. 1, а, б), наглядно свидетельствует о том, что невозможно количественно описывать структуры используя только фрактальную размерность. Переход от фрактального описания к мультифрактальному означает переход от исследования масштабно-инвариантных свойств ячеистой структуры сотового заполнителя к изучению особенностей распределений величин на геометрических носителях (например, определение дефектов клеевого соединения, смятие сот, нарушение их геометрии, разрывы ячеек). Наибольшие значения характеристики $D_q = 1,73$ у ячеистых структур с сотовым заполнителем, имеющих дефекты (рис. 1, в, г), свидетельствуют о движении системы к равновесному состоянию после внешнего неблагоприятного воздействия.

Отметим, что для получения достоверного результата необходимо сравнивать изображения структур сотового заполнителя, полученные при одинаковом угле положения установки «Норка» ($\alpha = 0$).

Наименее однородной из исследуемых структур, изучаемых с помощью мультифрактальной параметризации ($f_q = 0,88$), оказалась структура сотового заполнителя с дефектом в виде разрыва ячеек (рис. 1, г). Она же имеет и наибольшее значение параметра упорядоченности (скрытой периодичности) Δ_q ячеистой структуры сотового заполнителя, что свидетельствует о нарушении симметрии для общей конфигурации исследуемой структуры в целом или о нарушении симметрии меры изучаемой структуры по отношению к мультифрактальному преобразованию.

Сравнивая количественные мультифрактальные характеристики структуры сотового заполнителя без дефекта и с дефектами в виде влаги и разрыва ячеек, можно количественно оценивать степень повреждения исходной структуры.

Выводы

Использование методики рентгеноскопического контроля ВС позволит проводить дефектоскопический контроль элементов конструкции ВС с сотовым заполнителем на более ранней стадии; на основе мультифрактальной параметризации выполнять оценку полученной базы снимков, отслеживать динамику изменения параметров сотового заполнителя и дефектов его внутренней структуры во время эксплуатации ВС.

Библиографический список

1. Санников А.В. Анализ особенностей эксплуатации сотовых конструкций с алюминиевым заполнителем // Научный вестник МГТУ ГА. 2013. № 192. С. 124-126.
2. Госсен С.А. Анализ эксплуатационных повреждений сотовых конструкций самолетов Ил-86 и меры по их устранению // Научный вестник МГТУ ГА. 2006. № 109. С. 94-99.
3. Небелов Е.В., Потоцкий М.В., Родионов А.В., Горский А.Н. Механизм развития повреждений лопастей воздушного винта из композиционных материалов при воздействии поражающих элементов // Вестник Московского авиационного института. 2016. Т. 23. № 1. С. 26-31.
4. Степанов А.В. Методы контроля сотовых конструкций авиационной техники в условиях эксплуатации // Авиационные материалы и технологии. 2004. № 2. С. 81-86.
5. Клюев В.В. (ред.) Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. — М.: Машиностроение, 2008. Т. 1. Кн. 1. Соснин Ф.Р. Визуальный и измерительный контроль. — 323 с.
6. Нестерук Д.А., Вавилов В.П. Особенности применения теплового метода неразрушающего контроля для обнаружения и оценки массы воды в сотовых панелях авиационной техники // Известия Томского политехнического университета. 2004. Т. 307. № 6. С. 62-65.
7. Нестерук Д.А., Хорев В.С., Коробов К.Н. Инфракрасно-ультразвуковой контроль воды в сотовых панелях самолета // Контроль. Диагностика. 2011. № 11. С. 13-16.
8. Крылов А.А., Чижов И.А., Заец Н.П. Тепловой неразрушающий контроль многослойных элементов планера // Наука. Промышленность. Оборона: Труды XV Всероссийской научно-технической конференции (Новосибирск, 23-25 апреля 2014). — Новосибирск: НГТУ, 2014. С. 640-644.
9. Коробов К.Н., Нестерук Д.А. Разработка технологии ультразвукового метода контроля высоты столбика воды в сотовых конструкциях самолетов // Вестник науки Сибири. 2011. № 1(1). С. 193-195.
10. Нестерук Д.А., Вавилов В.П. Особенности применения теплового метода неразрушающего контроля для обнаружения и оценки массы воды в сотовых панелях авиационной техники // Известия Томского политехнического университета. 2004. Т. 307. № 6. С. 62-65.
11. Герасимов И.В., Карпенко О.Н., Крылов А.А., Кирпичников А.П., Олешко В.С., Ткаченко Д.П. Фрактальный анализ в задаче рентгеноскопического контроля эксплуатационной пригодности элементов конструкций авиационной техники с сотовым заполнителем // Вестник технологического университета. 2015. Т. 18. № 5. С. 158-161.
12. Косарина Е.И., Степанов А.В., Тараканов Ю.В., Усачев В.Е. Радиоскопический контроль сотовых

- конструкций // Авиационные материалы и технологии. 2004. № 2. С. 73-81.
13. *Максимов Н.А., Малюта Е.В., Шаронов А.В.* Система автоматизированного учета повреждений воздушного судна, зафиксированных при предполетном осмотре // Вестник Московского авиационного института. 2015. Т. 22. № 4. С. 85-90.
 14. *Тиц С.Н.* Разработка математической модели сотовых конструкций летательных аппаратов // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2008. № 1. С. 80-91.
 15. *Kochanenko I.* Fractal Characteristics of Forecast Properties of Non-linear Regress. — Lecture Notes in Information Technology // Journal of Information Engineering Research Institute. 2012. Vol. 13, pp. 192–195.
 16. *Коханенко И.К., Москаев В.А.* Оценка времени стабильности фрактальных структур // Обзорение прикладной и промышленной математики. 2010. Т. 17. № 4. С. 568-570.
 17. *Kolmakov A.G., Vstovsky G.V.* Multifractal analysis of metallic surface structure changes during mechanical treatment // Materials Science and Technology. 1999. Vol. 15. No. 5, pp. 1-6.
 18. *Колмаков А.Г., Встовский Г.В., Бунин И.Ж.* Введение в мультифрактальную параметризацию структур материалов: Монография. — Ижевск: Научно-издательский центр «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. — 116 с.
 19. Программный модуль FracLac. URL: <http://rsb.info.nih.gov/ij/plugins/fractalac/FLHelp/Introduction.htm>
 20. *Божюкин С.В., Паршин Д.А.* Фракталы и мультифракталы: Учебное пособие. — Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. — 128 с.
 21. *Москаев В.А.* Метод сегментации при оценке качества изделий из углеродистых сталей // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2010. № 2. С. 88-90.

A TECHNIQUE FOR FLUOROSCOPIC CONTROL AND ANALYSIS OF TECHNICAL CONDITION OF AIRCRAFT STRUCTURAL ELEMENTS WITH HONEYCOMB FILLER

Krylov A.A.* , Moskaev V.A.**

*Air force academy named after professor N.E. Zhukovskii and Y.A. Gagarin,
54a, Starykh Bol'shevikov str., Voronezh, 394064, Russia*

* e-mail: Anatoliy_krylov@mail.ru

** e-mail: moskaev82@mail.ru

Abstract

Application of various non-destructive testing (NDT) methods and means in conditions of operation is an effective method for sustaining the required reliability of aerotechnics. The structures with honeycomb filler from aluminum, steel and titanium alloys are employed in the modern aircraft airframes elements. Currently, x-ray method is the most effective one for such structures inspection. The article covers the non-destruction inspection technique performing of the aircraft structural elements with the honeycomb filler, and estimation of the images obtained by the fractal analysis.

The proposed technique consists of three main blocks:

1. The block forming initial data, restrictions and assumptions:

a) Variable parameters of the fluoroscopic installation (“Norka” X-ray TV unit);

b) Invariable parameters characterizing design specifics of aircraft or control object (CO).

2. A block of the fluoroscopic control methodology of aircraft design elements with honeycomb filler:

a) A model for images base formation with account for the fluoroscopic installation parameters adjustment:

- The CO X-raying schemes elaboration;

- forming the images base when changing the anode voltage value at the emitter and the distance from the emitter to the CO. The best picture of the element with a honeycomb core was obtained in the framework of the experiment at $U = 50$ kV; $F = 90$ cm (F is a focal length, U is the anode voltage);

b) A model for the image quality assessing:

- Expert evaluation of the images database, with the concordance coefficient calculation [3];

c) The CO fault detection performing:

- Parameters adjustment of the “Norka” X-ray TV unit according to the image quality assessment model;

- The CO fault detection according to the X-raying scheme;

- The fault detection results decoding and analysis by fractal analysis.

3. Recommendations formation on fault detection and repair of aircraft structural elements with honeycomb filler.

Fractal dimensions of the honeycomb filler without defects and the one with defects (the presence of moisture and geometry violation of the honeycomb filler structure boundaries) were obtained applying FracLab software.

The result of fractal dimension computing was obtained using the FracLab program by the direct geometric method of counting the cells of the honeycomb filler structure without defect and the one with defect.

The graph deviation of the structure with a defect from the linear dependence, characterizing the self-similarity of the structure under study, is twice as large as on the graph without a defect. It indicates the boundaries structure violation of the honeycomb filler. In addition, the graph with a defect in the double logarithmic coordinates has a kink, characterizing transition between different types of the structure (liquid presence in the honeycomb filler).

The additional information on the state of the system under study can be extracted by determining the self-similarity ranges limits.

Thus, employing the fluoroscopic control technique will allow performing the fault detection inspection of the aircraft structural elements with the honeycomb filler based on fractal analysis, as well as analyzing the obtained images base, and trace the dynamics of the honeycomb filler parameters changes, and defects of its internal structure, while the aircraft operation. However, it should be noted that the fractal analysis may be employed in the long term for automated parameters adjustment of the “Norka” X-ray TV unit, and the images base decoding without an operator.

Keywords: fluoroscopic control, aircraft, image processing, fractal analysis.

References

- Sannikov A.V. *Nauchnyi vestnik MGTU GA*, 2013, no. 192, pp. 124-126.
- Gossen S.A. *Nauchnyi vestnik MGTU GA*, 2006, no. 109, pp. 94-99.
- Nebelov E.V., Pototskii M.V., Rodionov A.V., Gorskii A.N. Mechanism of damage propagation to the propeller blades of composite materials with exposed damaging elements. *Aerospace MAI Journal*, 2016, vol. 23, no. 1, pp. 26-31.
- Stepanov A.V. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*, 2004, no. 2, pp. 81-86.
- Klyuev V.V. (editor) *Nerazrushayushchii kontrol'. T. 1, kniga 1. Vizual'nyi i izmeritel'nyi kontrol'* (Non-destructive testing. Vol.1, book 1. Visual and measuring control), Moscow, Mashinostroenie, 2008. 323 p.
- Nesteruk D.A., Vavilov V.P. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*, 2004, vol. 307, no. 6, pp. 62-65.
- Nesteruk D.A., Khorev V.S., Korobov K.N. *Kontrol'. Diagnostika*, 2011, no. 11, pp. 13-16.
- Krylov A.A., Chizhov I.A., Zaets N.P. *Nauka. Promyshlennost'. Oborona: trudy XV Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii (Novosibirsk, 23-25 April 2014). Sbornik statei*, Novosibirsk, NGTU, 2014, pp. 640-644.
- Korobov K.N., Nesteruk D.A. *Vestnik nauki Sibiri*, 2011, no. 1(1), pp. 193-195.
- Nesteruk D.A., Vavilov V.P. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*, 2004, vol. 307, no. 6, pp. 62-65.
- Gerasimov I.V., Karpenko O.N., Krylov A.A., Kirpichnikov A.P., Oleshko V.S., Tkachenko D.P. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*, 2015, vol. 18, no. 5, pp. 158-161.
- Kosarina E.I., Stepanov A.V., Tarakanov Yu.V., Usachev V.E. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*, 2004, no. 2, pp. 73-81.
- Maximov N.A., Maluta E.V., Sharonov A.V. Automated system for aircraft failures recorded during preflight inspection recordkeeping. *Aerospace MAI Journal*, 2015, vol. 22, no. 4, pp. 85-90.
- Tits S.N. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta*, 2008, no. 1, pp. 80-91.
- Kochanenko I. Fractal Characteristics of Forecast Properties of Non-linear Regress. — Lecture Notes in Information Technology. *Journal of Information Engineering Research Institute*, 2012, vol. 13, pp. 192-195.
- Kokhanenko I.K., Moskaev V.A. *Obozrenie prikladnoi i promyshlennoi matematiki*. 2010, vol. 17, no. 4, pp. 568-570.
- Kolmakov A.G., Vstovsky G.V. Multifractal analysis of metallic surface structure changes during mechanical treatment. *Materials Science and Technology*, 1999, vol. 15, no. 5, pp. 1-6.
- Kolmakov A.G., Vstovskii G.V., Bunin I.Zh. *Vvedenie v mul'tifraktal'nuyu parametrizatsiyu struktur materialov* (Introduction to multifractal parametrization of materials structures), Izhevsk, Nauchno-izdatel'skii tsentr “Regulyarnaya i khaoticheskaya dinamika”, 2001, 116 p.
- Programmnyi modul' FracLac*. URL: <http://rsb.info.nih.gov/ij/plugins/fraclac/FLHelp/Introduction.htm>
- Bozhokin S.V., Parshin D.A. *Fraktaly i mul'tifraktaly* (Fractals and multifractals), Izhevsk, NITs “Regulyarnaya i khaoticheskaya dinamika”, 2001, 128 p.
- Moskaev V.A. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Severo-kavkazskii region. Tekhnicheskie nauki*, 2010, no. 2, pp. 88-90.