

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-1-51-63>

УДК 620.169.1

Подходы к исследованию процессов появления и развития напряженно-деформированного состояния в зависимости от режимов вибронагружения элемента конструкции

И. И. Сизонов¹ ✉

¹ Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: Ivan.sizonov2017@yandex.ru

Резюме

Цель исследования заключается в определении допустимых и предельных режимов вибронагружения пластины, имитирующей элемент обшивки летательного аппарата и изготовленной из сплава Д16а, с последующей сборкой и пуско-наладкой стенда экспериментальных исследований процессов появления и развития напряженно-деформированного состояния данной пластины. Циклическое воздействие широкополосной случайной вибрации имитирует рабочие эксплуатационные режимы, которые обуславливают утрату упругих свойств материала и его старение, сопровождаемое уменьшением угла наклона годографа, образованного трехмерным вектором виброускорений, по отношению к горизонтальной плоскости.

Методы. Для определения допустимых и предельных режимов вибронагружения пластины применялись методы математического моделирования. Исследование процессов старения материала пластины, сопровождаемое утратой упругих свойств, производится эквивалентно-циклическим методом, каждый цикл которого содержит две фазы: первая – фаза вибронагружения пластины, вторая – фаза визуального и рентгеноскопического лабораторного контроля, во время которой должны быть обнаружены (при появлении) внутренние дефекты структур пластины или зафиксировано их развитие. Обнаружение подобных дефектов свидетельствует о вероятном скором нарушении целостности пластины, имитирующей элемент обшивки летательного аппарата.

Результаты. Определены значения допустимой и предельной нагрузки на пластину, имитирующей элемент обшивки летательного аппарата. Осуществлены сборка и пуско-наладка стенда экспериментальных исследований процессов напряженного-деформированного состояния, а также подтверждена гипотеза о том, что годограф, образованный трехмерным вектором виброускорений, имеет начальный угол наклона по отношению к горизонтальной плоскости 45°. Вместе с тем ещё не достигнуто заметного эффекта старения, при котором указанный угол изменяется.

Заключение. Изменение угла наклона годографа, образованного трехмерным вектором виброускорений, позволяет судить о степени износа материала с возможностью дальнейшего прогнозирования остаточного ресурса материала. Исследования предлагается продолжить в части набора массива экспериментальных данных.

Ключевые слова: годограф; виброускорение; сплав Д16а; рентгеноскопия; эквивалентно-циклический; допустимая нагрузка; предельная нагрузка; упругие свойства; напряженно-деформированное состояние.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие конфликта интересов, связанных с публикацией данной статьи.

Для цитирования: Сизонов И. И. Подходы к исследованию процессов появления и развития напряженно-деформированного состояния в зависимости от режимов вибронагружения элемента конструкции // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2025. Т. 15, № 1. С. 51–63. [https://doi.org/ 10.21869/2223-1536-2025-15-1-51-63](https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-1-51-63)

Поступила в редакцию 27.01.2025

Подписана в печать 25.02.2025

Опубликована 31.03.2025

Approaches to studying the processes of appearance and development of stress-strain state depending on vibration loading modes of a structure element

Ivan I. Sizonov¹ ✉

¹ Southwest State University
50 Let Oktyabrya Str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: Ivan.sizonov2017@yandex.ru

Abstract

The purpose of the research is to determine the permissible and limiting modes of vibration loading of a plate imitating an aircraft skin element and made of D16a alloy, followed by the assembly and commissioning of an experimental research stand for the appearance and development of the stress-strain state of this plate. The cyclic effect of broadband random vibration simulates operational operating conditions that cause the loss of elastic properties of the material and its aging, accompanied by a decrease in the angle of inclination of the hodograph formed by a three-dimensional vector of vibration accelerations relative to the horizontal plane.

Methods. Mathematical modeling methods were used to determine the permissible and limiting modes of vibration loading of the plate. The study of the aging processes of the plate material, accompanied by loss of elastic properties, is performed by an equivalent cyclic method, each cycle of which contains two phases: the first is the phase of vibration loading of the plate, the second is the phase of visual and X-ray laboratory control, during which internal defects in the plate structures must be detected (if any) or their development recorded. The detection of such defects indicates a likely imminent violation of the integrity of the plate imitating the aircraft skin element.

Results. The values of the permissible and maximum load on the plate imitating the aircraft skin element are determined. The assembly and commissioning of a stand for experimental studies of stress-strain state processes has been carried out, and the hypothesis that the hodograph formed by a three-dimensional vector of vibration accelerations has an initial angle of inclination relative to the horizontal plane of 45° has been confirmed. However, there has not yet been a noticeable aging effect in which the specified angle changes.

Conclusion. Changing the angle of inclination of the hodograph formed by a three-dimensional vector of vibration accelerations makes it possible to judge the degree of wear of the material with the possibility of further forecasting the remaining life of the material. It is proposed to continue the research in terms of collecting an array of experimental data.

Keywords: hodograph; vibration acceleration; alloy D16a; fluoroscopy; equivalent cyclic; permissible load; maximum load; elastic properties; stress-strain state.

Conflict of interest: The authors declares no conflict of interest related to the publication of this article.

For citation: Sizonov I.I. Approaches to studying the processes of appearance and development of stress-strain state depending on vibration loading modes of a structure element. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie* = *Proceedings of the*

Введение

Современная авиационная промышленность продолжает решать комплексную задачу импортозамещения парка гражданских летательных аппаратов (далее – ЛА) [1], которая состоит не только из технических вопросов поиска альтернативных комплектующих изделий [2], но и проблем правового внутрироссийского и международного регулирования [3]. С другой стороны, отчетливо видна проблема устаревающего парка ЛА [4], для которого актуально внедрение альтернативной [5] и модифицированной [6] методик расчета остаточного ресурса по техническому состоянию. Следует отметить, что наметившийся тренд использования изделий в концепции остаточного ресурса характерен не только для отечественных компаний, но и зарубежных, широко применяющих данный подход при эксплуатации трубопроводов [7], реализации архитектуры контроля оборудования производственных предприятий [8] и медцентров [9]. Одной из наиболее крупных групп контроля остаточного ресурса изделия является группа, основанная на анализе вибрационных характеристик исследуемого объекта. Так, анализ вибрационных характеристик для прогнозирования остаточного ресурса применяется для гражданских судов [10], [11], гидравлического оборудования [12], сложного оборудования роторного типа [13], двигателей внутреннего сгорания обычных автомобилей [14]. Предлагается использовать данный

метод для оценки технического состояния элементов авиационной обшивки [15] и авиационных комплексов [16] наряду с применяемым виброакустическим методом [17]. Существенное влияние на вибрационные характеристики оказывает накопление дефектов, связанных с усталостной деформацией изделия [18].

Материалы и методы

Исследования процессов возникновения и развития напряженно-деформированного состояния (далее – процессов НДС) в элементах обшивки ЛА производятся посредством двух пластин, изготовленных из сплава Д16а со следующими параметрами:

- ширина (a) = 150 мм;
- длина (b) = 250 мм;
- толщина (h) = 2 мм.

Данные пластины имитируют элементы обшивки ЛА.

Вторая пластина, в отличие от первой, дополнительно имеет четырехгранную пирамиду, закрепленную в геометрическом центре второй пластины. На гранях пирамиды расположены датчики виброускорения и деформации – всего 3, по одному датчику на каждую свободную грань пирамиды, сигналы от которых считываются и анализируются при помощи микроконтроллера семейства STM32F с уникальным (разработанным индивидуально под указанную задачу) программным обеспечением.

Пластины зажимаются на вибростенде TV59335, который обеспечивает реализацию виброрежимов по категории D1 в соответствии с разделом 8 КТ-160G/14G. По истечении цикла вибрации (6–8 часов) первая пластина просвечивается при помощи рентгеноскопа FILIN X-ARM Compact-225U для обнаружения (фиксации процесса развития) внутренних дефектов структуры материала. Вторая пластина не просвечивается и служит только для формирования годографа вектора виброускорений материала с НДС.

Стенд экспериментальных исследований процессов НДС собран на базе АО «Авиаавтоматика» им. В. В. Тарасова».

Результаты и их обсуждение

Очевидно, что при реализации вынужденных колебаний пластины, зажатой на вибростенде, на неё действует нагрузка q , обусловленная инерционными свойствами данной пластины. Зависимость значения прогиба пластины, изготовленной из сплава Д16а, от значения приложенной нагрузки со стороны вибростенда установлена согласно следующей методике:

1. Определена цилиндрическая жесткость исследуемой пластины (по сути является аналогом линейной жесткости для образцов, имеющих стержневой форм-фактор) по формуле

$$D = \frac{E \cdot h^3}{12 \cdot (1 - \mu)^2} = \frac{74 \cdot 10^9 \cdot 0,002^3}{12 \cdot (1 - 0,34^2)} \approx 55,8, \quad (1)$$

где D – цилиндрическая жесткость исследуемой пластины, Н·м; E – модуль

упругости (модуль Юнга) для сплава Д16а, Па; h – толщина исследуемой пластины, м; μ – коэффициент Пуассона для сплава Д16а.

2. Максимальный прогиб пластины рассчитан для геометрического центра пластины по формуле

$$w = q \cdot \frac{a^4}{64 \cdot D} = q \cdot \frac{(0,150)^4}{64 \cdot 55,8} = \frac{q}{7 \cdot 10^6}, \quad (2)$$

где w – максимальный прогиб пластины, м; q – механическая нагрузка на пластину, Па; D – цилиндрическая жесткость исследуемой пластины, Н·м.

Учитывая, что пластина из сплава Д16а является жесткой, то для неё выполняется следующее условие прочности:

$$w < 0,25 h \quad (3)$$

где w – максимальный прогиб пластины, м; h – толщина исследуемой пластины, м.

Тогда можно рассчитать, какая нагрузка для исследуемой пластины станет предельной (при превышении этого значения возможно нарушение целостности пластины):

$$q_{\text{предел}} = 7 \cdot 10^6 \cdot 0,0005 = 3500, \quad (4)$$

где $q_{\text{предел}}$ – предельное значение механической нагрузки, Па; $w_{\text{предел}}$ – предельный прогиб пластины, м; h – толщина исследуемой пластины, м.

С учетом запаса прочности 10 % и в соответствии с выражением выше максимально допустимым значением нагрузки будем считать 3150 Па.

3. Рассчитаем наибольшее механическое напряжение, которое будет проявляться в двух симметричных зонах на боковых гранях (длина x толщина или $b \times h$) исследуемой пластины:

$$\sigma_{\max} = 6 \frac{M_{\max}}{h^2} = \frac{q_{\text{предел}} \cdot a^2}{h^2 \cdot D} =$$

$$= 6 \frac{3150 \cdot (0,150)^2}{(0,002)^2 \cdot 55,8} \approx 1,9 \cdot 10^7, \quad (5)$$

где $\sigma_{\max}$ – максимальное возникающее механическое напряжение, Па; $M_{\max}$ –

максимальный момент силы, Н·м; h – толщина исследуемой пластины, м.

Рассмотрим зависимость механического напряжения в структуре пластины от величины нагрузки (рис. 1).

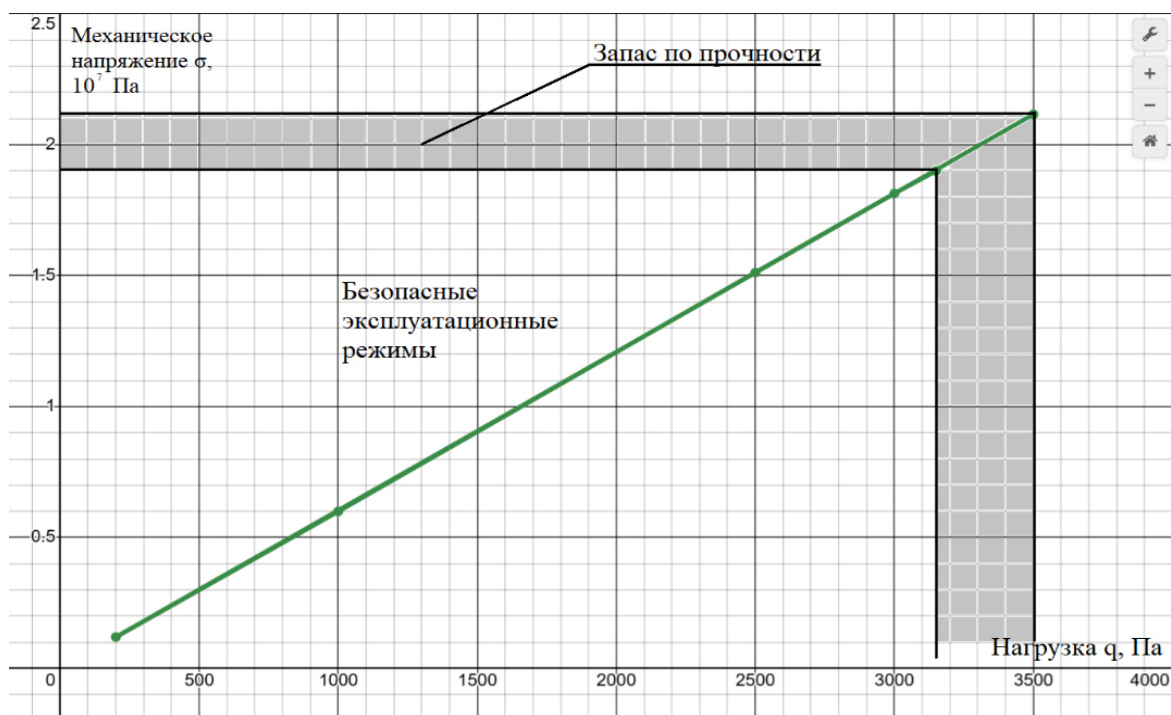


Рис. 1. Зависимость механического напряжения в структуре пластины от величины нагрузки

Fig. 1. Dependence of the mechanical stress in the plate structure on the load value

Произведенные вычисления позволяют осуществить осознанный выбор параметров и настроек вибростенда, выполняющего функцию вибронагружения исследуемой пластины, и подтверждают

годность пластины к нагрузкам по категориям D (D1) или E (E1) в соответствии с разделом 8 КТ-160G/14G (табл. 1).

Таблица 1. Требования в части спектральной плотности мощности виброускорений по категориям D1 и E1 (КТ-160G/14G)

Table 1. Requirements regarding the spectral density of vibration acceleration power by categories D1 and E1 (КТ-160G/14G)

Показатели	Спектральная плотность мощности виброускорения, $g^2/\text{Гц}$						
Частоты, Гц	10	28	40	100	200	250	500
Категория D1	0,040	0,040	0,080	0,080	0,080	0,080	0,160
Категория E1	0,040	0,040	0,080	0,080	0,160	0,160	0,160

В соответствии с разделом 8 КТ-160G/14G категория D (D1) соответствует расположению объекта на мотогондоле или пилоне, категория E (E1) – хвостовому оперению и хвостовому обтеканию самолетов (как дозвуковых, так и сверхзвуковых) с турбореактивными и турбовентиляторными двигателями, что обеспечивает задание максимально жесткого соотношения частоты и спектральной плотности мощности виброускорения.

Необходимо отметить, что исследования в диапазоне частот 500–2000 Гц не проводились преднамеренно, поскольку экспериментальными данными подтвержден эффект скорейшего развития трещин и утраты упругих свойств конструкционных материалов именно в области низких частот [19].

Рассмотрим стенд экспериментальных исследований процессов НДС (рис. 2).

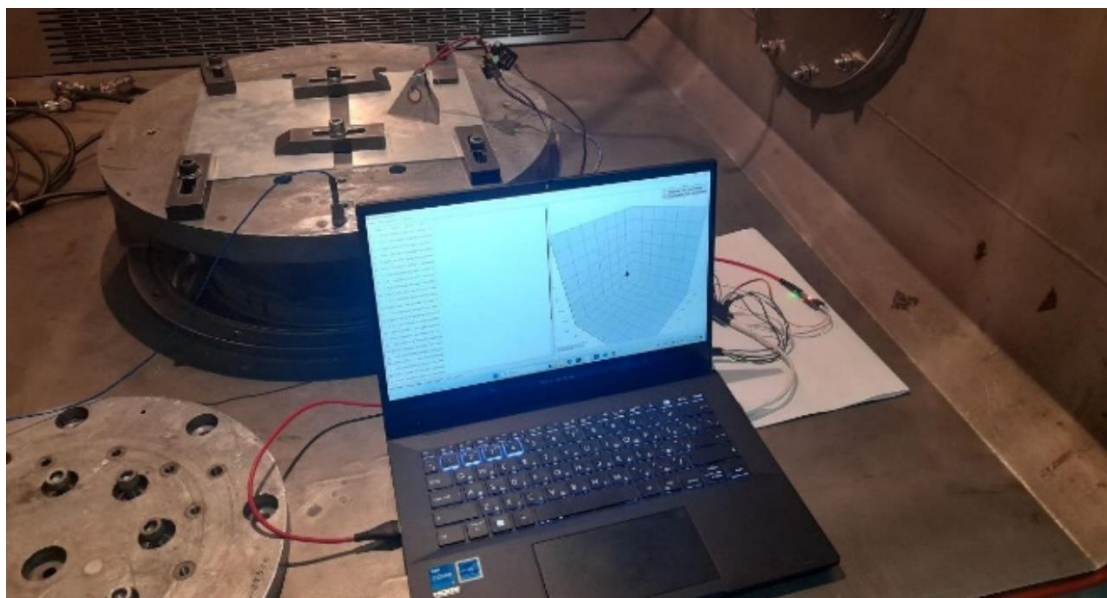


Рис. 2. Стенд экспериментальных исследований процессов НДС

Fig. 2. A stand for experimental studies of SSS-processes

При организации стенда экспериментальных исследований процессов НДС был принят ряд допущений.

Во-первых, имеется допущение, заключающееся в том, что влияние массы конструктивного элемента в виде металлической пирамиды на процессы, протекающие внутри второй пластины, по сравнению с процессами, протекающими в первой пластине, отсутствует.

Во-вторых, возможна ситуация, когда происходит не плавная и равномерная деградация структуры обеих пластин, связанная с утратой упругих свойств металла, а развитие в одной из пластин микротрещины во внутренних слоях материала, что может привести к неадекватной трактовке полученного результата. Купировать эту вероятность можно просветом второй пластины

(с пирамидой) по истечении цикла исследований с целью подтверждения идентичности процессов, протекавших в обеих пластинах.

Также следует отметить, что стенд экспериментальных исследований процессов НДС должен в первую очередь наглядно подтвердить теорию о том, что годограф вектора виброускорения точек материала в НДС имеет значительно меньший угол с горизонтальной плоскостью, в отличие от годографа вектора виброускорения точек материала без

НДС, угол для которого составляет $45^{\circ 1}$, однако по истечении 34 ч исследований никаких изменений угла наклона не зафиксировано, что может объясняться недостаточностью объема проведенных исследований. При этом начальные результаты подтверждают исходную теорию в части того, что угол наклона годографа вектора виброускорения точек материала без НДС составляет 45° (рис. 3). Рентгеноскопия пластины какие-либо дефекты также не выявила (рис. 4).

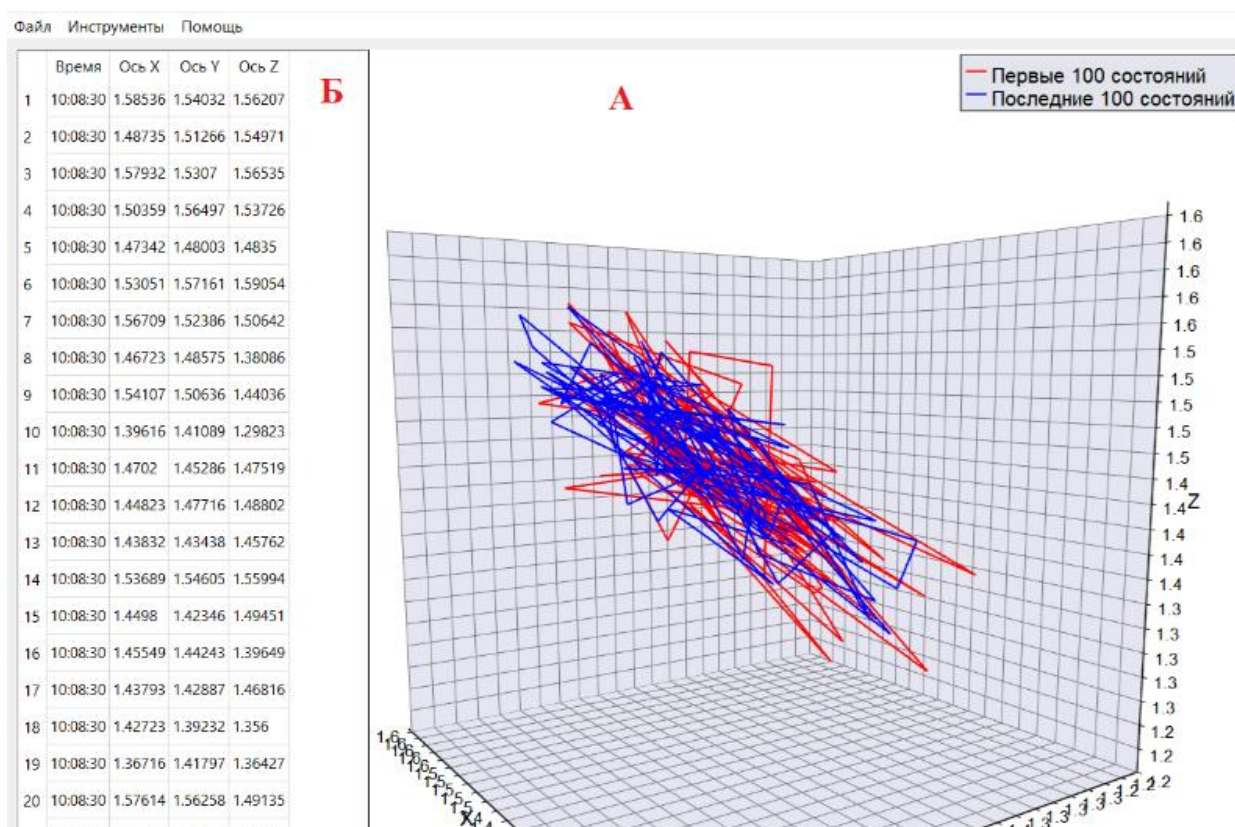


Рис. 3. Годограф вектора виброускорения точки материала с напряженно-деформированным состоянием

Fig. 3. Hodograph of the vibration acceleration vector of a point of a material with a stress-strain state

¹ Пат. 2820426 С1 Российская Федерация, МПК G01B 11/16, G01L 1/24. Устройство измерения деформации / Мухин И. Е., Сизонов И. И., Аб-рамзон С. С.; заявитель Акционерное общество

«Авиаавтоматика» имени В. В. Тарасова». № 2023122885; заявл. 01.09.23; опубл. 03.06.24. EDN XXKAMN

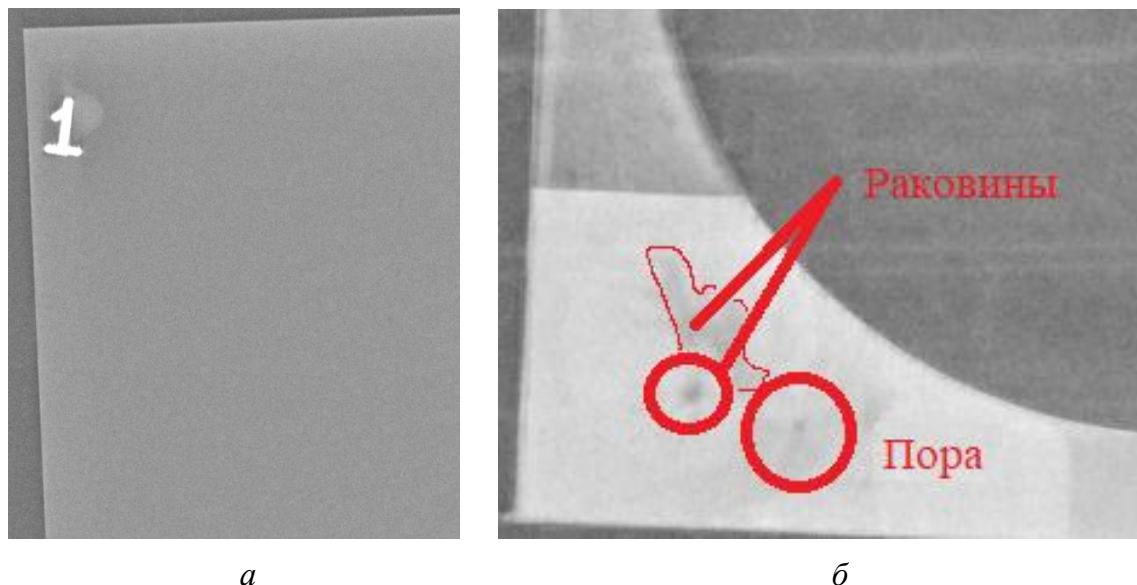


Рис. 4. Результаты рентгеноскопии исследуемой пластины в зоне 1: а – образец; б – пример раковин и поры

Fig. 4. X-ray results of the examined plate in zone 1: а – sample; б – an example of shells and pores

Изменение угла наклона эллипса (или, скорее, «облака», полученного при воздействии широкополосной вибрации), образованного годографом вектора виброускорений точки материала, который, в свою очередь, является результатом сложения проекций векторов виброускорений по каждой из трех взаимно ортогональных осей, фиксируется средствами разработанного ПО (рис. 3, зона Б). Вычисляя среднее значений по каждой из трех осей для каждой итерации эксперимента, можно сначала математически, а затем и визуально выявить изменение контролируемого угла.

Выводы

Средства разработанного программного обеспечения позволяют, кроме визуального контроля, фиксировать координаты точек годографа, которые затем

с помощью стандартных офисных приложений можно анализировать (в части автоматизированного расчета среднего, поиска минимального и максимального значений). Привлечение математических методов, например метода контрольных карт Шухарта, позволит выявить наметившийся тренд уменьшения угла наклона годографа к горизонтальной плоскости.

Также нужно отметить возможность модернизации объекта исследования: в текущей конфигурации применяются изотропные пластины без концентраторов напряжений. Предлагается доработка пластин в части отрезания квадратного элемента в одном из углов каждой пластины и дальнейшего восстановления целостности путем клёпки. Предполагается, что клёпанное соединение существенно сократит время,

необходимое для проведения исследований, т. к. это спровоцирует деградацию внутренних структур материала и, возможно, появление микротрещин, что, в

свою очередь, как ожидается, отобразится на угле наклона годографа и будет выявлено на рентгеноскопии.

Список литературы

1. Гафаров Г. А., Седьмова А. Г. Возможности и проблемы импортозамещения авиационной техники в современных условиях // Научный аспект. 2024. Т. 53, № 6. С. 6893–6901. EDN PPSDDDB
2. Аспекты импортозамещения радиоэлектронных компонентов в авиационной отрасли / Л. Л. Гончар, И. Н. Абрамова, Е. Г. Спиридонов, О. В. Абрамов // Воздушно-космические силы. Теория и практика. 2023. № 25. С. 63–72. EDN XIAIEY
3. Фролова Е. К. Актуальные проблемы правового регулирования развития авиационной промышленности в условиях трансформации глобальных рынков // Вестник университета имени О. Е. Кутафина (МГЮА). 2023. № 8. С. 40–50. EDN WPZQIU. <https://doi.org/10.17803/2311-5998.2023.108.8.040-050>
4. Куртаев С. Ж. Теория и практика контроля и диагностики систем воздушных судов гражданской авиации // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество». 2016. Т. 2. С. 242–244.
5. Сизонов И. И., Мухин И. Е., Барабушка А. С. Подходы к определению остаточного ресурса основных узлов вертолёта с учётом выполненных профилей полёта // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2023. Т. 1, № 3. С. 61–73.
6. Гаврильев И. М., Корольков Д. И., Гравит М. В. Модифицированная методика расчета остаточного ресурса с использованием экспоненциального распределения // Вестник Евразийской науки. 2019. № 2. С. 89–103.
7. Review of Railway Operation Tunnel Inspection System and Condition Assessment Method / G. Song, Ya. Huang, Zh. Wang [et al.] // Acta Polytechnica Hungarica. 2024. Vol. 21, N 1. P. 259–279. EDN IPMXOI. <https://doi.org/10.12700/aph.21.1.2024.1.16>
8. An RDF-based Approach for Implementing Industry 4.0 Components with Administration Shells / I. Grangel-González, L. Halilaj, S. Auer, S. Lohmann, C. Lange, D. Collarana // 2016 IEEE 21st International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). Berlin, Germany: IEEE, 2016. P. 89–102. <https://doi.org/10.1109/ETFA.2016.7733503>
9. Giustozzi F., Saunier J., Zanni-Merk C. Context Modeling for Industry 4.0: an Ontology-Based Proposal // Procedia Computer Science. 2018. N 126. P. 675–684.

10. Белый А. А., Герасиди В. В., Лисаченко В. В. Неразрушающий вибрационный контроль элементов судовых двигателей в эксплуатации // Эксплуатация морского транспорта. 2024. № 2 (111). С. 167–174. EDN GQLEFQ. <https://doi.org/10.34046/aumsuomtl11/28>
11. Николаев Н. И., Мышинский Э. Л., Гриценко М. В. К вопросу оценки технического состояния судовых технических средств морских судов по параметрам вибрации // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. 2020. № 60-61. С. 84–90. EDN XAJJMX
12. Чистоклетов А. А., Пугин К. Г. Использование вибродиагностики для определения технического состояния гидравлического оборудования // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. 2021. № 3. С. 54–62. EDN TUVIHN. <https://doi.org/10.15593/24111678/2021.03.07>
13. Соколова А. Г., Балицкий Ф. Я. Виброконтроль и диагностика сложного машинного оборудования роторного типа с применением нестандартного подхода // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2023. № 1. С. 62–73. EDN HGIQWU. https://doi.org/10.52261/02346206_2023_1_62
14. Система определения технического состояния двигателя внутреннего сгорания на основе измерения и анализа вибрации / А. Г. Садриев, Д. М. Шамсутдинов, С. А. Вильцын [и др.] // International Journal of Advanced Studies. 2024. Т. 14, № 2. С. 32–50. EDN FVPORY. <https://doi.org/10.12731/2227-930X-2024-14-2-286>
15. Сизонов И. И., Барабушка А. С., Мухин И. Е. Двухэтапная математическая модель оценки режимов вынужденных вибраций элемента обшивки летательного аппарата с применением оптоволоконных технологий // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2023. Т. 13, № 3. С. 52–64.
16. Коптев Д. С., Мухин И. Е. Практические результаты расчетно-экспериментальных исследований по определению диапазонов изменения основных контролируемых параметров перспективных авиационных комплексов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2023. Т. 1, № 3. С. 39–60.
17. Бобров В. Т., Бобренко В. М., Гульшин А. В. Акустический экспресс-способ измерения упругих констант металла высоконагруженных конструкций, работающих в экстремальных условиях. Часть 1. Проблемы эксплуатации авиационных и космических систем // Контроль. Диагностика. 2020. № 6. С. 46–63.
18. Можаровский В. В., Киргинцева С. В. Расчет напряженно-деформированного состояния зубьев зубчатых колес из композиционных и функционально-градиентных материалов // Проблемы физики, математики и техники. 2023. № 1(54). С. 31–37. EDN GTXFSB. https://doi.org/10.54341/20778708_2023_1_54_31

19. Исследование воздействия концентратора механических напряжений на процессы возникновения и развития трещин в конструкционных элементах авиационной техники / И. И. Сизонов, Е. Л. Лебедев, А. Н. Попов, И. Е. Мухин // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2024. Т. 14, № 1. С. 36–49.

Reference

1. Gafarov G.A., Sedmova A.G. Possibilities and problems of import substitution of aviation equipment in modern conditions. *Nauchnyi aspekt = Scientific Aspect*. 2024;53(6):6893–6901. (In Russ.) EDN PPSDDDB

2. Gonchar L.L., Abramova I.N., Spiridonov E.G., Abramov O.V. Aspects of import substitution of radioelectronic components in the aviation industry. *Vozdushno-kosmicheskie sily. Teoriya i praktika = Aerospace Forces. Theory and Practice*. 2023;(25):63–72. (In Russ.) EDN XIAIEY

3. Frolova E.K. Actual problems of legal regulation of the aviation industry development in the context of global market transformation. *Vestnik universiteta imeni O.E. Kutafina (MGYuA) = Bulletin of the O.E. Kutafin University (MGUA)*. 2023;(8):40–50. (In Russ.) EDN WPZQIU. <https://doi.org/10.17803/2311-5998.2023.108.8.040-050>

4. Kurtaev S.J. Theory and practice of control and diagnostics of civil aviation aircraft systems. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma «Nadezhnost' i kachestvo» = Proceedings of the International Symposium «Reliability and Quality»*. 2016;2:242–244. (In Russ.)

5. Sizonov I.I., Mukhin I.E., Barabushka A.S. Approaches to determining the residual resource of the main helicopter components, taking into account the flight profiles performed. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2023;1(3):61–73. (In Russ.)

6. Gavril'yev I.M., Korolkov D.I., Gravit M.V. Modified method of calculating residual resource using exponential distribution. *Vestnik Evraziiskoi nauki = Bulletin of Eurasian Science*. 2019;(2):89–103. (In Russ.)

7. Song G., Huang Ya., Wang Zh., et al. Review of Railway Operation Tunnel Inspection System and Condition Assessment Method. *Acta Polytechnica Hungarica*. 2024;21(1):259–279. EDN IPMXOI. <https://doi.org/10.12700 / aph.21.1.2024.1.16>

8. Grangel-González I., Halilaj L., Auer S., Lohmann S., Lange C., Collarana D. An RDF-based Approach for Implementing Industry 4.0 Components with Administration Shells. In: *2016 IEEE 21st International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*. Berlin, Germany: IEEE; 2016. P. 89–102. <https://doi.org/10.1109/ETFA.2016.7733503>

9. Giustozzi F., Saunier J., Zanni-Merk C. Context Modeling for Industry 4.0: an Ontology-Based Proposal. *Procedia Computer Science*. 2018;(126):675–684.
10. Bely A.A., Gerasidi V.V., Lisachenko V.V. Non-destructive vibration control of marine engine elements in operation. *Ekspluatatsiya mor-skogo transporta = Operation of Marine Transport*. 2024;(2):167–174. (In Russ.) EDN GQLEFQ. <https://doi.org/10.34046/aumsuomtl11/28>
11. Nikolaev N.I., Myshinsky E.L., Gritsenko M.V. On the issue of assessing the technical condition of marine equipment by vibration parameters. *Nauchno-tekhnicheskii sbornik Rossiiskogo morskogo registra sudokhodstva = Scientific and Technical Collection of the Russian Maritime Register of Shipping*. 2020;(60–61):84–90. (In Russ.) EDN XAJJMX
12. Chistokletov A.A., Pugin K.G. The use of vibration diagnostics to determine the technical condition of hydraulic equipment. *Transport. Transportnye sooruzheniya. Ekologiya = Transport. Transport Facilities. Ecology*. 2021;(3):54–62. (In Russ.) EDN TUVIHN. <https://doi.org/10.15593/24111678/2021.03.07>
13. Sokolova A.G., Balitsky F.Ya. Vibration control and diagnostics of complex rotary-type machinery using a non-standard approach. *Problemy mashinostroeniya i avtomatizatsii = Problems of Mechanical Engineering and Automation*. 2023;(1):62–73. (In Russ.) EDN HGIQWU. https://doi.org/10.52261/02346206_2023_1_62
14. Sadriev A.G., Shamsutdinov D.M., Viltsyn S.A. [et al.]. The system for determining the technical condition of an internal combustion engine based on vibration measurement and analysis. *International Journal of Advanced Studies*. 2024;14(2):32–50. (In Russ.) EDN FVPORY. <https://doi.org/10.12731/2227-930X-2024-14-2-286>
15. Sizonov I.I., Barabushka A.S., Mukhin I.E. A two-stage mathematical model for estimating the modes of forced vibrations of an aircraft skin element using fiber-optic technologies. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2023;13(3):52–64. (In Russ.)
16. Koptev D.S., Mukhin I.E. Practical results of computational and experimental studies to determine the ranges of change in the main controlled parameters of promising aviation complexes. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta, seriya Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2023;1(3):39–60. (In Russ.)
17. Bobrov V.T., Bobrenko V.M., Gulshin A.V. Acoustic express method for measuring elastic constants of metal of highly loaded structures operating under extreme conditions. Part 1. Problems of operation of aviation and space systems. *Kontrol'. Diagnostika = Control. Diagnostics*. 2020;(6):46–63. (In Russ.)

18. Mozharovsky V.V., Kirgintseva S.V. Calculation of the stress-strain state of gear teeth made of composite and functionally gradient materials. *Problemy fiziki, matematiki i tekhniki = Problems of Physics, Mathematics and Technology*. 2023;(1):31–37. (In Russ.) EDN GTXFSB. https://doi.org/10.54341/20778708_2023_1_54_31

19. Sizonov I.I., Lebedev E. L., Popov A. N., Mukhin I. E. Investigation of the effect of a mechanical stress concentrator on the processes of occurrence and development of cracks in structural elements of aviation equipment. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2024;14(1):36–49. (In Russ.)

Информация об авторе / Information about the Author

Сизонов Иван Игоревич, аспирант кафедры космического приборостроения и систем связи, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: Ivan.sizonov2017@yandex.ru, ORCID: 0009-0008-0697-091X

Ivan I. Sizonov, Post-Graduate Student of the Department of Space Instrumentation and Communications, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: Ivan.sizonov2017@yandex.ru, ORCID: 0009-0008-0697-091X