

Научная статья

УДК 620.179.1

URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=182566>

## МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ВТУЛКИ НЕСУЩЕГО ВИНТА С ПРИМЕНЕНИЕМ РЕНТГЕНОВСКОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ

Виктор Иванович Митряйкин<sup>1</sup>, Оскар Александрович Саченков<sup>2</sup>, Татьяна Александровна Зайцева<sup>3</sup>✉,  
Екатерина Викторовна Кротова<sup>4</sup>, Рустем Хайдарович Закиров<sup>5</sup>, Рустем Чулпанович Иксанов<sup>6</sup>

<sup>1,3,4</sup> Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева – КАИ (КНИТУ-КАИ),

Казань, Республика Татарстан, Россия

<sup>2</sup> Казанский (Приволжский) федеральный университет,

Казань, Республика Татарстан, Россия

<sup>5</sup> Республиканская клиническая инфекционная больница им. проф. А.Ф. Агафонова,

Казань, Республика Татарстан, Россия

<sup>6</sup> Казанское высшее танковое командное ордена Жукова Краснознаменное училище,

Казань, Республика Татарстан, Россия

<sup>1</sup> [vmitryaykin@bk.ru](mailto:vmitryaykin@bk.ru)

<sup>2</sup> [OASachenkov@kpfu.ru](mailto:OASachenkov@kpfu.ru)

<sup>3</sup> [tanechkaGA@mail.ru](mailto:tanechkaGA@mail.ru) ✉

<sup>4</sup> [kati\\_mit@mail.ru](mailto:kati_mit@mail.ru)

<sup>5</sup> [metsur@ya.ru](mailto:metsur@ya.ru)

<sup>6</sup> [Iksanovrust@yandex.ru](mailto:Iksanovrust@yandex.ru)

**Аннотация.** Рассматривается методика рентгеновского контроля многослойных композитных конструкций на примере бесшарнирной втулки несущего винта (НВ) вертолета. Представлены экспериментальные данные обследования втулок НВ на рентгеновском компьютерном томографе. Раскрыт алгоритм автоматизированной обработки данных томографических исследований, основанный на результатах статистической обработки замеров эталонного и исследуемого изделия. Предложено использовать корреляционные зависимости для определения пористости материала по значениям коэффициента ослабления рентгеновского излучения, которые позволяют идентифицировать механические характеристики конструкции и оценить уровень допустимых нагрузок.

**Ключевые слова:** многослойные композиционные конструкции, неразрушающий контроль, рентгеновская компьютерная томография, втулка несущего винта вертолета, цифровой прототип, внутренние дефекты

**Финансирование:** Методика исследования разработана и выполнена при финансовой поддержке, выделяемой Казанскому федеральному университету по государственному заданию в сфере научной деятельности, проект № FZSM-2023-0009.

**Для цитирования:** Митряйкин В.И., Саченков О.А., Зайцева Т.А., Кротова Е.В., Закиров Р.Х., Иксанов Р.Ч. Методика оценки технического состояния втулки несущего винта с применением рентгеновской компьютерной томографии // Вестник Московского авиационного института. 2024. Т. 31. № 3. С. 117–127. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=182566>

Original article

## TECHNICAL CONDITION ASSESSMENT TECHNIQUE OF THE MAIN ROTOR SLEEVE BY THE X-RAY COMPUTER TOMOGRAPHY

Viktor I. Mitryaikin<sup>1</sup>, Oskar A. Sachenkov<sup>2</sup>, Tat'yana A. Zaitseva<sup>3</sup>✉, Ekaterina V. Krotova<sup>4</sup>,  
Rustem Kh. Zakirov<sup>5</sup>, Rustem Ch. Iksanov<sup>6</sup>

<sup>1, 3, 4</sup> Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI,  
Kazan, Republic of Tatarstan, Russia

<sup>2</sup> Kazan Federal University,

Kazan, Republic of Tatarstan, Russia

<sup>5</sup> Republican Clinical Infectious Diseases Hospital named after prof. A.F. Agafonov,  
Kazan, Republic of Tatarstan, Russia

<sup>6</sup> Kazan Higher Tank Command Order of Zhukov Red Banner School,  
Kazan, Republic of Tatarstan, Russia

<sup>1</sup> vmitryaykin@bk.ru

<sup>2</sup> OASachenkov@kpfu.ru

<sup>3</sup> tanechkaGA@mail.ru ✉

<sup>4</sup> kati\_mit@mail.ru

<sup>5</sup> metsur@ya.ru

<sup>6</sup> lksanovrust@yandex.ru

### Abstract

Polymer composite materials (PCM) are widely applied while creating samples of the modern aircraft engineering. Spiral X-ray computer tomography (SXCT) is one of the state-of-the-art methods of the composite materials non-destructive testing. With the SXCT, a physical quantity reconstructed in the sectional plane is the the X-ray attenuation coefficient, which depends on the material density and elements of the material composition.

The article considers the X-ray inspection technique of multilayer composite structures on the example of a helicopter hingeless main rotor (MR) sleeve made from multilayer polymer composite materials. The article presents experimental data obtained while the MR sleeves examination on the X-ray computed tomograph. The authors proposed a technique for the PCM mechanical characteristics identifying by the SXCT. Along with visual inspection of internal defects based on tomograms of structural sections, this technique allows performing a quantitative assessment of the material structure. While the object examination, its 3D-model is being created with the values of the relative X-ray attenuation coefficient in Hounsfield numbers (HU), which depend on the density and porosity of the material. The authors proposed to employ correlation dependencies to determine the material porosity based on the values of the X-ray attenuation coefficient, which allows identifying the mechanical characteristics of structures and assess the level of permissible loads. As the result, they proposed an algorithm for automated data processing of tomographic studies based on the results of measurements statistical processing of both reference and tested product.

In the case of the physical-and-mechanical characteristics degradation exceeding the tolerance the sleeve is being rejected. Comparison of the results of both reference and tested torsion bars measurement is most effective by the histograms, which demonstrate percentage of this or that HU values in the torsion bar section under study.

The SXCT data is being accepted as a digital prototype of the real product, which contains information not only about materials distribution along the product volume, but the data on local defects as well. This approach may reduce the number of studies, substituting them by the numerical modeling. The products quality herewith may be controlled by the interactive system sensitive only to the defects. There is no need to spend time in flawless sections assessing since the system directs the studies right to the suspicious areas.

**Keywords:** multilayer composite structures, non-destructive testing, X-ray computed tomography, helicopter main rotor sleeve, digital prototype, internal defects

**Funding:** the technique for the research was developed and accomplished with the financial support allotted to the Kazan Federal University under the State Assignment in the scientific activity sphere, Project No. FZSM-2023-0009.

**For citation:** Mitryaikin V.I., Sachenkov O.A., Zaitseva T.A., Krotova E.V., Zakirov R.Kh., Iksanov R.Ch. Technical Condition Assessment Technique of the Main Rotor Sleeve by the X-Ray Computer Tomography. *Aerospace MAI Journal*, 2024, vol. 31, no. 3, pp. 117–127. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=182566>

## Введение

Разработка многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов (ПКМ) с заданными механическими свойствами, прогнозирование их прочностных характеристик, определение исходного и остаточного ресурсов невозможны без глубокого изучения структуры материалов с применением различных методов неразрушающего контроля. Использование таких методов при диагностике конструкций из ПКМ сводится главным образом к определению фактического значения соответствующего показателя свойств материала, различных несовершенств структуры, дефектов и повреждений. При этом влияние этих факторов на несущую способность исследуемой конструкции не оценивается. Изменение механических свойств в конструкциях ЛА определяется с помощью коэффициента безопасности  $f_i$ , который находится по следующей формуле:

$$f_i = \frac{R}{R_0}, \quad (1)$$

где  $R_0$  – свойства эталонной конструкции;  $R$  – свойства конструкции с повреждениями.

В работе [1] приведены допускаемые значения этого коэффициента для различных условий эксплуатации. Предельное значение его снижения, исключая аварийную ситуацию, должно быть не меньше  $f_i \leq 0,67$ , т. е. снижение прочностных характеристик более 33% не допускается. К показателям структуры материала, которые наиболее существенно влияют на механические свойства относится ее пористость  $V_{\Pi}$ . Для исследования влияния пористости на механические характеристики, проводят исследования образцов материала, у которых заранее была определена величина объемной доли пор неразрушающим методом или поры моделировались отверстиями. В работе [2] приведены результаты исследования влияния пористости на механические характеристики стеклопластика. Установлено, что предел прочности при росте пористости снижается. При значениях пористости  $V_{\Pi} > 3-4\%$  прочность при межслоевом сдвиге снижается примерно в два раза. Подобные исследования были проведены в работе [3], результаты совпадают. Авиационная фирма Boeing (США) изделия с пористостью более 2% забраковывает, а фирма Airbus допускает объемную долю пор 2,5% [4–5].

Для определения объемной доли пор в образцах из ПКМ применяются разрушающие методы: травление кислотами, выжигание, исследование шлифов с помощью оптического микроскопа (металлография), гравиметрический метод. Все перечисленные методы предполагают частичное или полное разрушение образцов из ПКМ и в процессе

эксплуатации неприменимы. Поэтому важной задачей является определение значения объемной доли пор на этапе производства и эксплуатации изделий из ПКМ с помощью неразрушающего контроля. В настоящее время для определения объемной доли пор с помощью неразрушающего контроля перспективными являются компьютерная томография и ультразвуковые методы. Использование этих методов неразрушающего контроля для таких задач чаще всего связано с оценкой косвенной статистической взаимосвязи физических параметров и параметров, которые могут быть определены в процессе диагностики. После установления корреляционных связей между этими параметрами на эталонных образцах можно определить физические параметры на конкретном участке композиционной конструкции и судить о ее прочности.

В настоящее время для определения пористости в конструкциях ЛА с помощью неразрушающего контроля в основном используются акустические методы, где заранее были построены корреляционные зависимости связи пористости с акустическими параметрами [6–9].

В настоящей работе предложена методика идентификации механических характеристик ПКМ с применением спиральной компьютерной томографии (СКТ) [10–13]. Этот метод позволяет наряду с визуальным контролем внутренних дефектов на базе томограмм сечений конструкций проводить количественную оценку структуры материала. При обследовании объекта создается ее 3D-модель со значениями относительного коэффициента ослабления рентгеновского излучения в числах  $HU$ , которые зависят от плотности материала.

Авторами для стеклопластика Т-25 такая зависимость была получена при контроле тестовых образцов различной пористости на СКТ [14]:

$$V_{\Pi} = 41,5 - 0,039HU; R^2 = 0,82. \quad (2)$$

Наличие корреляционных зависимостей между пористостью материала  $V_{\Pi}$  и единицами  $HU$  позволяет найти предельное значение  $HU$ , при котором пористость снижает механические характеристики, выше нормы, установленной на предприятии.

Таким образом, данные томографии позволяют определить распределение механических свойств материала по объему изделия. В этом случае данные компьютерной томографии выступают в роли цифрового двойника изделия.

Целью работы является разработка автоматизированного алгоритма оценки технического состояния многослойных композиционных конструкций с применением СКТ, основанного на сравнении гистограмм значений  $HU$  по объему детали для эталонного и исследуемого образца.

## Материалы и методы

В качестве объекта исследования были выбраны втулки несущего винта вертолета «Ансат» (рис. 1). Втулка несущего винта (ВНВ) спроектирована по бесшарнирному типу с упругим торсионом, выполняющим роль горизонтального, вертикального и осевого шарниров.

Торсион втулки НВ конструктивно выполнен как композитная балка (рис. 2). Он имеет три участка: комлевой, упругий (торсионный) и концевой. Комлевой участок имеет отверстия для крепления к валу редуктора, к концевому участку крепятся переходники лопасти. Упруго-деформируемый участок состоит из чередующихся слоев стеклопластика Т-25 с углами укладки  $\alpha = [0^\circ, -45^\circ, +45^\circ]$  и резины, спрессованных совместно. Границы слоев резины имеют форму «ласточкина хвоста». Для уменьшения жесткости на кручение балка имеет продольные прорезы, что дает возможность использовать этот участок торсиона как осевой шарнир втулки НВ.

Втулка НВ изготавливается путем склеивания слоев различных материалов, отличающихся по структуре, механическим характеристикам, свойствам адгезии и другим показателям. Склеивание таких материалов является ответственным этапом производства, поскольку необходимо формирование сплошности клеевых соединений и равномерность распределения клея в контактирующих слоях. Наличие зон непрочности или проклеек плохого качества в конструкции при действии на нее эксплуатационных нагрузок может привести к расслоению материала, проникновению влаги и, как следствие, – к снижению несущей способности или к разрушению. Участки непрочности и расслоений в



Рис. 1. Втулки несущего винта

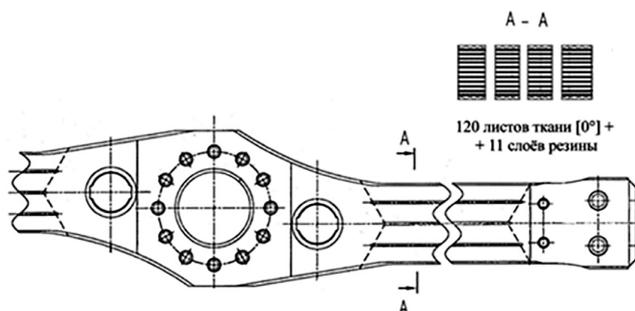


Рис. 2. Схема торсиона НВ

готовой конструкции можно обнаружить только неразрушающими методами контроля, поэтому внедрение таких методов и способов контроля на этапах производства и эксплуатации является актуальной задачей.

В статье для неразрушающего контроля втулок ВНВ использовался компьютерный томограф GE (HiSpeed NX/i). Возможности томографа позволяют за несколько секунд обеспечить послойную визуализацию значительной области исследуемой конструкции. Длина поля сканирования составляет 162 см, а время сканирования – 60 с. В зависимости от размеров дефекта можно задавать различные интервалы между сечениями: 0,5, 1, 2, 3, 5, 7 мм. При спиральном сканировании происходит практически полное исключение пропусков срезов. В первую очередь делается обзорный цифровой снимок с заданным шагом в исследуемой области (рентгенограмма), на которой пронумерованы все слои. На этапе реконструкции, по множеству полученных измерительной системой проекций, с помощью быстродействующих процессоров вычисляются значения коэффициентов ослабления для каждого элементарного объема, их измеряют в относительных по отношению к ослаблению воды единицах, называемых числами Хаунсфилда ( $HU$ )

$$HU = 1000 \frac{\mu - \mu_{\text{воды}}}{\mu_{\text{воды}}}, \quad (3)$$

где  $\mu$  – коэффициент ослабления исследуемого материала;  $\mu_{\text{воды}}$  – коэффициент ослабления воды. В этой системе отсчета вода – 0  $HU$ , воздух – 1000  $HU$ .

Большим достоинством СКТ является возможность воспроизводить значения  $HU$  для любой точки контролируемой области в цифровой форме. Линейный профиль значений можно создать по любому выбранному маршруту.

На рис. 3 показаны томограммы сечений упругого участка торсиона ВНВ. Светлые участки – это слои стеклопластика, темные слои резины, белой линией показана линия измерения ед.  $HU$ . Результаты замера ед.  $HU$  торсиона без дефектов показывают, что плотность стеклопластика составляет 1100 ... 1200  $HU$ , резины – 850 ... 900  $HU$ . Структура слоев материалов и их значения  $HU$  одинаковые по всему маршруту (рис. 3,а). В зонах непрочности и расслоения слоев материалов образуются разрывы, пустоты с пониженной плотностью, что хорошо обнаруживается при таких измерениях. Это видно на рис. 3,б, где показаны измерения  $HU$  торсиона с расслоением.

В дефектной зоне между слоем стеклопластика и резины наблюдается резкое снижение плотности. В результате таких исследований появляется возможность путем анализа значений коэффициентов

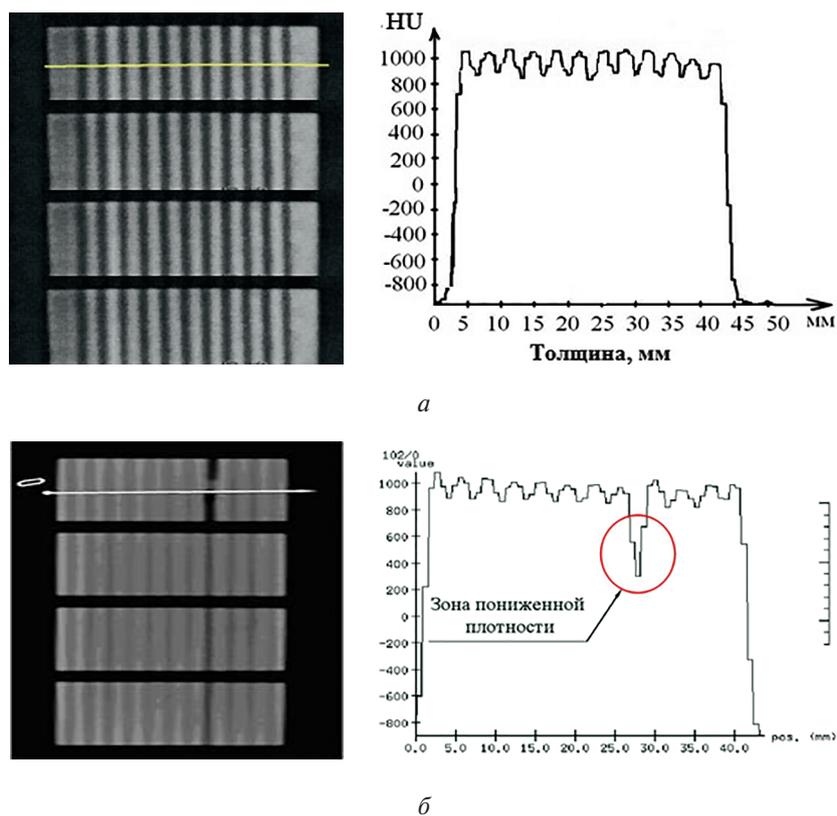


Рис. 3. Томограммы сечений торсиона втулки НВ с расслоением

$HU$  обнаруживать поврежденные области с непроклеями и расслоениями. Внедрение специальных программ обработки позволит автоматизировать поиск дефектных зон дефектных изделий.

#### Алгоритм контроля технического состояния втулки НВ

Обработка результатов томографического контроля втулок несущего винта (ВНВ) – это сложный и трудоемкий процесс. Наряду с визуальным контролем томограмм проводился замер значений  $HU$  для тех сечений, у которых были обнаружены нарушения структуры и расслоения. Отклонения этих значений от нормы могут позволить дать оценку технического состояния ВНВ. Для примера на рис. 4 приведены результаты диагностики исправной и двух забракованных втулок  $HU$ . Слева показаны графики изменения значений ВНВ по толщине втулки, а справа показаны гистограммы, которые показывают процент содержания  $HU$  в исследуемом сечении.

В случае соблюдения всех технологических этапов производства график значений  $HU$  по толщине торсиона имеет прямолинейный вид, так как плотность и содержание связующего должны быть одинаковыми по всему сечению. Для большинства торсионов это условие выполняется и график изменения  $HU$  близок к прямолинейному с некото-

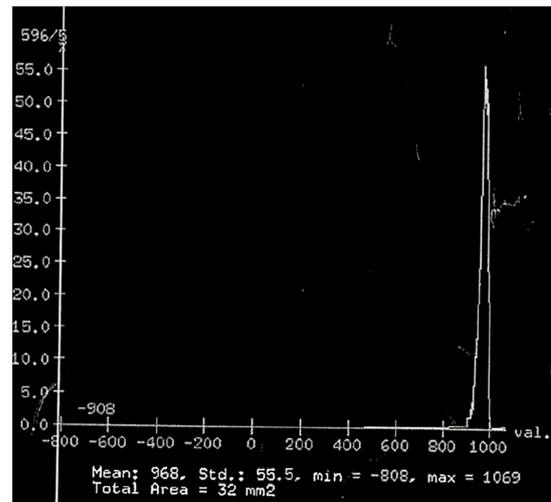
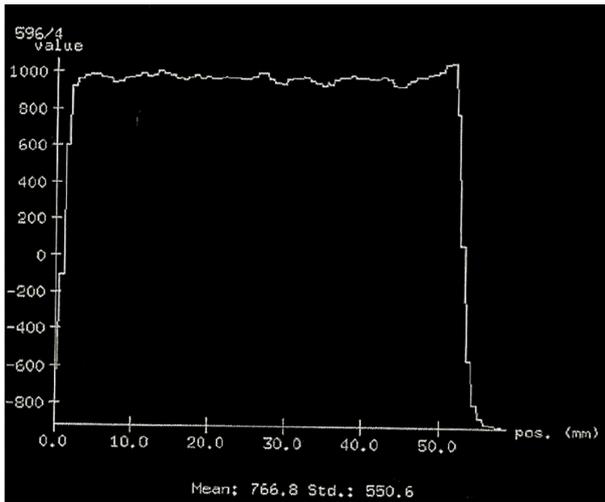
рыми отклонениями (рис. 4,а). Среднее значение составляет  $\approx 1000 HU$ , это соответствует пористости материала  $V_{II} = 2,5\%$ . Величина  $1000 HU$  принята за эталонное значение бездефектного торсиона. Гистограмма показывает около 60% содержания значений  $HU = 1000$ .

У некоторых образцов значения  $HU$  были меньше эталонных. Это наблюдалось для втулки после ресурсных испытаний (рис. 4,б). Структура слоев стеклопластика рыхлая и гистограмма включает значения  $HU$  меньше допустимых. Эталонное значения  $HU = 1000$  составляет всего 12%.

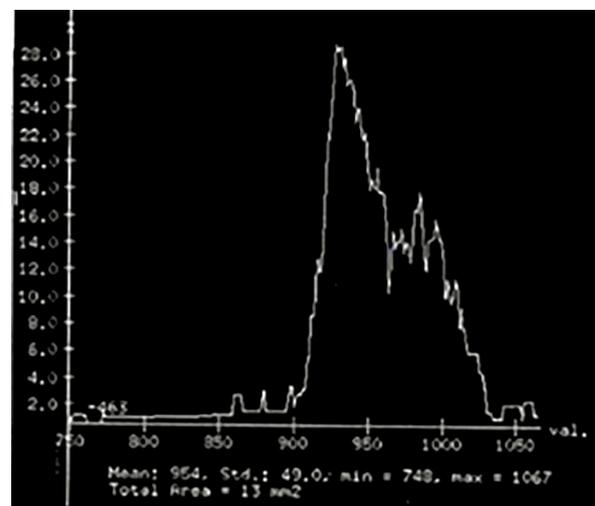
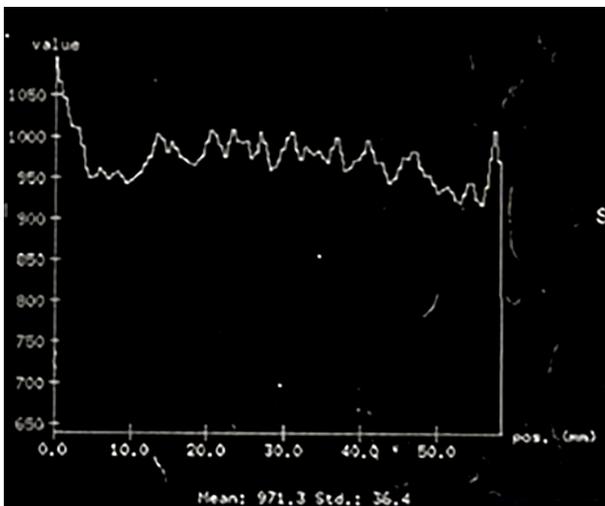
На рис. 4,в показан замер  $HU$  в слоях стеклопластика и резины. Гистограмма содержит в этом случае два основных пика для стеклопластика и для резины. Кроме того, наблюдается пик при значениях  $200-400 HU$ , это дефект расслоения в третьем слое.

При оценке этих результатов встает вопрос о допуске к эксплуатации или отбраковке конструкций, имеющей обнаруженные дефекты.

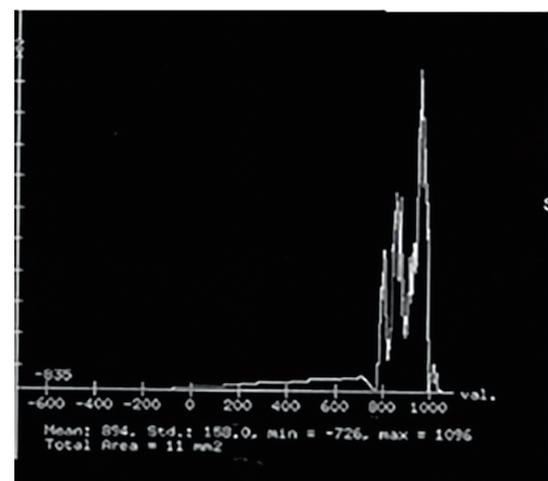
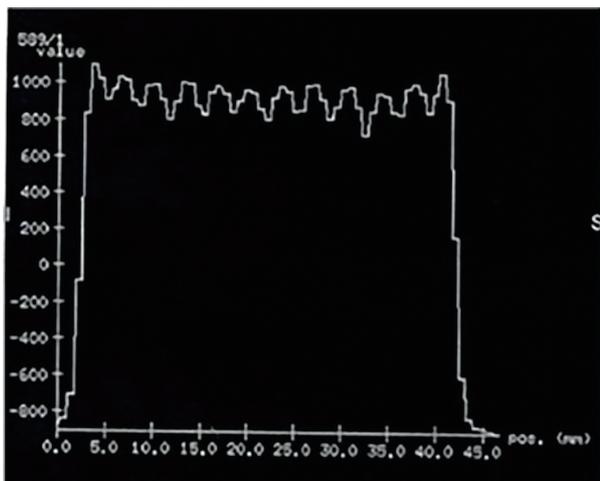
Для оценки допустимых норм дефектов втулки НВ использовался статистический подход, разработанный в исследовании [15], где показано статистическое решение для одного параметра диагностики ( $x$ ). Распределение плотности вероятности диагностического параметра  $x$  для исправного  $D_1$  и дефектного  $D_2$  состояния показано на рис. 5.



a



б



в

Рис. 4. Результаты исследования на СКТ втулок НВ: а – эталонное значение; б – с дефектом в слоях стеклопластика; в – с дефектом в слоях резины

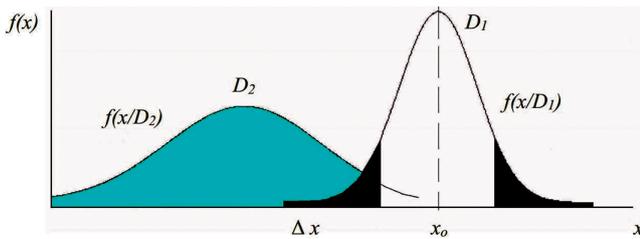


Рис. 5. Статистические распределения плотности вероятности диагностического параметра  $x$  для исправного  $D_1$  и дефектного  $D_2$  состояния

Задача состоит в выборе значения  $x_0$  параметра  $x$  таким образом, что при  $x < x_0$  следует принимать решение о дефектности изделия, а при  $x > x_0$  – допускать дальнейшую его эксплуатацию. Задача состоит в том, чтобы выбор  $x_0$  был в некотором смысле оптимальным.

При исследовании втулок НВ на СКТ в качестве информативного параметра  $x$  принято значение  $HU$ , а в качестве  $f(x)$  использована гистограмма процентного содержания  $HU$ .

Изменение пористости структуры приводит как к улучшению, так и к ухудшению механических характеристик материала, поэтому при диагностике по одному информативному параметру  $x = HU$  область непринятия гипотезы выбираем в зависимости от допускаемой величины снижения механических характеристик и соответствующей этому величины пористости  $V_{\Pi} = 2,5\%$ . Таким образом, сравнивать результаты замеров эталонного и исследуемого торсиона наиболее эффективно при помощи гистограмм, которые показывают процент тех или иных значений  $HU$  в исследуемом сечении торсиона. В качестве примера использования тако-

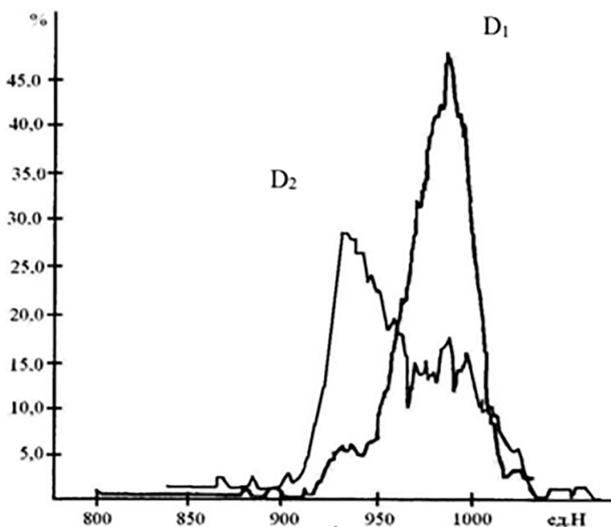


Рис. 6. Сравнение гистограмм бездефектного  $D_1$  и дефектного  $D_2$  торсиона

го подхода на рис. 6 приведены гистограммы значений  $HU$  для эталонного и дефектного торсиона  $D_2$ .

Значения, равные  $1000 HU$ , у бездефектного торсиона составляют  $40\%$ , у дефектного –  $14\%$ , локальный максимум на гистограмме у дефектного торсиона смещен до значения  $925 HU$ , что соответствует высокой пористости  $V_{\Pi} \approx 6,7\%$ , следовательно, торсион должен быть забракован.

При анализе результатов томографических исследований возникают трудности обработки большого объема информации. Поэтому было решено разработать автоматизированный экспресс-тест для оценки наличия дефекта и его локализации в объеме изделия. Процесс диагностики можно упростить, если появится возможность сравнивать полученные результаты с эталонными значениями бездефектных втулок НВ в автоматическом режиме. Диагностику состояния можно проводить по одному информативному параметру, в нашем случае – коэффициенту ослабления рентгеновского излучения в единицах  $HU$ . Используя корреляционные зависимости по значениям  $HU$ , можно определить пористость материала, а затем по этим значениям найти его механические характеристики и сравнить их с паспортными значениями, установленными на предприятии. В случае снижения физико-механических характеристик больше допуска – втулка НВ бракуется.

Данные СКТ принимаются как цифровой прототип реального изделия, который содержит в себе не только информацию о распределении материалов по объему изделия, но и данные о локальных дефектах [16–18]. При этом качество изделий можно контролировать интерактивной системой, чувствительной только к дефектам. Нет необходимости тратить время на оценку безупречных участков, система направляет исследователя прямо к подозрительной области. Под экспресс-тестом будем понимать функцию  $F$ , результатом работы которой является ответ на гипотезу о наличии дефекта. Аргументом функции является распределение чисел Хаунсфилда по объему изделия:

$$F : \{V, HU\} \rightarrow \{0, 1\}; V \in R^3; \quad (4)$$

$$H_0 : F(V) = 1. \quad (5)$$

Тогда гипотезу о наличии дефекта можно сформулировать как

$$H_0 : F(V) = 1. \quad (6)$$

Для локализации дефекта был предложен следующий подход – исследуемый объем может быть представлен как набор подобластей, например сечений

$$V = \bigcup_i S_i \quad (7)$$

с условием на отсутствие пересечений под-  
областей

$$S_i \cap S_j, i \neq j. \quad (8)$$

Тогда для каждого сечения может быть сформу-  
лирована аналогичная гипотеза

$$H_0 : F(S_i) = 1, \quad (9)$$

а набор сечений, где эта гипотеза оказалась  
верна, и будет локализованной областью с  
дефектом.

Для построения определённой ранее функции  
 $F$  было принято использовать гистограммы зна-  
чений  $HU$ . Ввиду наличия локальных неоднород-  
ностей материала, наличия краевых эффектов при  
сканировании КТ даже для однородного образца  
будут наблюдаться флуктуации значений  $HU$ . Но  
получаемое распределение будет распределением  
Гаусса. Тогда в случае композиционного образца  
получаемое распределение, по сути, линейная  
комбинация распределений Гаусса с неизвестными  
коэффициентами

$$f_{\Sigma}(x) = \sum_{i=1}^k \alpha_i f(x, \sigma_i, \mu_i), \quad (10)$$

где  $\alpha_i$  – весовые коэффициенты.

В выражении (10)  $f(x; \sigma, \mu)$  – функция плотности  
нормального распределения

$$f(x, \sigma, \mu) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1x-\mu}{2\sigma^2}}, \quad (11)$$

где  $\sigma$  – среднеквадратическое отклонение,  $\mu$  –  
среднее значение.

На практике весовые коэффициенты  $\alpha_i$ ,  
среднеквадратические отклонения  $\sigma_i$ , среднее  
значение  $\mu_i$  являются неизвестными. Задача  
определения этих неизвестных нетривиальна,  
но при этом определение неизвестных средних  
распределений сводится к задаче определения  
локальных максимумов:

$$\exists U_{\delta}(x_0) : \forall x \in U_{\delta}(x_0) f_{\Sigma}(x). \quad (12)$$

Набор локальных максимумов может быть со-  
бран в некотором векторе  $x_{\text{imax}}$ .

Для проверки нулевой гипотезы был исполь-  
зован метод сравнения. При таком подходе мы  
подразумеваем существование вектора локальных  
максимумов контрольного торсиона (без дефектов)  
 $x^{\text{contrl}}$ . Тогда вследствие измерения для исследуемого  
образца может быть получен вектор локальных мак-  
симумов  $x^{\text{reser}}$ . Функцию  $F$  (4.2) можно определить  
следующим образом:

$$F(V) = \begin{cases} 1, \exists i \frac{|x_i^{\text{contrl}} - x_i^{\text{reser}}|}{x_i^{\text{contrl}}} > p; \\ 0, \forall i \frac{|x_i^{\text{contrl}} - x_i^{\text{reser}}|}{x_i^{\text{contrl}}} \leq p, \end{cases} \quad (13)$$

где  $[p]$  – допустимое значение относительного от-  
клонения.

В практической реализации были использованы  
нормализованные гистограммы. Данные томогра-  
фического исследования можно представить как  
выборку  $X_1, \dots, X_n$  из распределения (4). Количество  
элементов из выборки, попавших в  $i$ -й интервал,  
обозначим как  $n_i$ :

$$n_i \sum_{j=1}^n 1_{[X_j \in (a_{i-1}, a_i)]} = 1, \dots, k. \quad (14)$$

Определим длины интервалов как

$$\Delta a_i = a_i - a_{i-1}, i = 1, \dots, k. \quad (15)$$

Тогда получим нормализованную гистограмму  
 $h(x)$ :

$$h(x) = \frac{n_i}{n\Delta a_i}. \quad (16)$$

Число наилучшего количества интервалов  $n$   
вычисляется эмпирически по правилу Стерджеса:

$$n = 1 + [\log_2 N], \quad (17)$$

где  $N$  – количество наблюдений величины.

Для фильтрации вектора локальных максимумов  
был использован пороговый фильтр:

$$V = \frac{1}{k} - \Theta, \quad (18)$$

где  $\Theta$  – гиперпараметр, подбираемый эмпириче-  
ским путем в зависимости от того, насколько зна-  
чение чистоты маленького пика меньше единицы,  
 $k$  – порядок частот в гистограмме.

Компоненты вектора локальных максимумов  
с отрицательными величинами (15) удалялись из  
рассмотрения.

В результате выстраивается следующий алгоритм  
действий для выявления дефекта в торсионе:

1. Загрузка данных КТ.
2. Построение нормализованной гистограммы.
3. Нахождение локальных максимумов на ги-  
стограмме.
4. Фильтрация шумов в векторах локальных  
максимумов.
5. Анализ локальных максимумов исследуемого  
торсиона и сопоставление их значений  $HU$  со значе-  
ниями  $HU$  частот локальных максимумом контроля.

Главной задачей предлагаемого метода дефектоскопии является нахождение локальных максимумов для исследуемого и идеального торсионов, фильтрация локальных максимумов от шумов и сравнение их между собой.

Разработанный экспресс-тест был апробирован для оценки наличия дефекта втулок НВ по данным томографических исследований, хранящихся в архиве предприятия. При обследовании комлевого участка втулки НВ, состоящего только из слоев стеклопластика наряду с эталонным материалом, у которого  $HU = 1000$ , обнаружены участки с меньшими значениями  $HU$ . На нормализованной гистограмме, где показаны зависимости параметра диагностики  $HU$  и частота появления измеренных значений параметров объекта, четко видна суперпозиция нормальных распределений, выраженных графически двумя «горбами» (рис. 6). Таким образом, в исследуемом объеме наряду с эталонным материалом имеются зоны, у которых есть понижение физико-механических характеристик. Меньший «горб» со значениями  $HU = 850$  соответствует пористости  $V_{II} = 8,35\%$ . При разработке авиационных конструкций важной задачей является оценка влияния расслоения на их прочность [19–20].

При обследовании упругого участка на втулки НВ, где было расслоение между слоями стеклопластика и резины, ставилась задача обнаружения этого дефекта программой. Результаты этих расчетов показаны на рис. 7. Два основных пика относятся к значениям стеклопластика и резины. В случае наличия расслоения в этом объеме имеется участок с пониженной плотностью, состоящий из пустот, заполненных частицами клея и нитей стеклопластика. В этом случае на гистограмме появился еще один пик со значениями 250–300  $HU$  – это показатель наличия. Подобная гистограмма, полученная экспериментально оператором, показана на рис. 8.

По результатам проведенного исследования можно сделать вывод, что с помощью гистограмм единиц  $HU$ , поиска и сравнения локальных максимумов можно обнаружить дефект в исследуемом торсионе и даже локализовать дефект относительно того, в каком из материалов он находится – в связующем или в матрице. В отличие от других методов, такая технология дефектоскопии на основе компьютерной томограммы не требует большой выборки данных дефектных и контрольных изделий для выявления неисправностей в деталях.

### Выводы

Разработан алгоритм идентификации свойств различных материалов при их неразрушающем контроле на компьютерном томографе, для реализации которого проведены эксперименты, статистическая

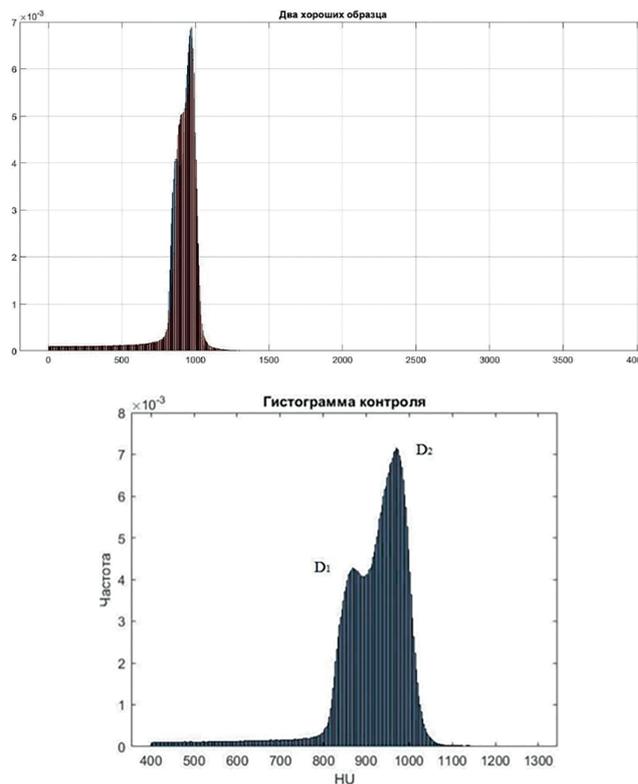


Рис. 7. Расчетные гистограммы контроля

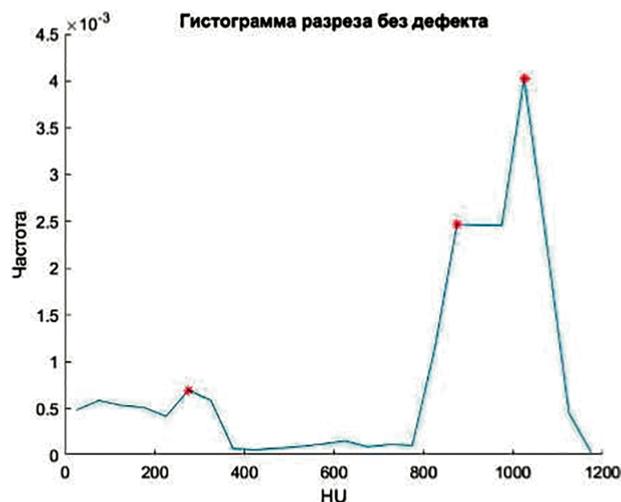


Рис. 8. Расчетная гистограмма для дефектного торсиона

обработка результатов измерений и установлена взаимосвязь между коэффициентами  $HU$  и механическими характеристиками материала.

С целью автоматизации процесса обработки данных компьютерной томограммы была разработана программа для локализации зоны потенциального дефекта рассмотрением частотных гистограмм по срезам, которые в последующем определялись в пространстве: срез – число Хаунсфилда – частота. Полученные гистограммы – это линейная ком-

бинация распределений Гаусса с неизвестными масштабными коэффициентами. Предложен метод интерполяции таких распределений для последующего анализа точек экстремума. Такой подход может сократить количество исследований, заменив их численным моделированием.

#### Список источников

1. Межгосударственный авиационный комитет. Авиационные Правила. Часть 25. Нормы летной годности самолетов транспортной категории. – 6-е издание с поправками 1–9. – М.: Авиаздат, 2020. – 328 с.
2. Kelly A., Zweben C. (eds.) *Comprehensive composite materials*. - Amsterdam: Pergamon, 2000. Chapter 5.10, pp. 227-234. Chapter 5.12, pp. 235-258.
3. Котов П.И., Зинин А.В., Сухов С.В. Практическая механика разрушений Учебное пособие в 2 т. – М: Изд-во МАТИ, 2012. – Т.1, 391 с.
4. ASTM D 2734–09 Standard Test Methods for Void Content of Reinforced Plastics. 2009, 3 p.
5. Schnars U., Henrich R. Applications of NDT Methods on Composite Structures in Aerospace Industry // *e-Journal of Nondestructive Testing*. Vol. 11(12) Conference on Damage in Composite Materials (September 2006; Stuttgart, Germany). URL: <https://www.ndt.net/?id=4180>
6. Бойчук А.С., Чертищев В.Ю., Диков И.А. Изготовление тест-образцов из углепластика с различной пористостью для разработки методик оценки пористости неразрушающим методом // *Труды ВИАМ*. 2017. № 1. С. 92–98. DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-1-11-11
7. Карабутов А.А., Подымова Н.Б., Беляев И.О. Исследование влияния пористости на затухание ультразвука в углепластиковых композитах методом лазерно-ультразвуковой спектроскопии // *Акустический журнал*. 2013. Т. 59. № 6. С. 714-721. DOI:10.7868/S0320791913060099
8. Park J.-W., Kim D.-J., Im K.-H. et al. Ultrasonic Influence of Porosity Level on CFRP Composite Laminates Using Rayleigh Probe Waves // *Acta Mechanica Solida Sinica*. 2008. Vol. 21. No. 4, pp. 298-307. DOI: 10.1007/s10338-008-0834-1
9. Im K.H., Hwang Y.H., Song C.H. et al. On fiber direction and porosity content using ultrasonic pitch-catch technique in CFRP composite solid laminates // 18th International Conference on Composite Materials (21–26 August 2011; Jeju, Korea). URL: <https://iccm-central.org/Proceedings/ICCM18proceedings/papers/Th04-6-AK0992.pdf>
10. Митряйкин В.И., Закиров Р.Х., Беззаметов О.Н., Носов Д.А., Кротова Е.В. Неразрушающий контроль ударных и пулевых повреждений композиционных конструкций // *Вестник Московского авиационного института*. 2023. Т. 30. № 1. С. 227–239. DOI: 10.34759/vst-2023-1-227-239
11. Бойцов Б.В., Васильев С.Л., Громашев А.Г., Юрчексон С.А. Методы неразрушающего контроля, применяемые для конструкций из ПКМ // *Труды МАИ*. 2011. № 49. URL: [https://trudymai.ru/published.php?ID=28061&PAGEN\\_2=2](https://trudymai.ru/published.php?ID=28061&PAGEN_2=2)
12. Ларин А.А. Способы оценки работоспособности изделий из композиционных материалов методом компьютерной томографии: Дисс. ... канд. техн. наук. – М.: МАРТИТ, 2013. – 148 с.
13. Крылов А.А., Москаев В.А. Методика проведения рентгеноскопического контроля и анализа технического состояния элементов конструкции воздушного судна с сотовым наполнителем // *Вестник Московского авиационного института*. 2019. Т. 26. № 2. С. 139–146.
14. Зайцева Т.А., Кротова Е.В., Митряйкин В.И. Результаты исследований плотности и пористости композиционных конструкций с применением спиральной компьютерной томографии // Поиск эффективных решений в процессе создания и реализации научных разработок в российской авиационной и ракетно-космической промышленности: Сб. докладов Международной научно-практической конференции (5–8 августа 2014; Казань). – Казань: Изд-во КГТУ, 2014. Т.1. С. 78–80.
15. Бургер И.А. Техническая диагностика. – Изд. 2-е. – М.: URSS: ЛЕНАНД, сор. 2018. – 238 с.
16. Silva-Henao J.D., Synek A., Pahr D.H., Reisinger A.G. Selection of animal bone surrogate samples for orthopaedic screw testing based on human radius CT-derived bone morphology // *Medical Engineering & Physics*. 2022. Vol. 103: 103786. DOI: 10.1016/j.medengphy.2022.103786
17. Kieser D.C., Kanade S., Waddell J.N. et al. The deer femur – A morphological and biomechanical animal model of the human femur // *Bio-medical Materials and Engineering*. 2014. Vol. 24. No. 4, pp. 1693–1703. DOI: 10.3233/BME-140981
18. Crenshaw T.D., Peo E.R., Lewis A.J., Moser B.D. Bone Strength as a Trait for Assessing Mineralization in Swine: A Critical Review of Techniques Involved // *Journal of Animal Science*. 1980. Vol. 53. No. 3, pp. 827–835. DOI: 10.2527/JAS1981.533827X
19. Imai K. Computed Tomography-Based Finite Element Analysis to Assess Fracture Risk and Osteoporosis Treatment // *World Journal of Experimental Medicine*. 2015. Vol. 5. No. 3, pp. 182–187. DOI: 10.5493/wjem. v5.i3.182
20. Белоусов И.С., Железнов Л.П., Бурнышева Т.В. Моделирование испытаний на сжатие слоистых композитов с дефектами в виде расслоения // *Вестник Московского авиационного института*. 2024. Т. 31. № 1. С. 93–104.

## References

1. *Mezhdgosudarstvennyi aviatsionnyi komitet. Aviatsionnye Pravila. Chast' 25. Normy letnoi godnosti samoletov transportnoi kategorii, 6-e izdanie s popravkami 1-9* (Interstate Aviation Committee. Civil Aviation Safety Regulations. Part 25 – Airworthiness standards: transport category airplanes, 6th edition with amendments 1-9), Moscow, Aviaizdat, 2020, 328 p.
2. Kelly A., Zweben C. (eds.) *Comprehensive composite materials*. Amsterdam, Pergamon, 2000. Chapter 5.10, pp. 227-234. Chapter 5.12, pp. 235-258.
3. Kotov P.I., Zinin A.V., Sukhov S.V. *Prakticheskaya mekhanika razrushenii. V 2 t.* (Practical mechanics of destruction. In 2 vols), Moscow, MATI, 2012. Vol. 1, 391 p.
4. *ASTM D 2734-09 Standard Test Methods for Void Content of Reinforced Plastics*. 2009, 3 p.
5. Schnars U., Henrich R. Applications of NDT Methods on Composite Structures in Aerospace Industry. *e-Journal of Nondestructive Testing. Vol. 11(12) Conference on Damage in Composite Materials (September 2006; Stuttgart, Germany)*. URL: <https://www.ndt.net/?id=4180>
6. Boichuk A.S., Chertishchev V.Yu., Dikov I.A. *Trudy VIAM*, 2017, no. 1, pp. 92-98. DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-1-11-1
7. Karabutov A.A., Podymova N.B., Belyaev I.O. *Akusticheskii zhurnal*, 2013, vol. 59, no. 6, pp. 714-721. DOI:10.7868/S0320791913060099
8. Park J.-W., Kim D.-J., Im K.-H. et al. Ultrasonic Influence of Porosity Level on CFRP Composite Laminates Using Rayleigh Probe Waves. *Acta Mechanica Solida Sinica*, 2008, vol. 21, no. 4, pp. 298-307. DOI: 10.1007/s10338-008-0834-1
9. Im K.H., Hwang Y.H., Song C.H. et al. On fiber direction and porosity content using ultrasonic pitch-catch technique in CFRP composite solid laminates. *18th International Conference on Composite Materials (21-26 August 2011; Jeju, Korea)*. URL: <https://iccm-central.org/Proceedings/ICCM18proceedings/papers/Th04-6-AK0992.pdf>
10. Mitryaikin V.I., Zakirov R.K., Bezzametnov O.N., Nosov D.A., Krotova E.V. Non-destructive testing of shock and bullet damages to composite structures. *Aerospace MAI Journal*, 2023, vol. 30, no. 1, pp. 227-239. DOI: 10.34759/vst-2023-1-227-239
11. Boytsov B.V., Vasilev S.L., Gromachev A.G., Jurgenson S.A. *Trudy MAI*, 2011, no. 49. URL: [https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=28061&PAGEN\\_2=2](https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=28061&PAGEN_2=2)
12. Larin A.A. *Sposoby otsenki rabotosposobnosti izdelii iz kompozitsionnykh materialov metodom komp'yuternoii tomografii* (Methods for performance assessing of products made of composite materials using computed tomography), PhD. thesis, Moscow, MARTIT, 2013, 148 p.
13. Krylov A.A., Moskaev V.A. A technique for fluoroscopic control and analysis of technical condition of aircraft structural elements with honeycomb filler. *Aerospace MAI Journal*, 2019, vol. 26, no. 2, pp. 139-146.
14. Zaitseva T.A., Krotova E.V., Mitryaikin V.I. *Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Poisk effektivnykh reshenii v protsesse sozdaniya i realizatsii nauchnykh razrabotok v rossiiskoi aviatsionnoi i raketno-kosmicheskoi promyshlennosti" (5-8 August 2014; Kazan)*. Kazan, KGTU, 2014, vol. 1, pp. 78-80.
15. Birger I.A. *Tekhnicheskaya diagnostika* (Technical diagnostics). 2nd ed. Moscow, URSS / LENAND, cop. 2018, 238 p.
16. Silva-Henao J.D., Synek A., Pahr D.H., Reisinger A.G. Selection of animal bone surrogate samples for orthopaedic screw testing based on human radius CT-derived bone morphology. *Medical Engineering & Physics*. 2022, vol. 103: 103786. DOI: 10.1016/j.medengphy.2022.103786
17. Kieser D.C., Kanade S., Waddell J.N. et al. The deer femur – A morphological and biomechanical animal model of the human femur. *Bio-medical Materials and Engineering*, 2014, vol. 24, no. 4, pp. 1693–1703. DOI: 10.3233/BME-140981
18. Crenshaw T.D., Peo E.R., Lewis A.J., Moser B.D. Bone Strength as a Trait for Assessing Mineralization in Swine: A Critical Review of Techniques Involved. *Journal of Animal Science*, 1980, vol. 53, no. 3, pp. 827–835. DOI: 10.2527/JAS1981.533827X
19. Imai K. Computed Tomography-Based Finite Element Analysis to Assess Fracture Risk and Osteoporosis Treatment. *World Journal of Experimental Medicine*, 2015, vol. 5, no. 3, pp. 182–187. DOI: 10.5493/wjem. v5.i3.182
20. Belousov I.S., Zheleznov L.P., Burnysheva T.V. Compression Test Simulation of Layered Composites with Delamination. *Aerospace MAI Journal*, 2024, vol. 31, no. 1, pp. 93-104.

Статья поступила в редакцию 13.06.2024; одобрена после рецензирования 16.07.2024; принята к публикации 19.07.2024.  
The article was submitted on 13.06.2024; approved after reviewing on 16.07.2024; accepted for publication on 19.07.2024.