

МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ МАТЕРИАЛОВ, ИЗДЕЛИЙ, ВЕЩЕСТВ И ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ



УДК 678.5.067

DOI:10.30724/1998-9903-2024-26-2-15-31

ПРИМЕНЕНИЕ РЕНТГЕНОВСКОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ КОМПОЗИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ В ЭНЕРГЕТИКЕ

Кротова¹ Е.В., Саченков² О.А., Митряйкин¹ В.И., Зайцева¹ Т.А., Закиров³ Р.Х.

¹Казанский Национальный Исследовательский Технический Университет им. А. Н. Туполева — КАИ, г. Казань, Россия

²Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия

³ГАУЗ «Республиканская клиническая инфекционная больница имени профессора А.Ф.Агафонова», г. Казань, Россия
tanechkaGA@mail.ru

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ В современной России важным условием развития Крайнего Севера и дальневосточных регионов является обеспечение этих регионов электроэнергией. В удаленных районах с повышенным потенциалом ветра, перспективным является использование ветроэнергетических установок, основные конструктивные элементы которых изготавливаются из полимерных композиционных материалов (ПКМ). Наиболее опасным эксплуатационным дефектом ПКМ являются ударные повреждения: из-за ударов града или кусков льда оторвавшихся при обогреве лопастей, а также при ударе молнии. Такие дефекты, трудно обнаруживаемые при визуальном осмотре, могут существенно снижать прочность и ресурс конструкции. На этапах отработки технологии и сертификации конструкции требуется применение современных методов неразрушающего контроля. **ЦЕЛЬ.** Оценить возможности рентгеновской компьютерной томографии для диагностики элементов конструкций из ПКМ с ударным повреждением. **МЕТОДЫ.** После нанесения низкоскоростного удара на фрагменты лопастей ветрогенератора проводится визуальный осмотр и измерение размеров внутренних повреждений на рентгеновском компьютерном томографе Phoenix V |Tome| X. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Исследован характер повреждений, нанесенных с различной энергией удара по наиболее критическим местам фрагментов лопастей аэродинамического профиля и стрингерной панели. Определена глубина и площадь повреждения. Изучен характер и размеры внутренних повреждений с применением рентгеновского компьютерного томографа. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Полученные результаты позволяют оценить с высокой точностью размеры и расположение ударных повреждений, которые можно использовать в прочностных расчетах.

Ключевые слова: лопасти ветрогенераторов; композиционные материал; неразрушающий контроль; рентгеновская компьютерная томография; объект контроля.

Благодарности: Работа, выполнена в рамках соглашения Минобрнауки №075–02–2021–1546 от 22 июня 2021г. в целях реализации мероприятий международного сотрудничества с Российско-Вьетнамским тропическим научно-исследовательским и технологическим центром. 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: Кротова Е.В., Саченков О.А., Митряйкин В.И., Зайцева Т.А., Закиров Р.Х. Применение рентгеновской компьютерной томографии для диагностики

THE USE OF X-RAY COMPUTED TOMOGRAPHY FOR THE DIAGNOSIS OF COMPOSITE STRUCTURES IN THE ENERGY SECTOR

Krotova¹ E.V., Sachenkov² O.A., Krotova¹ E.V., Mitryakin¹ V.I.,
Zaitseva¹ T.A., Zakirov³ R.H.

¹Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev — KAI,
Kazan, Russia

²Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, Russia

³ GAU "Republican Clinical Infectious Diseases Hospital named after Professor
A.F.Agafonov", Kazan, Russia
tanechkaGA@mail.ru

Abstract: *RELEVANCE* In modern Russia, an important condition for the development of the Far North and Far Eastern regions is to provide these regions with electricity. In remote areas with increased wind potential, the use of wind power plants, the main structural elements of which are made of polymer composite materials (PCM), is promising. The most dangerous operational defect of the PCM is shock damage: due to hail strikes or pieces of ice that broke off during heating of the blades, as well as lightning strikes. Such defects, which are difficult to detect during visual inspection, can significantly reduce the strength and service life of the structure. At the stages of technology development and design certification, the use of modern methods of non-destructive testing is required. *PURPOSE.* To evaluate the possibilities of X-ray computed tomography for the diagnosis of structural elements made of PCM with impact damage. *METHODS.* After applying a low-speed impact to fragments of the blades of the wind turbine, a visual inspection and measurement of the size of internal injuries are carried out on a Phoenix V |Tome|X X-ray computed tomograph. *RESULTS* The nature of the damage inflicted with different impact energies on the most critical areas of fragments of the airfoil blades and the stringer panel is investigated. The depth and area of damage have been determined. The nature and size of internal injuries were studied using an X-ray *COMPUTED* tomograph. *conclusion.* The results obtained allow us to estimate with high accuracy the size and location of impact damage, which can be used in strength calculations.

Keywords: blades of wind turbines; composite materials; non-destructive testing; X-ray computed tomography; object of control.

Acknowledgments: The work was carried out within the framework of the agreement of the Ministry of Education and Science No. 075-02-2021-1546 dated June 22, 2021 in order to implement international cooperation activities with the Russian-Vietnamese Tropical Research and Technology Center. The research methodology was developed and implemented with financial support provided to Kazan Federal University under the state assignment in the field of scientific activity, project no. FZSM-2023–0009.

For citation: Krotova E.V., Sachenkov O.A., Krotova E.V., Mitryakin V.I., Zaitseva T.A., Zakirov R.H. The use of X-Ray computed tomography for the diagnosis of composite structures in the energy sector. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2024; 26 (2): 15-31. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-2-15-31.

Введение и литературный обзор (Introduction and Literature Review)

Вопросами развития Крайнего Севера и дальневосточных регионов России со сложными природными условиями уделяется особое внимание. Осуществляются программы развития Дальнего Востока и Северного морского пути, совершенствованию транспортной инфраструктуре, и обеспечению электроэнергией этих регионов [1]. В программе развития «зеленой» энергетики в России на 2025–2035 гг. разработан механизм поддержки производства, генерирующего оборудования на основе

возобновляемых источников электроэнергии (ВИЭ) с целью создания самих генерирующих объектов и полноценного научно-производственного комплекса, связанного с разработкой, внедрением, опытным и серийным производством компонентов энергетического оборудования для ВИЭ, включая ветрогенераторы.

В настоящее время налажено производство различных видов российских ветрогенераторов. Например, в Ульяновской области на заводе «Вестос» создано производство стеклопластиковых лопастей длиной более 60 метров по технологии вакуумной инфузии. Предприятие *Mahaon-energy* производит ветрогенераторы, которые относятся к категории вертикального оборудования. Один из ветрогенераторов «Махаон» показан на рисунке 1, другой тип ветрогенератора производства ЗАО Ветроэнергетической компании показан на рисунке 2.



Рис.1. Ветрогенератор «Махаон»

Fig.1. Wind generator «Mahon»

**Источник: составлено автором*



Рис.2 Ветрогенератор ЗАО «Ветроэнергетическая компания»

Fig.2. Wind turbine generator of CJSC Wind Energy Company

Source: compiled by the author

Лопастей являются наиболее важными элементами ветрогенераторов, они предназначены для создания крутящего момента на валу ветрогенератора, посредством воздействия на лопасть давления, создаваемого ветровым потоком и аэродинамической составляющей. Конструкции лопастей для различных ветрогенераторов отличаются между собой. Внешний корпус лопасти должен иметь аэродинамический профиль. У некоторых лопастей это достигается применением в конструкции лонжерона и обшивки хвостовой секции, внутри которой может быть пенопласт или сотовый наполнитель. Другой тип лопастей пустотелый внутри. Для восприятия осевых усилий растяжения и сжатия устанавливаются специальные профильные элементы силового набора - стрингеры, связанные с обшивкой. Они приформовываются к обшивке образуя Т-образную зону склейки. Такую конструкцию имеет лопасть ЛВТ-Н7 ветрогенератора «Махаон» (рис.1). Крепление этой лопасти осуществляется за счет болтов, вставленных в отверстия с использованием специальных профильных пластин. Лопасти как правило изготавливаются из полимерных композиционных материалов (ПКМ). Применение ПКМ в конструкциях лопастей, электрогенераторов решает ряд задач, связанных с уменьшением массы агрегатов, стойкости к различным погодным и климатическим факторами, которые влияют на ресурс установки. Системный анализ влияния климата на механические свойства ПКМ проведен в работах [2-3].

Зачастую при изготовлении лопасти в качестве армирующего материала применяется стекловолокно, однако в настоящее время идет разработка технологии изготовления данной конструкции из углеродного волокна. Углепластики обладают повышенными эксплуатационными характеристиками, повышенной жесткостью и удельной прочностью. В работе [4] показано, что применение углеволокна в строительстве и конструкции ветровых установок приводит к уменьшению веса конструкции, а также повышается прочность и долговечность электростанций, обеспечивает защиту от обледенения.

Современные технологии производства ПКМ не гарантируют отсутствия в изделиях дефектов, снижающих их качество, что приводит к значительному рассеиванию значений физико-механических характеристик изделий из ПКМ. К технологическим дефектам относятся повышенная пористость, трещины, расслоения. Помимо производственных дефектов в процессе эксплуатации готовых изделий могут

образовываться эксплуатационные дефекты. Наиболее опасным эксплуатационными дефектами ПКМ является ударные повреждения - из-за ударов града или кусков льда оторвавшихся при обогриве лопастей, а также при ударе молнии. Такие дефекты трудно обнаруживаемы при визуальном осмотре, но при этом они могут существенно снижать прочность конструкции [5-8]. Обеспечение качества изделий из ПКМ требует разработки современных методов и средств неразрушающего контроля [9-11].

Для диагностики конструкций из полимерных композиционных материалов применяются следующие методы неразрушающего контроля, созданные на разных физических принципах: акустические методы основаны на взаимодействии с контролируемым изделием упругих колебаний и волн широкого диапазона частот; голографический метод использует формирование голограмм объекта и анализ голографических картин бездефектного и дефектного объекта; тепловые методы основаны на взаимодействии теплового поля объекта с термометрическими чувствительными элементами, преобразовании параметров поля в параметры электрического или другого сигнала и передаче его на регистрирующий прибор; шерография – использует регистрацию интерференционных изображений локальных перемещений поверхности объекта контроля до и после приложения внешнего возмущающего воздействия; радиационные методы основаны на различиях поглощения материалами рентгеновских лучей. Они широко применяются для обнаружения пустот, пористости, инородных включений, дефектов сотовых блоков.

Эти методы имеют свои достоинства и недостатки, главным критерием их применения являются геометрические, конструктивные и другие характеристики конструкции.

Одним из современных методов неразрушающего контроля композитных материалов является рентгеновская компьютерная томография (РКТ) [12-15]. Суть метода заключается в реконструкции отдельного сечения исследуемого объекта по проекционным данным, полученным при просвечивании объекта рентгеновскими лучами в различных направлениях и путем измерения энергии прошедшего излучения вдоль каждого из них. Реконструируемой в плоскости сечения физической величиной является коэффициент ослабления рентгеновского излучения, который зависит от плотности материала и элементов состава материала, более плотные материалы, будут отображаться более яркими участками, а менее плотные будут отображаться более затемненными участками. Таким образом, может быть получено изображение в так называемой серой шкале, где белым будут отображаться наиболее плотные структуры, а черным - структуры, имеющие меньшую плотность.

Цель исследования заключается в оценке возможностей рентгеновской компьютерной томографии для диагностики элементов конструкций ветрогенераторов с эксплуатационными и технологическими дефектами.

Научная значимость исследований заключается в разработке эффективного подхода, позволяющего совместить данные средств неразрушающего контроля (в частности рентгеновской компьютерной томографии (РКТ)) и вычислительные методы оценки напряженно-деформированного состояния. При таком подходе данные РКТ принимаются как цифровой прототип реального изделия, который содержит в себе информацию не только о распределении материала по объему изделия, но и данные о локальных дефектах.

Практическая значимость исследований заключается во внедрении РКТ для анализа состояния конструкций после ударного воздействия на различные области **лопасти**, что позволило точно определить характер повреждений, найти точное их расположение и определить размеры.

Материалы и методы (Materials and methods)

В качестве объекта исследования были выбраны фрагменты лопасти аналогичные по структуре лопастям ветрогенераторов. Первый состоит из лонжерона и хвостовой секции, в которой между двумя стеклопластиковыми обшивками находится сотовый наполнитель (рис.3). Второй фрагмент состоял из углепластиновой обшивки и прикрепленных к ней стрингеров (рис.4).

Для нанесения удара у первого фрагмента были выбраны 4 зоны, схематично представленные на рисунке 3. Первая область удара находится в зоне лонжерона, изготовленного из многослойного стеклопластика; вторая - в зоне соединения обшивки и лонжерона; третья зона находится в средней части в месте обшивки и сотового наполнителя, четвертая – в хвостовике лопасти. Удар по стрингерной панели наносился в зоне подкрепления обшивки стрингером.

Методика ударных испытаний фрагментов лопастей (Рис.2) разрабатывалась в соответствии с требованиями международных стандартов определения стойкости к разрушению при ударных нагрузках (ГОСТ Р 56684–2015, ASTM D7766). Удар наносился с помощью копра *Instron «Dynatup - 9250 HV»* (рис. 5 (а)) наконечником диаметром $d=16$ мм.

Крепление образца осуществлялось механическими прижимами. Общий вид лопасти, установленной в испытательную оснастку, показан на рисунке 5 (б). Для каждой зоны был выбран различный диапазон энергий воздействия, с учетом характера разрушения материала.

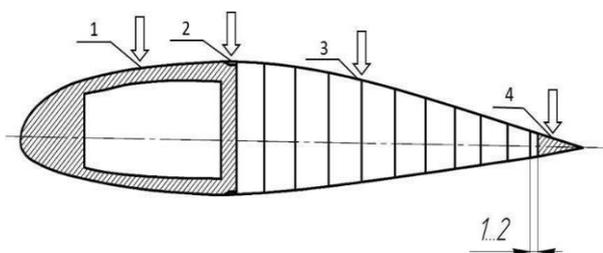


Рис. 3. Фрагмент лопасти

Fig.3. Blade fragment

*Источник: составлено автором

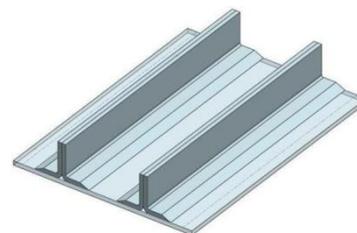


Рис. 4. Стрингерная панель

Fig.4. Stringer panel

Source: compiled by the author

Обработка данных удара производилась при помощи программного обеспечения «IMPULSE». Определялась энергия удара G (Дж) и максимальная ударная нагрузка P_m (Н).



а

Рис.5. а - общий вид ударной установки Instron Dynatup 9250 HV, б - фрагмента лопасти в испытательной оснастке

*Источник: составлено автором.



б

Fig.5. а- general view of Instron Dynatup 9250 HV impactor, б- blade fragment in test fixture

Source: compiled by the author

После нанесения удара проводился визуальный контроль повреждений, а также измерение геометрических их характеристик в каждой зоне. Глубина повреждений δ измерялась микрометром с цифровой индикаторной головкой Mitutoyo ID-C112 с разрешением 0,001 мм (Рис. 6). Измерения площади повреждений S проводилось при помощи анализа графических снимков на специализированном программном обеспечении персонального компьютера Corel DRAW с соблюдением масштаба съемки (Рис.7).



Рис.6. Замер глубины повреждения

Fig.6. Measuring the depth of damage

*Источник: составлено автором.



Рис.7. Нахождение площади повреждения

Fig.7. Finding the area of damage

Source: compiled by the author



Результаты (Results)

В настоящее время для обеспечения безопасной эксплуатации композиционных конструкций с повреждениями сформулирован критерий пороговых характеристик ударного воздействия «размер повреждения – энергия удара». К качеству меры обнаружения повреждений в ПКМ обычно применяется глубина вмятины. Помимо глубины, вмятина характеризуется и другими размерами-длиной, шириной и площадью. На размер и форму дефекта влияет скорость соударения, энергия удара, площадь контактирующей поверхности при ударе и т. д. Для обеспечения безопасной конструкции дефект не должен снижать прочность ниже расчетных значений. Для проведения таких расчетов необходимо знать размеры повреждений, определенных визуально, а для более точной оценки, с применением неразрушающих методов контроля. Далее приведены результаты такой оценки размеров повреждений фрагментов лопастей ветрогенераторов. На рисунках 8–9 показан характер ударных повреждений фрагмента лопасти несущего винта в различных зонах. Визуальный анализ образца показал, что характер повреждения материала различен для каждой зоны нанесения удара. Из визуального анализа видно, что помимо уплотнения материала в месте контакта бойка, вокруг вмятины произошло побеление материала, что говорит о разрыве волокон в ткани.

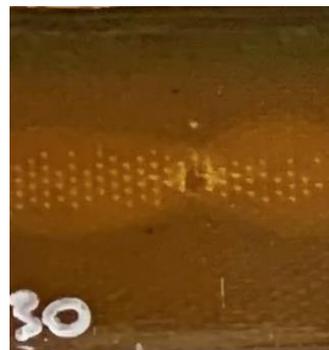
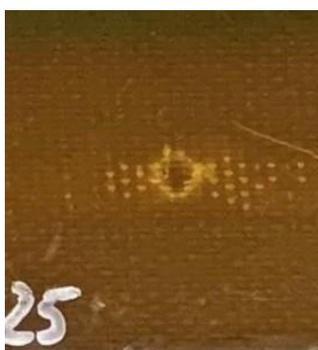


Рис.8. Характер ударных повреждений по фрагменту лопасти в зоне лонжерона при различных энергиях удара

Fig.8. Character of impact damage on the blade fragment in the spar zone at different impact energies

*Источник: составлено автором.

Source: compiled by the author

В таблице 1 представлены результаты измерения глубины вмятины и площадей повреждений зоны лонжерона в зависимости от энергии удара. Аппроксимирующие зависимости, позволяющие оценить влияние энергии удара на размеры повреждений в зоне сот показаны на рисунке 10-11.



Рис. 9. Характер ударных повреждений по фрагменту лопасти в зоне обшивки при различных энергиях удара

*Источник: составлено автором.

Fig.9. Character of impact damage on the blade fragment in the cladding zone at different impact energies

Source: compiled by the author

Таблица 1

Table 1

Результаты измерения глубины вмятины и площадей повреждений зоны лонжерона в зависимости от энергии удара

Results of measuring the dent depth and damage areas of the spar zone depending on the impact energy

Энергия удара, Дж	Глубина вмятины, мм	Площадь повреждения, мм ²	Энергия удара, Дж	Глубина вмятины, мм	Площадь повреждения, мм ²
5	0,049	6,326	30	0,274	251,264
5	0,028	11,556	30	0,304	309,208
10	0,034	25,476	35	0,457	397,924
10	0,052	57,470	35	0,521	435,920
15	0,146	29,258	40	0,312	458,774
15	0,107	31,017	40	0,424	441,328
20	0,154	75,342	45	0,453	435,767
20	0,159	73,590	45	0,368	495,625
25	0,21	120,386	50	0,257	514,145
25	0,164	105,933	50	0,301	537,544

*Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

Не разрушающий контроль образцов с повреждениями проведен методом рентгеновской компьютерной томографии. Данный метод позволяет визуализировать внутреннюю структуру изделий посредством обработки теневых проекций, полученных при рентгеновском просвечивании объекта.

Послойный анализ повреждений проводился с использованием системы промышленной микро- томографии *Phoenix V/Tome/X S240*. Данная система оснащена двумя рентгеновскими трубками – микро- фокусной с максимальным ускоряющим напряжением 240 кВ и мощностью 320 Вт и нанофокусной с максимальным ускоряющим напряжением 180кВ и мощностью 15 Вт. Данная система предназначена для проведения расширенного двухмерного рентгеновского контроля и анализа, проведения двухмерной съемки для формирования 3D-модели, создания объемной 3D-модели для внутренней дефектоскопии, 3D-сканирования внешних и внутренних поверхностей, проведения различных геометрических измерений и анализа.

Принцип действия рентгеновской компьютерной томографии заключается в проведении рентгенографического анализа исследуемого образца, устанавливаемого между рентгеновской трубкой и детектором. Образец просвечивается постоянным рентгеновским излучением с характеристиками, задаваемыми оператором через компьютер. Рентгеновская проекция образца фиксируется цифровым панельным детектором и в реальном времени отображается на экране монитора. Манипулятор имеет возможность перемещения образца, трубки и детектора для обеспечения необходимого положения объекта с оптимальным увеличением. Сбор данных для построения томограмм осуществляется поворотом образца на 360° с заданным шагом с помощью поворотного стола.

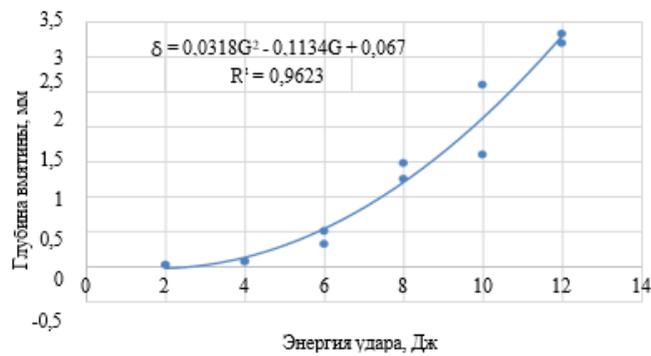


Рис.10. Зависимость глубины повреждения в зоне сот от энергии удара *Fig.10. Dependence of damage depth in the honeycomb zone on impact energy*
 *Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author*

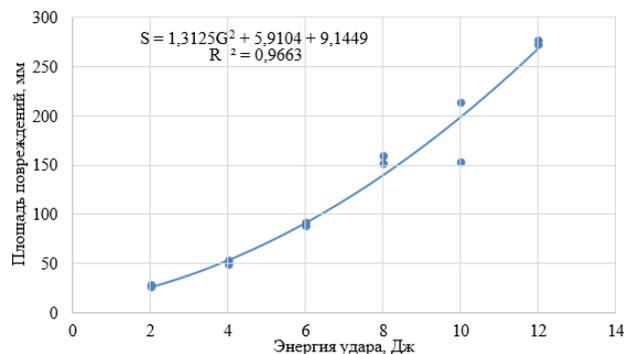


Рис.11. Зависимость площади повреждения в зоне сот от энергии удара *Fig.11. Dependence of the damage area in the honeycomb zone on the impact energy*
 *Источник: составлено автором. *Source: compiled by the author*

Для анализа внутренней структуры и области повреждения фрагмента лопасти методом компьютерной томографии был подготовлен образец, включающий зоны удара каждого представленного типа. На рисунках 12–15 представлены результаты микротомографических исследований фрагмента лопасти в различных зонах. Томограммы повреждений стрингерной панели показано на рисунках 16–17.

В ходе эксперимента на томографе был установлен характер изменения внутреннего пространства по толщине образцов. Полученные данные позволили определить размеры повреждения образца. Размеры визуальной регистрируемой вмятины на поверхности значительно меньше зоны разрушения внутри образца, где наблюдается разрушение волокон, повреждение волокон с расслоениями, расслоения без повреждения волокон. Все эти повреждения изменяют структуру материала, повышают пористость в зоне повреждения, что снижает значения механических характеристик.

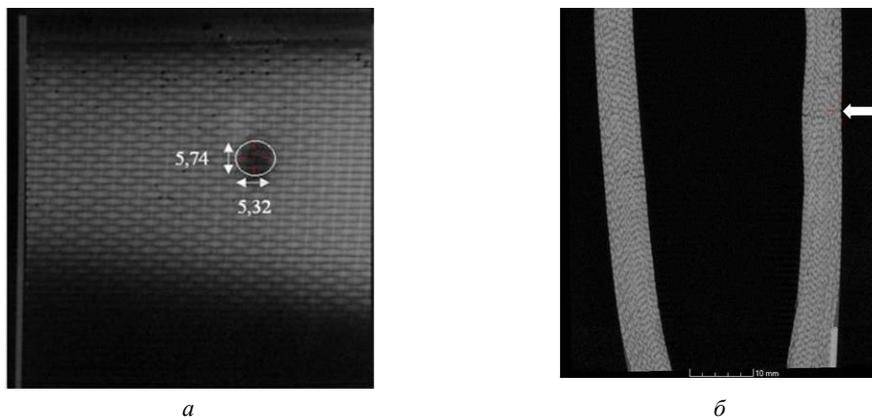
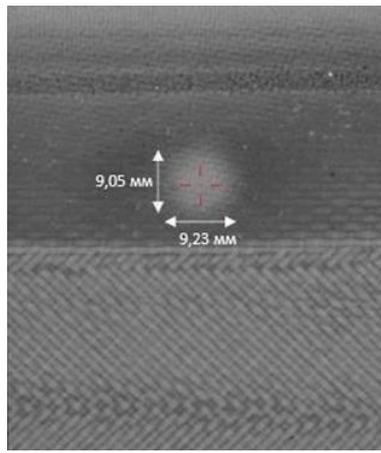
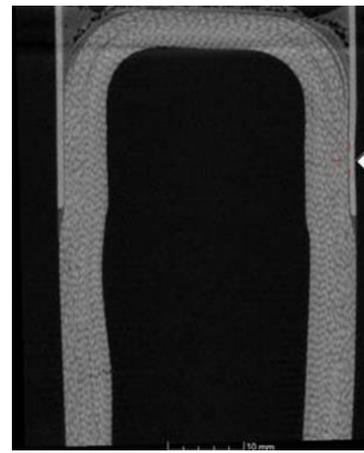


Рис. 12. Томограммы лонжерона в а) продольном *Fig.12 Tomograms of the spar in a) longitudinal section* б) поперечном сечении расстояние от б) *cross-section the distance from the impact surface is* поверхности удара 0,5 мм *0.5 mm*

*Источник: составлено автором *Source: compiled by the author*



а



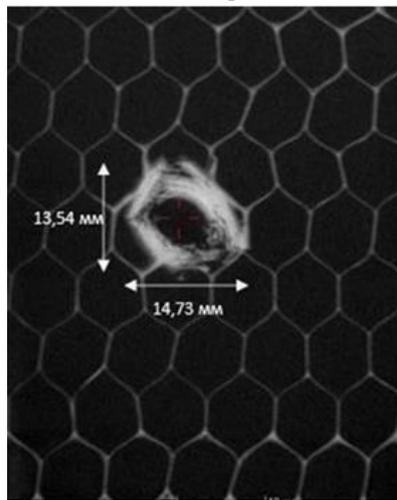
б

Рис.13. Томограммы соединения обшивки и лонжерона в а) продольном сечении б) поперечном сечении расстояние от поверхности удара 1 мм

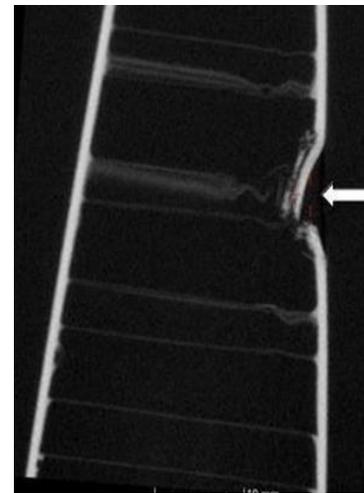
*Источник: составлено автором

Fig.13. Tomograms of the skin and spar connection in a) longitudinal section б) cross-section the distance from the impact surface is 1 mm

Source: compiled by the author



а



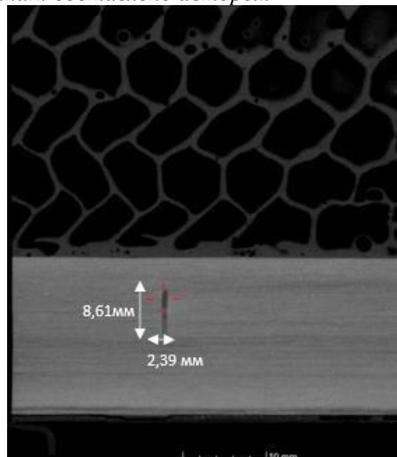
б

Рис. 14. Томограммы места обшивки и сотового заполнителя в а) продольном сечении б) поперечном сечении расстояние от поверхности удара 1 мм

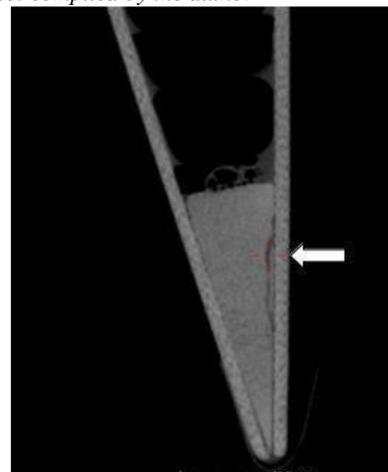
*Источник: составлено автором

Fig.14. Tomograms of the place of cladding and cellular filler in a) longitudinal section б) cross-section the distance from the impact surface is 1 mm

Source: compiled by the author



а



б

Рис. 15. Томограммы хвостика в а) продольном сечении б) поперечном сечении расстояние от поверхности удара 0,8 мм

*Источник: составлено автором

Fig.15. Tomograms of the tail in a) longitudinal section б) cross-section the distance from the impact surface is 0.8 mm

Source: compiled by the author

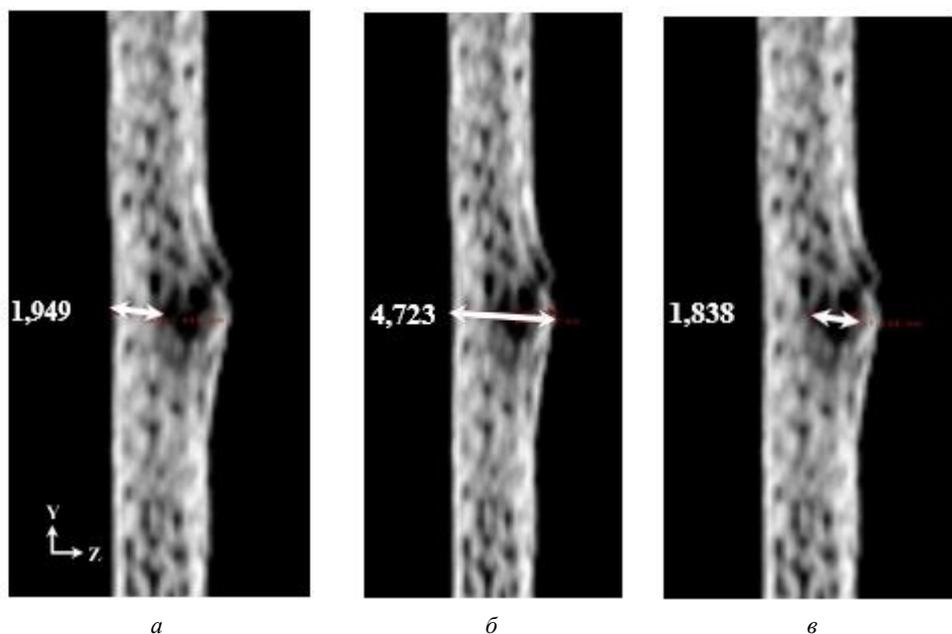


Рис.16. Томограммы повреждений обшивки стрингерной панели

*Источник: составлено автором

Fig.16. Tomograms of damage to the lining of the stringer panel

Source: compiled by the author

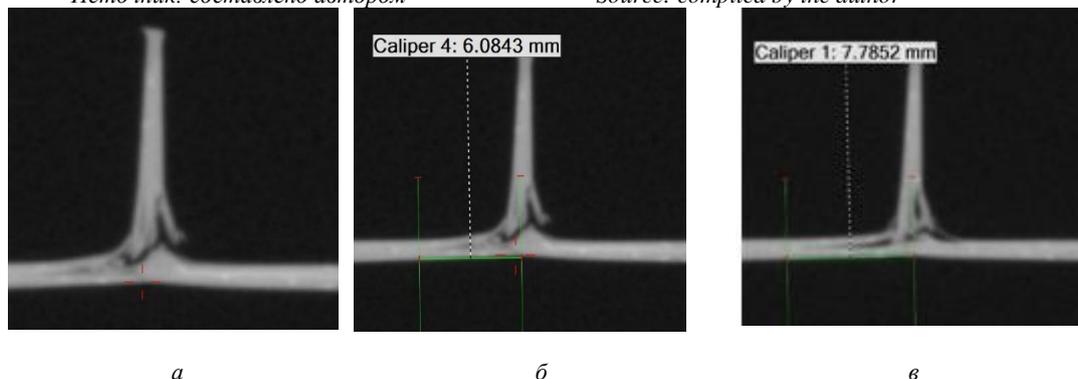


Рис.17. Томограммы повреждений стрингера

*Источник: составлено автором

Fig.17. Tomograms of stringer injuries

Source: compiled by the author

Еще одним объектом исследования было металлокомпозитное соединение подобное креплению лопасти ЛВТ-47 ветрогенератора «Махаон». Оно осуществляется с помощью болта, проходящего в сквозные отверстия обшивки и закрепленного профильными пластинами. На ресурс этого соединения могут влиять технологические дефекты и климатические факторы, которые снижают механические характеристики обшивки.

При экспериментальной отработке новых композиционных материалов в целях определения сопротивления деформированию элементов конструкций с наличием концентраторов напряжений. Проводят испытания образца в виде пластины с отверстием. Пластина одним краем жестко закреплена, на другом крае в отверстие вставлен цилиндрический стержень, к которому приложена нагрузка (рис. 18). При определенной нагрузке P пластина начинает деформироваться-возникает эффект овализации отверстия. При этом происходит смятие пластины или разрушение, если разрушение не наступает ранее. В процессе испытания записывают диаграмму деформирования «напряжение смятия-деформация смятия (овализация отверстия)» (рис. 19). Диаграмма деформирования является характеристикой материала в составе конструкции и характеризует сопротивляемость материала воздействию нагрузок в зоне концентраторов напряжений, главным образом соединительных элементов конструкций.

Наряду с визуальным контролем внутренних дефектов, композитных конструкций, рентгеновская компьютерная томография позволяет проводить количественную оценку структуры материала. При обследовании объекта создается 3D модель образца со значениями коэффициента ослабления рентгеновского излучения μ , который зависит от плотности материала.

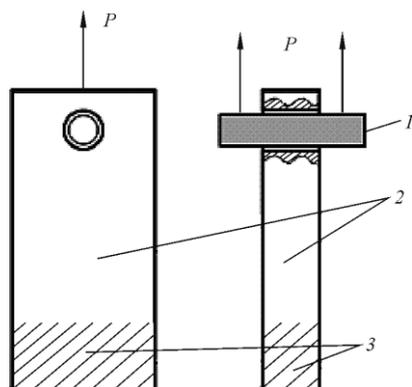


Рис.18. Схема проведения испытания и вид образца при испытании на смятие

Fig.18. The scheme of the test and the type of sample during the crumple test

**Источник: составлено автором*



Рис.19. Испытание образцов

Fig.19. Testing of samples

Source: compiled by the author

В свою очередь линейное ослабление изучаемого материала удобно нормировать относительно коэффициента ослабления дистиллированной воды и воздуха. Такая нормировка называется шкалой Хаунсфильда (HU). Значение HU для исследуемого материала вычисляется по известному выражению:

$$HU = 1000 \frac{\mu_x - \mu_W}{\mu_W - \mu_A}, \quad (1)$$

где μ_W - линейный коэффициент ослабления воды; μ_A - линейный коэффициент ослабления воздуха; μ_x - линейный коэффициент ослабления исследуемого материала в заданной точке x .

При отображении данных КТ чаще всего величины шкалы Хаунсфильда в точке отображают градиентом серого. Из множества эмпирических исследований были выявлены некоторые зависимости между числами Хаунсфильда и оптической плотностью, упругими константами, предельным напряжением. Данные зависимости можно в общем виде можно записать следующим образом [16]:

$$\rho = a_\rho + b_\rho HU, \quad (2)$$

$$E = a_E \rho^{b_E}, \quad (3)$$

$$\sigma_{кр} = a_\sigma \rho^{b_\sigma} \quad (4)$$

где коэффициенты a , b с соответствующими индексами определяется из эксперимента, ρ -плотность, E -модуль упругости, $\sigma_{кр}$ -предел прочности при сжатии.

Зависимость (2) устанавливает линейную связь оптической и физической плотностей. В то время как зависимости (3), (4) экспоненциально связывают модуль Юнга материала и его локальную прочность с физической плотностью. Таким образом, данные томографии позволяют определить распределение механических свойств материала по объему изделия. А это позволяет использовать данные КТ в роли цифрового двойника вычислительной модели [17,18]. Классические подходы подразумевают сегментацию данных КТ и последующее восстановление тел [18,19], после чего строится численная модель, чаще всего на основе метода конечных элементов [20]. Численная модель позволяет оценить напряженно-деформированное состояние с учетом данных КТ. Но процесс восстановления тел по данным томографии является трудоемким и наиболее протяженным по времени. Непосредственное же сравнение значений HU для эталонного и исследуемого образца позволяет сделать выводы о наличии или отсутствии дефектов [21]. Трудоемкость этого процесса можно снизить, если использовать данные распределений чисел Хаунсфильда

по объему томографии. Тогда, при помощи, гистограмм, можно выявлять отклонения исследуемого образца от эталонного.

Так, при испытании партии пластин с отверстиями углепластика на смятие (рис 19) было обнаружено снижение прочностных характеристик у отдельных образцов. Проверка неразрушенных образцов на рентгеновском компьютерном томографе Gender CB-500 (США) показала нарушение внутренней структуры у некоторых образцов. Результаты такого контроля показаны на рисунке 20.

На рисунке 20 слева приведена гистограмма распределения значений HU в материале. На гистограмме явным образом выделяются два пика, каждый из которых отвечает за материал определенной плотности. Большой пик соответствует средним значениям равным 400 HU, что соответствует эталонным значениям для данного материала. Второй пик со значениями 200 HU показывает, что часть материала в пластине имеет пониженную плотность, эти значения можно трактовать как наличие дефекта. Визуальный контроль томограмм показал, что области с пониженной плотностью расположены по бокам отверстия (Рис.20). Найденные значения HU были по формулам (2) и (3) пересчитаны в модули Юнга для эталонного E_1 , и дефектного материала E_2 .

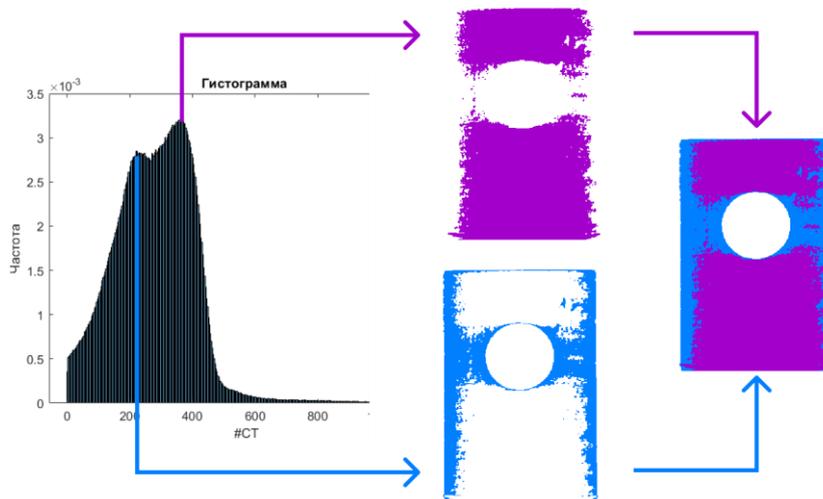


Рис.20.Результаты диагностики образца на рентгеновском компьютерном томографе

Fig.20. The results of the diagnosis of the sample on an X-ray computed tomograph

*Источник: составлено автором

Source: compiled by the author

Затем, была построена численная параметрическая модель образца. Задача решалась при помощи метода конечных элементов в программе Ansys, для вычислений использовался восьми узловой конечный элемент с квадратичной аппроксимацией в плосконапряженной постановке.

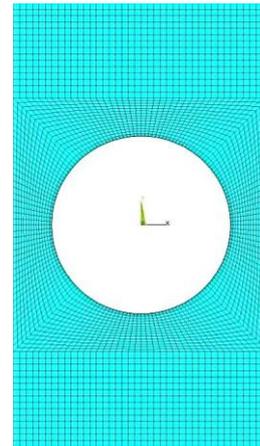
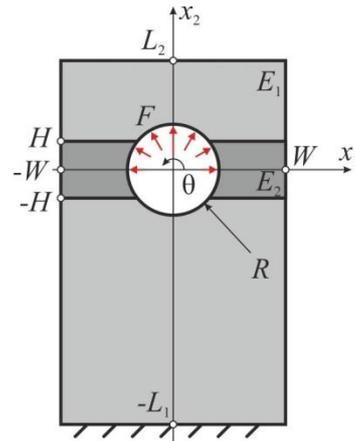
Очевидно, что влияние на несущую способность изделия влияет и геометрия распределения плотностей. Из технологических соображений в первом приближении можно предположить, что область дефекта представляет собой полосу (выделено темным цветом на рис. 21) шириной $2H$. В расчетах нижний торец жестко закреплялся, а к верхней полуокружности выреза прикладывалась нагрузка. Расчетная схема напряжения пластины и расчетная сетка в области отверстия показаны на рисунке 21.

После определения поля напряжений по формулам (2), (4) рассчитывались предельные напряжения, и производился пересчет результатов в коэффициенты запаса прочности. Распределенные коэффициенты запаса прочности в эталонной и дефектной пластине показаны на рисунке 22.

Наибольшие значения коэффициента запаса прочности были локализованы по краям отверстия, что согласуется с известным решением. В случае наличия неоднородности локализация максимальных напряжений сохраняется, но растет величина коэффициентов запаса прочности.

Так, численные результаты позволили показать, что снижение оптической плотности на 10% при относительной толщине полосы с дефектом в 10% в области выреза повышают величину коэффициента запаса с 0,9 до 1,1. Но при увеличении ширины полосы с дефектом коэффициент запаса начинает снижаться, когда ширина становится соизмерима

с диаметром отверстия. Что может быть объяснено, тем, что в области отверстия материал становится однородным, но с другими свойствами.



а

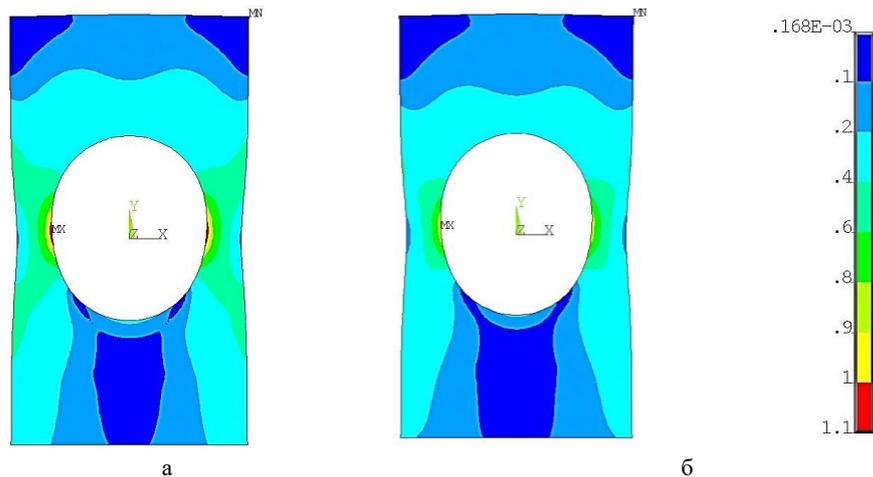
б

Рис.21 Расчетная схема нагружения пластины с:
а) круговым вырезом, б) расчетная сетка в области
выреза

Fig.21. Calculation scheme of plate loading
with: а) circular cutout, б) the calculated grid
in the cutout area

*Источник: составлено автором

Source: compiled by the author



а

б

Рис.22. Картинка распределения коэффициента
запаса прочности: а) дефектная пластина, б)
эталонная пластина

Fig.22. A picture of the distribution of the safety
factor: а) defective plate, б) reference plate

*Источник: составлено автором

Source: compiled by the author

Поэтому можно отметить, что с точки зрения несущей способности опасными становятся случаи, когда дефект по ширине порядка 20% диаметра отверстия, так как тогда концентрация напряжений от внешней нагрузки суммируется с концентрацией напряжений от локального снижения механических свойств материала.

Заключение (Conclusions)

В работе показаны возможности РКТ для неразрушающего контроля различных композиционных деталей ветрогенераторов на этапах обработки и сертификационных испытаниях конструктивно-подобных образцов. Проведено нанесение ударных повреждений на фрагменты лопастей ветрогенераторов, с использованием ударного стенда. С применением рентгеновской компьютерной томографии изучен характер повреждений, установлена взаимосвязь между размерами разрушений и энергией удара, установлены размеры (границы) повреждений при визуальном и неразрушающем контроле. Полученные результаты можно использовать при проведении прочностных расчетных конструкций с повреждениями и при разработке технологических решений по оперативному ремонту. Рассмотрена задача об оценке прочности элемента крепления лопасти ветрогенератора состоящего из пластины с отверстием и металлического стержня, к которому прикладывалась нагрузка, растягивающая пластину через отверстие. Предварительно, перед

испытанием на растяжение пластина была исследована на рентгеновском компьютерном томографе и у нее было обнаружено наличие зон с пониженной плотностью.

Применено программное обеспечение, позволяющее автоматизировать процесс обнаружения дефектов путем анализа результатов измерений коэффициентов ослабления рентгеновского облучения. С использованием известных эмпирических соотношений установлена взаимосвязь между коэффициентами ослабления и механическими характеристиками материала. Проведен расчет напряженно-деформированного состояния пластин с найденными повреждениями. Такой подход позволяет прогнозировать прочность конструкций на этапе ее контроля на РКТ.

Литература

1. Национальная программа развития Дальнего Востока: Распоряжение Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2020 года № 2464-р. URL: <http://www.government.ru/docs/40487>.
2. Каблов Е.Н., Старцев В.О. Системный анализ влияния климата на механические свойства полимерных композиционных материалов по данным отечественных и зарубежных источников//Авиационные материалы и технологии.2018. №2 (51).С.47-50.
3. Евдокимов А.А., Петрова А.П., Павловский К.А., Гуляев И.Н. Влияние климатического старения на свойства ПКМ на основе эпоксибисфенола А/эпоксиакрилового связующего. Труды ВИАМ, №3(97) 2021, с.128-131.
4. Г.Э.Окольникова, Д.А.Бронников, Н.И.Щедрин. Использование углеродного волокна в конструкциях ветровых электростанций. -Системные технологии. - 2018.-№27.-С.60-63.
5. Victor I. Mityaykin; Tatiana A. Zaitseva; Oleg N. Bezzametov; Mikhail E. Kuznetsov. Effect of Impact Damages on the Strength of Wind Turbine Blade. 023 5th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE) | 979-8-3503-9952-3/23/\$31.00 ©2023 IEEE | DOI: 10.1109/REEPE57272.2023.10086749
6. K.T.Tan, N.Watanabe, Y.Iwahori. Finite element model for compression after impact behavior of stitched composites/Composites. Part B: engineering Vol.79. 2015, pp 53-60.
7. Mocanu C., Pohilca A., Moise L., Tudose D. Comparative Studies on the Behaviour of Flat Panels Made of GRP Under Static and Dynamic Loads. Materiale Plastice, 2021, Vol. 58, No. 4, pp. 222-237. doi: 10.37358/MP.21.4.5548
8. Zhang Y., Zheng J., Shen F., Han W., Munstermann S., Shou H., Liu Q. Analysis of local stress/strain fields in an HPDC AM60 plate containing pores with various characteristics. Engineering Failure Analysis. 2021, Vol. 127, pp. 105503. doi: 10.1016/j.engfailanal.2021.105503
9. Котовщиков И.О. Современные мобильные системы неразрушающего контроля изделий из композитных материалов// Композитный мир.2018, №6 (81), с.54-56.
10. Шулайкин А.Ю, Попов М.А., Ковалев В.А., Иванов А.В., Артамонов Ю.С, Шурыгин А.Е. Современные методы диагностики объектов из композиционных материалов// Современная техника и технологии. 2016. №4.
11. Celko L., Gutierrez-Cano V., Casas-Luna M., Matula J., Oliver-Urrutia C., Remesova M., Dvorak K., Zikmund T., Kaiser J., Montufar E.B. Characterization of porosity and hollow defects in ceramic objects built by extrusion additive manufacturing. Additive Manufacturing, 2021, No. 47, pp. 1-12. doi: 10.1016/j.addma.2021.102272
12. Вайберг Э.И. Контроль изделий из композиционных материалов методом рентгеновской вычислительной томографии- Дефектоскопия, 1984, №10, с.32-35.
13. Sneha Samal, Mareeta Kolinova, Hubert Rahier, Giovanni Dal Poggetto and Ignazio Blanco Investigation of the Internal Structure of Fiber Reinforced Geopolymer Composite under Mechanical Impact:A Micro Computed Tomography Study//Applied Sciences. Vol.9. Issue 3.2019.p.516.
14. Герасимов О. В., Рахматулин Р.Р., Балтина Т.В., Саченков О.А. Определение напряженно-деформированного состояния костей по данным компьютерной томографии // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2023. № 8 (761). С. 3–15.
15. Акифьев К.Н., Стаценко Е. О., Смирнова В. В., Харин Н.В., Большаков П.В., Саченков О.А. Методика исследования пористости образцов с жидкостью рентгеновским компьютерным томографом при одноосном сжатии // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2023. № 2. С. 11–21.
16. Компьютерный томографический контроль механических характеристик композитных и биологических материалов на основе метода аналогии плотностей по шкале Хаунсфилда: диссертация ... кандидата технических наук: 05.11.13 / Зайцева Татьяна Александровна; [Место защиты: ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева - КАИ»]. - Казань, 2020. - 139 с.: ил.
17. Саченков О. А., Герасимов О. В., Королева Е. В., Мухин Д. А., Яикова В.В., Ахтямов И.Ф.,

Шакирова Ф.В., Коробейникова Д.А., Чжи К.К. Построение неоднородной конечно-элементной модели по данным компьютерной томографии. Российский журнал биомеханики, 2018, Т.22, №3, с.290-302, doi: 10.15593/RJBiomeh/2018.3.05.

18. Silva-Henaо J., 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. Med. Eng. Phys., 2022, vol. 103, pp. 103786. DOI: 10.1016/j.medengphy.2022.103786

19. Kieser D.C., Kanade S., Waddell N.J., Kieser J.A., Theis J.-C., Swain M.V. The deer femur — A morphological and biomechanical animal model of the human femur. Biomed. Mater. Eng., 2014, vol. 24, no. 4, pp. 1693–1703, doi: 10.3233/BME-140981

20. Imai K. Computed Tomography-Based Finite Element Analysis to Assess Fracture Risk and Osteoporosis Treatment. Wjgem, 2015, vol. 5 (3), pp. 182–187, doi: 10.5493/wjgem.v5.i3.182

21. Crenshaw T.D., Peo Jr.E.R., Lewis A.J., Moser B.D. Bone Strength as a Trait for Assessing Mineralization in Swine: A Critical Review of Techniques Involved. J. Ani Sci., 1981, vol. 53 (3), pp. 827–835, doi: 10.2527/JAS1981.533827X.

Авторы публикации

Кротова Екатерина Викторовна – ведущий специалист КНИТУ-КАИ, Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева–КАИ (КНИТУ-КАИ им.А.Н.Туполева). e-mail: kati_mit@mail.ru.

Саченков Оскар Александрович – канд.физ.-мат.наук, доцент, заведующий кафедрой «Компьютерной математики и информатики» (КМиИ). Институт математики и механики им. Н.И. Лобачевского Казанского (Приволжского) федерального университета (КФ(П)У). ORCID (0000-0002-8554-2938). e-mail: 4works@bk.ru.

Митряйкин Виктор Иванович – д-р.техн. наук, профессор, профессор кафедры «Машиноведения и инженерной графики» (МиИГ). Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева–КАИ (КНИТУ-КАИ им.А.Н.Туполева). ORCID: 0000-0003-4640-5137. e-mail: vmitryaykin@bk.ru.

Зайцева Татьяна Александровна – канд.техн.наук, доцент кафедры «Машиноведения и инженерной графики» (МиИГ). Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева–КАИ (КНИТУ-КАИ им.А.Н.Туполева). ORCID: 0000-0001-7836-4996. e-mail: tanechkaGA@mail.ru

Закиров Рустэм Хайдарович – заведующий отделением, врач-рентгенолог ГАУЗ «Республиканская клиническая инфекционная больница имени профессора А.Ф.Агафонова» г. Казань, e-mail: metsur@ya.ru

References

1. The National Program for the Development of the Far East: Decree of the Government of the Russian Federation No. 2464-p dated September 24, 2020 URL: <http://www.government.ru/docs/40487>.

2. Kablov E.N., Startsev V.O. System analysis of the influence of climate on the mechanical properties of polymer composite materials according to domestic and foreign sources//Aviation materials and technologies.2018. No.2 (51).pp.47-50.

3.Evdokimov A.A., Petrova A.P., Pavlovsky K.A., Gulyaev I.N. The influence of climatic aging on the properties of PCM based on an epoxy/vinyl ether binder. Proceedings of VIAM, No.3(97) 2021, pp.128-131.

4. G.E.Okolnikova, D.A.Bronnikov, N.I.Shchedrin. The use of carbon fiber in wind farm structures. - System technologies. - 2018.-No.27.-pp.60-63.

5.Victor I. Mitryaykin; Tatiana A. Zaitseva; Oleg N. Bezzametov; Mikhail E. Kuznetsov. Effect of Impact Damages on the Strength of Wind Turbine Blade. 023 5th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE) | 979-8-3503-9952-3/23/\$31.00 ©2023 IEEE | DOI: 10.1109/REEPE57272.2023.10086749

6.K.T.Tan, N.Watanabe, Y.Iwahori. Finite element model for compression after impact behavior of stitched composires/Composites. Part B: engineering Vol.79. 2015, pp 53-60.

7.Mocanu C., Pohilca A., Moise L., Tudose D. Comparative Studies on the Behaviour of Flat Panels

Made of GRP Under Static and Dynamic Loads. *Materiale Plactice*, 2021, Vol. 58, No. 4, pp. 222-237. doi: 10.37358/MP.21.4.5548

8. Zhang Y., Zheng J., Shen F., Han W., Munstermann S., Shou H., Liu Q. Analysis of local stress/strain fields in an HPDC AM60 plate containing pores with various characteristics. *Engineering Failure Analysis*. 2021, Vol. 127, pp. 105503. doi: 10.1016/j.engfailanal.2021.105503

9. Kotovshchikov I.O. Modern mobile systems of non-destructive testing of products made of composite materials// *Composite World*. 2018, No.6 (81), pp.54-56.

10. Shulaykin A.Yu., Popov M.A., Kovalev V.A., Ivanov A.V., Artamonov Yu.S., Shurygin A.E. Modern methods of diagnostics of objects made of composite materials// *Modern equipment and technologies*. 2016. №4.

11. Celko L., Gutierrez-Cano V., Casas-Luna M., Matula J., Oliver-Urrutia C., Remesova M., Dvorak K., Zikmund T., Kaiser J., Montufar E.B. Characterization of porosity and hollow defects in ceramic objects built by extrusion additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 2021, No. 47, pp. 1-12. doi: 10.1016/j.addma.2021.102272

12. Vayberg E.I. Control of products made of composite materials by X-ray computed tomography-Flaw detection, 1984, No. 10, pp.32-35.

13. Sneha Samal, Mareeta Kolinova, Hubert Rahier, Giovanni Dal Poggetto and Ignazio Blanco Investigation of the Internal Structure of Fiber Reinforced Geopolymer Composite under Mechanical Impact: A Micro Computed Tomography Study// *Applied Sciences*. Vol.9. Issue 3.2019.p.516.

14. Gerasimov O. V., Rakhmatulin R.R., Baltina T.V., Sachenkov O.A. Determination of the stress-strain state of bones according to computed tomography data // *Izvestia of Higher educational institutions. Mechanical engineering*. 2023. No. 8 (761). pp. 3-15.

15. Akifyev K.N., Statsenko E. O., Smirnova V. V., Kharin N.V., Bolshakov P.V., Sachenkov O.A. Methodology for studying porosity of samples with liquid with an X-ray computed tomograph under uniaxial compression // *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Mechanics*. 2023. No. 2. pp. 11-21.

16. Computer tomographic control of the mechanical characteristics of composite and biological materials based on the Hounsfield scale density analogy method: dissertation... Candidate of Technical Sciences: 05.11.13 / Zaitseva Tatyana Alexandrovna; [Place of defense: Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev - KAI]. - Kazan, 2020. - 139 p.: ill.

17. Sachenkov O. A., Gerasimov O. V., Koroleva E. V., Mukhin D. A., Yaikova V.V., Akhtyamov I.F., Shakirova F.V., Korobeynikova D.A., Zhi K.K. Construction of an inhomogeneous finite element model based on computed tomography data. *Russian Journal of Biomechanics*, 2018, vol. 22, No.3, pp.290-302., doi: 10.15593/RJBiomeh/2018.3.05.

18. Silva-Henao J., 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. *Med. Eng. Phys.*, 2022, vol. 103, pp. 103786. DOI: 10.1016/j.medengphy.2022.103786

19. Kieser D.C., Kanade S., Waddell N.J., Kieser J.A., Theis J.-C., Swain M.V. The deer femur — A morphological and biomechanical animal model of the human femur. *Biomed. Mater. Eng.*, 2014, vol. 24, no. 4, pp. 1693–1703, doi: 10.3233/BME-140981

20. Imai K. Computed Tomography-Based Finite Element Analysis to Assess Fracture Risk and Osteoporosis Treatment. *Wjgem*, 2015, vol. 5 (3), pp. 182–187, doi: 10.5493/wjem. v5.i3.182

21. Crenshaw T.D., Peo Jr.E.R., Lewis A.J., Moser B.D. Bone Strength as a Trait for Assessing Mineralization in Swine: A Critical Review of Techniques Involved. *J. Ani Sci.*, 1981, vol. 53 (3), pp. 827–835, doi: 10.2527/JAS1981.533827X.

Authors of the publication

Krotova Ekaterina Viktorovna- Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev — KAI, Kazan, Russia. *e-mail*: kati_mit@mail.ru

Sachenkov Oscar Alexandrovich-Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, Russia. *ORCID* (0000-0002-8554-2938). *e-mail*: 4works@bk.ru.

Mitryakin Viktor Ivanovich - Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev — KAI, Kazan, Russia. *ORCID*: 0000-0003-4640-5137. *e-mail*: vmitryaykin@bk.ru.

Zaitseva Tatyana Alexandrovna - Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev — KAI, Kazan, Russia. *ORCID: 0000-0001-7836-4996. e-mail: tanechkaGA@mail.ru.*

Zakirov Rustem Haidarovich - GAU "Republican Clinical Infectious Diseases Hospital named after Professor A.F.Agafonov", Kazan, Russia. *e-mail: metsur@ya.ru*

Шифр научной специальности: 2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды (технические науки)

Получено **31.01.2024 г.**

Отредактировано **07.02.2024 г.**

Принято **12.03.2024 г.**