

Труды МАИ. 2025. № 143
Trudy MAI. 2025. No. 143. (In Russ.)

Научная статья
УДК 531.7.08, 620.186.14
URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=185638>
EDN: <https://www.elibrary.ru/MUEJGV>

ОБ УСТРОЙСТВЕ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО СЖАТИЯ ОБРАЗЦОВ СОВМЕСТНО СО СЪЕМКОЙ РЕНТГЕНОВСКИМ КОМПЬЮТЕРНЫМ ТОМОГРАФОМ

Никита Вячеславович Харин

Казанский (Приволжский) федеральный университет,

Казань, Россия

nik1314@mail.ru

Аннотация. Современные методы неразрушающего контроля широко применяются для анализа структуры материалов. Наиболее информативным подходом остается рентгеновская компьютерная томография. Несмотря на преимущества, рентгеновский компьютерный томограф имеет ограничения: невозможность сканирования высокоплотных материалов из-за артефактов, а также отсутствие решений для исследования внутренних изменений в реальном времени под внешней нагрузкой. Существующие установки для механических испытаний в сочетании с РКТ обладают рядом недостатков. В данной работе предложена автоматизированная оснастка для испытаний на сжатие, интегрируемая с РКТ.

Ключевые слова: рентгеновская компьютерная томография, автоматизированная оснастка, неоднородные структуры

Финансирование: исследование выполнено при финансовой поддержке, выделяемой Казанскому федеральному университету по государственному заданию в сфере научной деятельности, проект № FZSM-2023-0009.

Для цитирования: Харин. Н.В. Об устройстве для автоматизированного сжатия образцов совместно со съемкой рентгеновского компьютерного томографа // Труды МАИ. 2025. № 143. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=185638>

Original article

ON A DEVICE FOR AUTOMATED SAMPLE COMPRESSION SYNCHRONIZED WITH X-RAY COMPUTED TOMOGRAPHY IMAGING

Nikita V. Kharin

Kazan Federal University,

Kazan, Russia

nik1314@mail.ru

Abstract. Non-destructive testing methods are widely employed to analyze complexly structured materials and constructions, with X-ray computed tomography (CT) standing out due to its ability to generate a digital twin of the specimen as a three-dimensional model. This approach facilitates the detection of manufacturing defects and deviations from design specifications. However, during operation, certain defects in heterogeneous materials may develop, and evaluating the risk areas for such defects using CT alone is challenging without external intervention. To overcome this limitation, a specialized

device is being developed that enables mechanical testing to be performed directly inside the CT chamber. The objective of this study is to develop and describe a device that ensures reproducible application of load to the specimens during CT scanning. In this research, a loading system is proposed that allows for consistent uniaxial compression tests within the CT environment. Furthermore, a novel method for tracking optical density throughout the specimen is introduced and validated to assess segmentation accuracy. Experimental results demonstrated that the force discrepancy between the developed device and a universal testing machine did not exceed 2%, while the differences in the measured values obtained by the device versus the universal testing machine remained within 3%. Additionally, to verify the optical density tracking method, data from previously published studies were employed, showing that the median segmentation error did not exceed 5%. In conclusion, the proposed device facilitates simultaneous mechanical testing and CT scanning, thereby providing a comprehensive analysis of the mechanical properties of the samples. The study also discusses potential improvements in both the device design and its software to further expand its functionality, ultimately paving the way for more integrated and precise evaluations of structural materials in various applications.

Keywords: X-ray computer tomography, automated device, heterogeneous structures

Funding: The study was conducted with financial support allocated to Kazan Federal University under the state assignment in the field of scientific research, Project No. FZSM-2023-0009.

For citation: Kharin N.V. On a device for automated sample compression synchronized with x-ray computed tomography imaging. *Trudy MAI*. 2025. No. 143. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=185638>

Введение

Для оценки изменения структуры материалов и конструкций применяют методы неразрушающего контроля. К таким методам относятся ультразвуковой [1, 3], термографический [4,5], капиллярный контроль [6,7] и другие [8-11]. Самый информативный метод для изучения изменения внутренней структуры материалов и конструкций является применение рентгеновского компьютерного томографа (РКТ) [12-14]. Ключевой особенностью данного метода является создание цифрового двойника исследуемого образца, представляющий собой точную трехмерную компьютерную модель (КМ). Такой способ исследования позволяет учитывать возможные отклонения и неточности, возникающие в процессе изготовления [15,16]. Влияние таких дефектов геометрии на физико-механические свойства актуально в исследованиях, посвящённых конструкциям, изготавливаемым аддитивным способом [16,17]. В идеальном случае КМ, созданная на этапе проектирования, должна полностью соответствовать цифровому двойнику. Однако на практике достичь такого соответствия невозможно из-за технологических погрешностей производства. Благодаря этому оценка напряженно-деформированного состояния цифрового двойника может быть более точной по сравнению с КМ, так как позволяет учесть имеющиеся дефекты [18]. Ограничением

такого метода исследования служит невозможность сканирования материалов с высокой плотностью, так как рентгеновское излучение в большей степени поглощается или отражается от материала, что приводит к появлению артефактов на итоговом цифровом двойнике.

Использование РКТ позволяет получить цифровой двойник текущего состояния материала или конструкции, но не позволяет оценить его изменение при внешней нагрузке. Для оценки внутренних изменений под действием внешней нагрузки изготавливаются оснастки для проведения испытания совместно со съемкой внутри РКТ. Такие оснастки должны учитывать особенность работы РКТ, а именно его габариты камеры и отсутствие артефактов от силового каркаса во время рентгеновского сканирования. В свою очередь оснастки должны соответствовать прочностным свойствам, т.е. должны выдерживать необходимые нагрузки и обеспечивать равномерное нагружение без вмешательства в процесс сканирования. В настоящее время известны технические решения, позволяющие провести натурный эксперимент совместно с РКТ. В опубликованных патентах наблюдается сложность конструкции, что ведет за собой проблемы ремонтпригодности [19-22]. Немаловажным фактором является отсутствие методики обработки получаемых данных с РКТ [19,21]. В изобретениях [19-21] область съемки закрыта или частично закрыта, что препятствуют исследованию образцов. Открытость рабочей зоны оснастки позволяет не только снимать образцы больших габаритов, но и гарантирует отсутствие артефактов на получаемой КМ. Технические решения [20,21] предназначены только для исследования внешней поверхности, а не внутренней структуры материала или конструкции. Также немаловажно отметить

автоматизированное и равномерное нагружения, с возможностью записи в файл диаграмм, в авторском устройстве, что отсутствует в следующих изобретениях [19-24].

Современные установки для проведения механических испытаний совместно с РКТ представляют собой инструмент для исследования внутренней структуры и механических свойств материалов в реальном времени. Однако они имеют ряд существенных недостатков, которые ограничивают их применение. Максимальные нагрузки существующих установок ограничиваются в 2кН, что недостаточно для исследования многих материалов. Размер исследуемых образцов ограничен 30мм, что делает невозможным анализ крупных объектов. Большинство существующих патентов не предусматривает автоматизированный процесс нагружения, что затрудняет проведение воспроизводимых экспериментов. Для преодоления данных ограничений требуется разработка нового технического решения, которое позволит расширить возможности неразрушающего контроля, а также обеспечит точное и детальное исследования материалов и конструкций в условиях, приближенных к реальным. Такой подход особенно важен для разработки новых видов материалов, а также при оптимизации конструкции.

Таким образом целью данного исследования заключается в разработке экспериментальной установки для проведения испытаний на сжатие совместно со съемкой в РКТ, с доработкой недостатков существующих аналогов.

Проектирование автоматизированной оснастки

В качестве системы нагружения предлагается использовать оснастку, которая позволяет нагружать образец сжимающей нагрузкой. Главным критерием для оснастки является возможность беспрепятственной установки внутри РКТ, то есть удовлетворять габаритам камеры томографа, а также возможность беспрепятственной съемки образца. Во время съемки внутри РКТ, основание оснастки не должно давать артефактов на конечном цифровом двойнике. Другим немаловажным фактором служит автоматизация приложения внешней нагрузки на образец. Нагрузка должна прикладываться равномерно как по скорости нагружения, так и на поверхность образца.

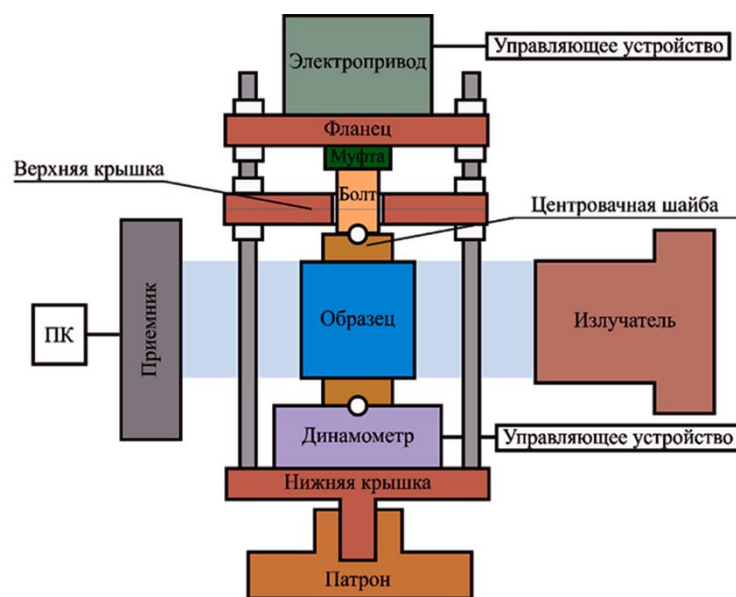


Рис. 1. Схема оснастки для нагружения образцов внутри РКТ

Оснастка состоит (Рис. 1) из нижней крышки с креплением под патрон РКТ; 4-ех шпилек, проходящие через всю конструкцию оснастки, являющихся каркасом; фланца, который является крышкой для крепления электропривода и верхней крышки, необходимой для реализации передачи винт-гайка. В качестве

измерительного устройства, на нижнюю крышку устанавливается электронный динамометр, на который устанавливаются композиционные проставки. Проставки необходимы для центрирования образца и отдаления образца от динамометра и винта, с целью снижения артефактов в исследуемой зоне. Электропривод состоит из электродвигателя и редуктора и устанавливается на фланец. На вал редуктора устанавливается муфта под винт. Винт устанавливается в верхнюю крышку. Для того чтобы снизить момент кручения во время передачи усилия с винта, на образец устанавливается шарик и композиционная проставка. В данном случае композиционная проставка, как и в случае с динамометром, отдаляет исследуемый образец от нагрузочного винта и центрует образец.

Для описания взаимодействия между всеми компонентами оснастки была разработана функциональная схема (Рис. 2).

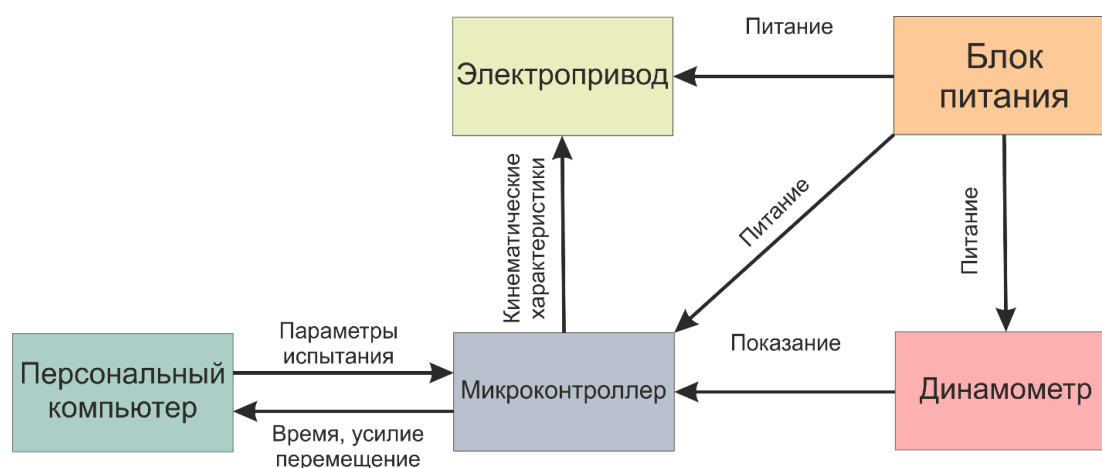


Рис. 2. Функциональная схема управления устройством

Принцип работы основан на взаимодействии нескольких ключевых компонентов. Персональный компьютер отправляет параметры испытаний на микроконтроллер. Эти параметры включают в себя количество испытаний, скорость

нагружения, а также максимальное перемещение или усилие на каждом этапе нагружения. Получив эти данные, микроконтроллер настраивает режим работы в зависимости от типа испытания. Микроконтроллер управляет электроприводом, задавая ему скорость и время работы для каждого этапа нагружения. В случае статической нагрузки, когда требуется поддерживать определённое усилие, микроконтроллер постоянно отслеживает показания с динамометра. Если достигнуты заданные параметры, микроконтроллер останавливает электропривод, чтобы завершить этап нагружения. Блок питания играет важную роль в этой системе, обеспечивая стабильное электропитание для всех компонентов: динамометра, электропривода и микроконтроллера. Таким образом, оснастка работает как слаженная система, где ПК задаёт параметры, микроконтроллер управляет процессом, электропривод создаёт нагрузку, динамометр считывает её, а блок питания обеспечивает энергией все компоненты.

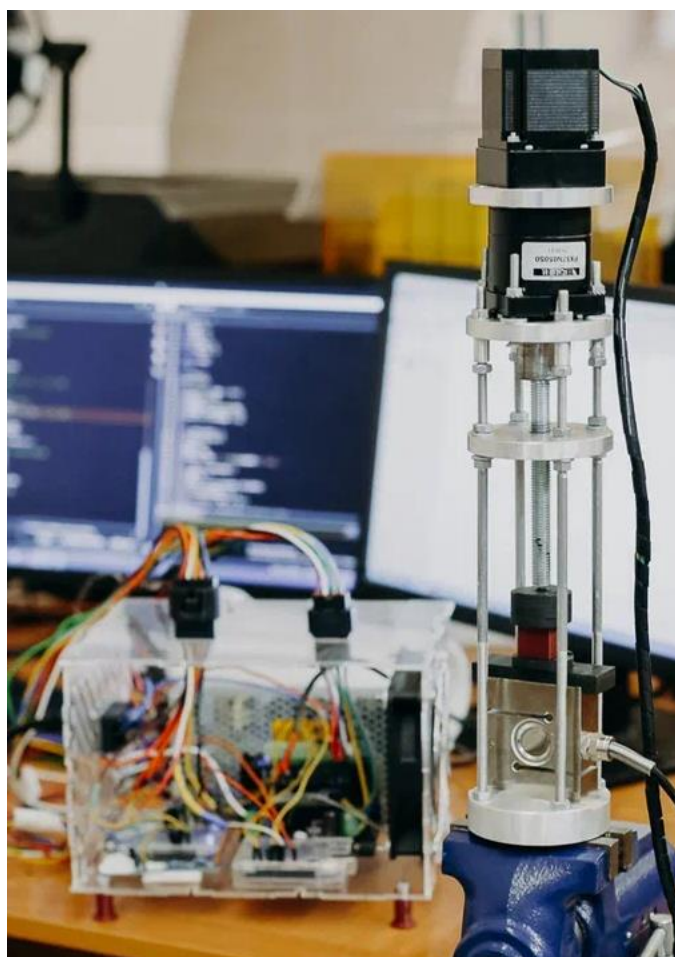
Для изготовления компонентов оснастки, таких как шпильки, крышка и фланцы, был выбран дюралюминий марки Д16Т. За счет малой плотности, относительно других металлов, а именно 2.7 г/см^3 , детали из алюминия не дают сильных артефактов при сканировании на РКТ. Данные компоненты оснастки рассчитывались на прочность в соответствии с ГОСТ 26158-84. В данном случае, динамометр и нагрузочный болт являются серийными стандартными изделиями, их характеристики не подлежали изменению. Для уменьшения артефактов от этих компонентов были разработаны композитные проставки, которые позволяли удалять их от исследуемого образца. Это было необходимо для сохранения детализации образца и предотвращения возникновения артефактов, таких как лучи рассеяния и

тени рассеяния, которые могут негативно сказаться на точности определения его физико-механических свойств. В качестве материала изготовления был выбран АСМ 200t.

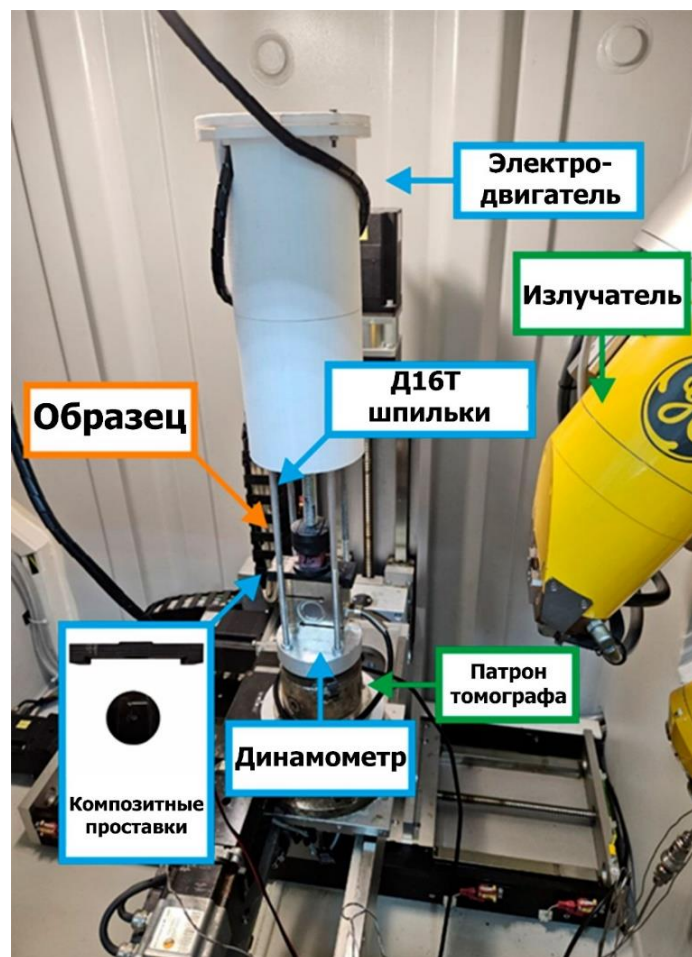
Композитные проставки были спроектированы с пазами под образец с креплением на динамометр. Такой вариант позволяет точную и стабильную установку образца в разработанную оснастку. Пазы позволяют фиксировать образец в нужной позиции, минимизируя ошибку, связанную, как с установкой образца, так и с проскальзыванием во время приложения внешней сжимающей нагрузки. Такой подход обеспечивает получение точных результатов при проведении испытаний, что в свою очередь минимизирует искажение в итоговом цифровом двойнике.

Таким образом композиционные проставки должны удовлетворять следующим условиям: эффективно справляться с минимизацией артефактов во время сканирования внутри РКТ, не изменять функции нагружения, а также обеспечить возможность центрирования образца внутри разработанной оснастки. Для обеспечения равномерного нагружения была спроектирована центровочная шайба. Для центрирования исследуемого образца относительно динамометра была спроектирована проставка с креплением под динамометр. Для удобства позиционирования образца в оснастке была разработана проставка с пазом под образец.

Итоговый вариант разработанной оснастки совместно с выбранными комплектующими показан на рисунке 3.а. На рисунке 3.б представлена оснастка, установленная в РКТ.



а



б

Рис. 3. Разработанная оснастка а) оснастка и управляющее устройство; б)

Оснастка внутри РКТ

Для полноты информации в таблице 1 приведены технические характеристики оснастки, которые отражают ключевые параметры.

Таблица 1– Технические характеристики авторского устройства.

Техническая характеристика	Значение
Материал изготовления	Д16Т
Максимальная нагрузка, кН	10
Диапазон рабочих скоростей, мм/мин	0.1-13.8
Полный рабочий ход, мм	10
Макс. габарит исследуемого образца (Д, Ш, В), мм	100x40x40

Материалы и методы

Для верификации оснастки изготавливался кубический сплошной образец, напечатанный при помощи аддитивных технологий, а именно FDM-печать. Изготовление образцов происходило на 3D-принтере QUDI plus II.

Для тарирования динамометра использовалась универсальная испытательная машины УТС-110М-100.

Сканирование образцов было выполнено с применением микро-нанофокусной системы рентгеновского контроля для компьютерной томографии и 2D-инспекции Phoenix V|tome|X S240 в лаборатории рентгеновской компьютерной томографии Института геологии и нефтегазовых технологий Казанского (Приволжского) федерального университета. Система оснащена двумя рентгеновскими трубками: микрофокусной с максимальным ускоряющим напряжением 240 кВ, мощностью 320 Вт и нанофокусной с максимальным ускоряющим напряжением 180 кВ, мощностью 15 Вт. Для первичной обработки данных и создания объёмной (воксельной) модели образца на базе рентгеновских снимков (проекций) использовалось программное обеспечение `data|x reconstruction`.

При обработке получаемых цифровых двойников на различных шагах нагружения важным становится вопрос о корректности сегментации исследуемого образца. При прохождении рентгеновского луча через слой вещества его изначальная интенсивность (I_0) уменьшается за счет поглощения, рассеяния и, в меньшей степени, отражения, достигая определенного значения интенсивности (I). Изменение интенсивности пучка рентгеновских лучей при прохождении через вещество описывается следующим образом. Рентгеновские лучи поглощаются в той

или иной степени всеми веществами, через которые они проходят. Доля энергии лучей, поглощенных в веществе, зависит от толщины поглощающего слоя, природы вещества (его атомного состава и плотности) и длины волны рентгеновских лучей. Уменьшение интенсивности луча излучения, проходящего через материал с определенной толщиной (l), можно записать следующим образом:

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot l},$$

где μ — линейный коэффициент ослабления. Его величина зависит от атомного состава поглощающего вещества (атомного номера элементов), длины волны (энергии) рентгеновского излучения и локальной плотности материала (ρ). Чем выше плотность материала и чем тяжелее элементы в его составе, тем больше коэффициент ослабления, что приводит к более сильному уменьшению интенсивности рентгеновского луча.

Ряд исследований свидетельствует о том, что линейный коэффициент ослабления μ зависит от плотности материала по линейному закону [25, 26, 27]. То есть, при условии неизменного химического состава и структуры материала, любое изменение плотности приводит к пропорциональному изменению μ . Это означает, что при нормировке результатов измерений на недеформированный образец, оптическая плотность, как функция от μ , будет сохранять постоянное значение. Таким образом, плотность материала, выраженная в терминах оптической плотности, эквивалентна обычной плотности и может рассматриваться как константа для данного материала. Тогда, для каждого шага нагружения массу

образца можно оценить и сравнить с первоначальным значением. Масса образца может быть вычислена по следующей формуле:

$$m_i^p = V_{vox} \cdot \sum_{H_i^p \in M_p} H_i^p,$$

где m_i^p – масса образца на i -ом шаге нагружения для p -го фазы материала, H_i^p – значение нормированной проницаемости вокселя.

Нормированное значение проницаемости вычисляется как значение плотности в фазе материала, на плотность материала, который не подвержен деформированию. Такой подход позволяет устранить влияние изменения настроек съемки РКТ. Таким образом для оценки погрешности объемной деформации можно использовать сохранение массы. Если масса образца на каждом шаге нагружения m_i^p близка к начальной массе m_0^p , то погрешность подсчета объемной деформации можно считать минимальным. Относительное отклонение массы можно записать следующим образом:

$$\partial m_i^p = \frac{m_i^p - m_0^p}{m_0^p}.$$

Если значение ∂m мало, это свидетельствует о сохранении массы образца и подтверждает, что измерения объемной деформации выполнены с высокой точностью. Легко видеть, относительное отклонение массы является оценкой сверху для относительных погрешностей подсчета объема ввиду того, что по сути является взвешенным подсчетом того объема. А значит, значение ∂m может быть

использовано как величина ошибки на подсчитанные объемные характеристики фаз образца.

Результаты

При тарировании динамометра был использован линейный коэффициент для преобразования напряжения, считываемого системой управления, в прикладываемую нагрузку. Были собраны и сопоставлены данные, полученные с испытательной машины и тарированного динамометра. Анализ полученных результатов показал незначительное расхождение в показаниях между испытательной машиной и тарированного динамометра. Рассчитан коэффициент детерминации для полученных диаграмм сжатия равный 0.99. Максимальное абсолютное отклонение значений составляет 2%.

В качестве апробируемого образца был выбран куб с эллипсоидальной порой, напечатанный при помощи аддитивных технологий, а именно FDM-печать. В качестве материала использовался PLA-пластик. Всего было изготовлено два испытуемых образца за одну серию производства. Данный образец нагружался и сканировался 4 раза. Первое сканирование происходило без воздействия сжимающей нагрузки, последующие шаги проводились с постепенным увеличением сжимающей нагрузки. Полученные результаты сравнивались с диаграммой сжатия на универсальной испытательной машине УТС-110М-100 (Рис.4).

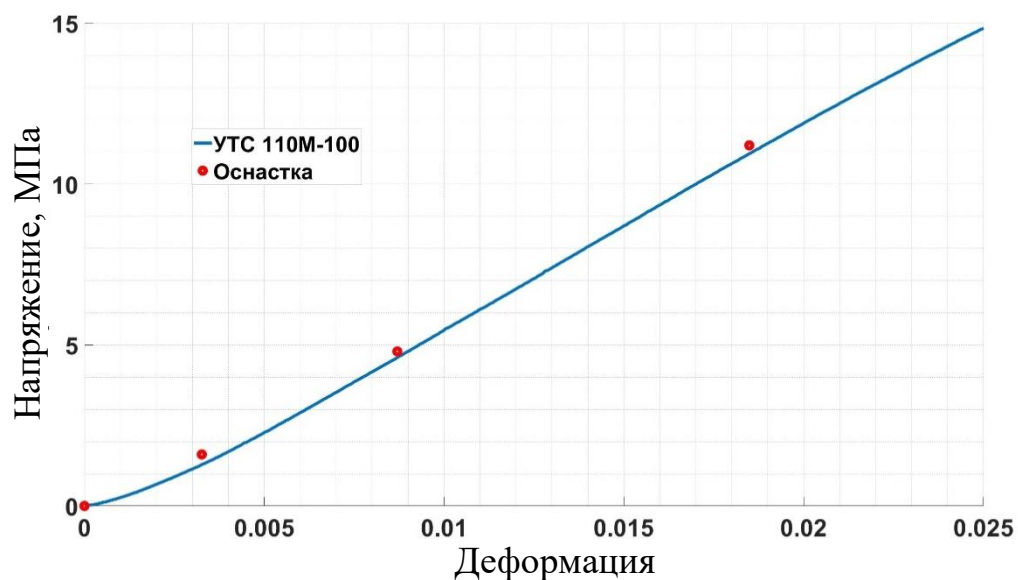


Рис.4. Проведения испытаний тесного образца

При сравнении напряжений в точках съемки со соответствующими точками на диаграмме сжатия на универсальной испытательной машине, максимальная относительная погрешность составила 3%.

В качестве испытуемого образца для верификации артефактов во время съемки был взят куб с порой. Совместно с композитными проставками визуально оценивались лучи рассеяния и тени рассеяния (Рис. 5).

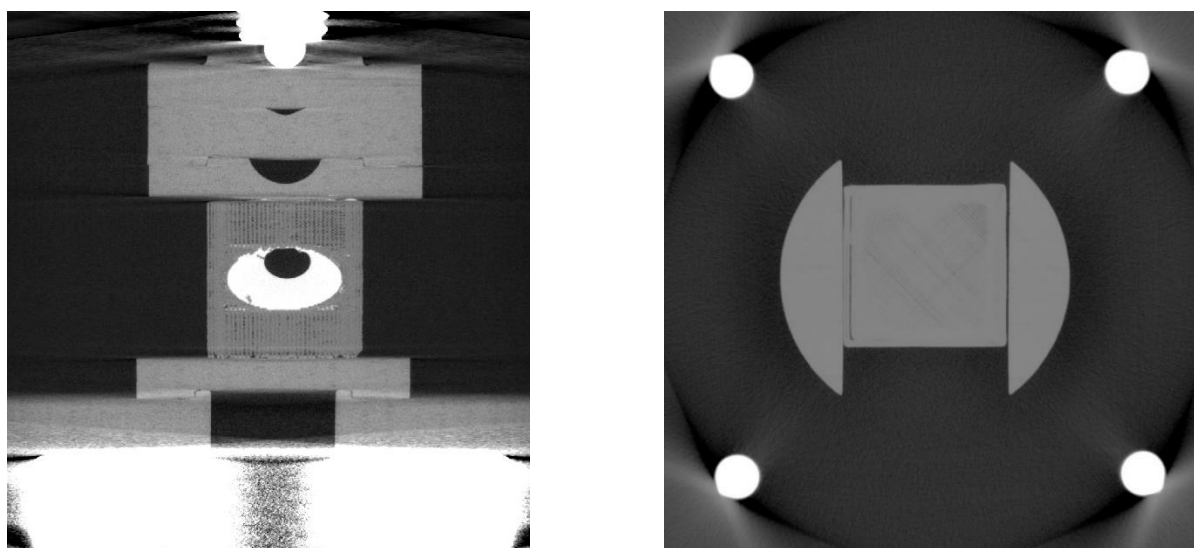


Рис.5. Артефакты сканирования РКТ

Как можно заметить лучи рассеяния и тени рассеяния, созданные нагрузочным болтом и динамометром, не заходят в область съемки испытуемого образца.

В рамках исследования [28] проводилось испытание на одноосное сжатие внутри компьютерного томографа совместно с автоматизированной оснасткой. В качестве исследуемого образца были взяты физические объемы, представляющие собой кубические образцы с эллипсоидальной порой (Рис. 6). В данном случае образцы изготавливались при помощи FDM печати, материал для печати был взят PLA-пластик.

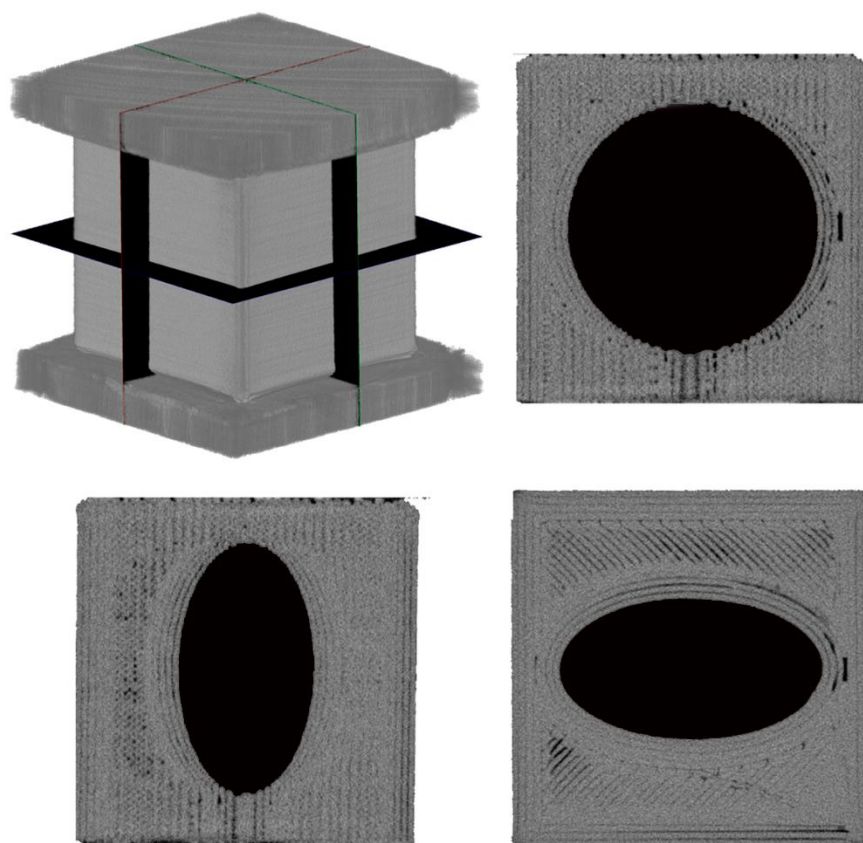


Рис.6. КТ образца с эллипсоидальной порой

В данном исследовании было изготовлено 8 образцов. Семь образцов представляли собой куб с эллиптической порой, их маркировали как ЕЕ. Угол

эллиптичности варьировался с шагом 15 градусов на интервале $[0^{\circ};90^{\circ}]$. Испытание внутри РКТ проводилось в несколько этапов. Первый этап – съемка образцов без приложения внешней сжимающей нагрузки. Последующие этапы проводились с постепенным увеличением сжимающей нагрузки на линейном участке. Последний шаг нагружения сканировался в зоне пластических деформаций.

Для каждой полученного цифрового двойника с внешней сжимающей нагрузкой рассчитывалось отклонение массы от цифрового двойника без внешнего воздействия. В таблице 2 приведены медианные значения отклонения масс и первый и третий квартиль.

Таблица 2. – Отклонение массы для кубических образцов.

Параметр	EE0	EE15	EE30	EE45	EE60	EE75	EE90
Отклонение, %	0.5 (0;4)	1.5 (1; 6)	2.22 (2.2;2.3)	0.8 (0.6;1.1)	1.9 (1.8;3)	1.3 (0.1; 1,5)	0.3 (0.1; 0.38)

В рамках исследования [29] изготавливались образцы с равномерно распределенными идентичными кубическими физическими объемами, идентичные исследованию [28]. Каждый образец состоял из $10 \times 3 \times 3$ физических объёмов (Рис. 8). Для изготовления использовалась технология стереолитографии на фотополимерном 3D-принтере ANYCUBIC Photon Mono X, обеспечивающем высокое разрешение печати (50 мкм), что критично для воспроизведения сложной поровой структуры.

В рамках данного исследования было изготовлена 3 образца с эллиптической порой, маркируемые как EE. В данном случае угол эллиптичности варьировался с шагом 45 градусов на интервале $[0^{\circ};90^{\circ}]$ (Рис.7.а). Испытание внутри РКТ

проводилось в несколько этапов. Первый этап – съемка образцов без приложения внешней сжимающей нагрузки. Последующие этапы проводились с постепенным увеличением сжимающей нагрузки на линейном участке.

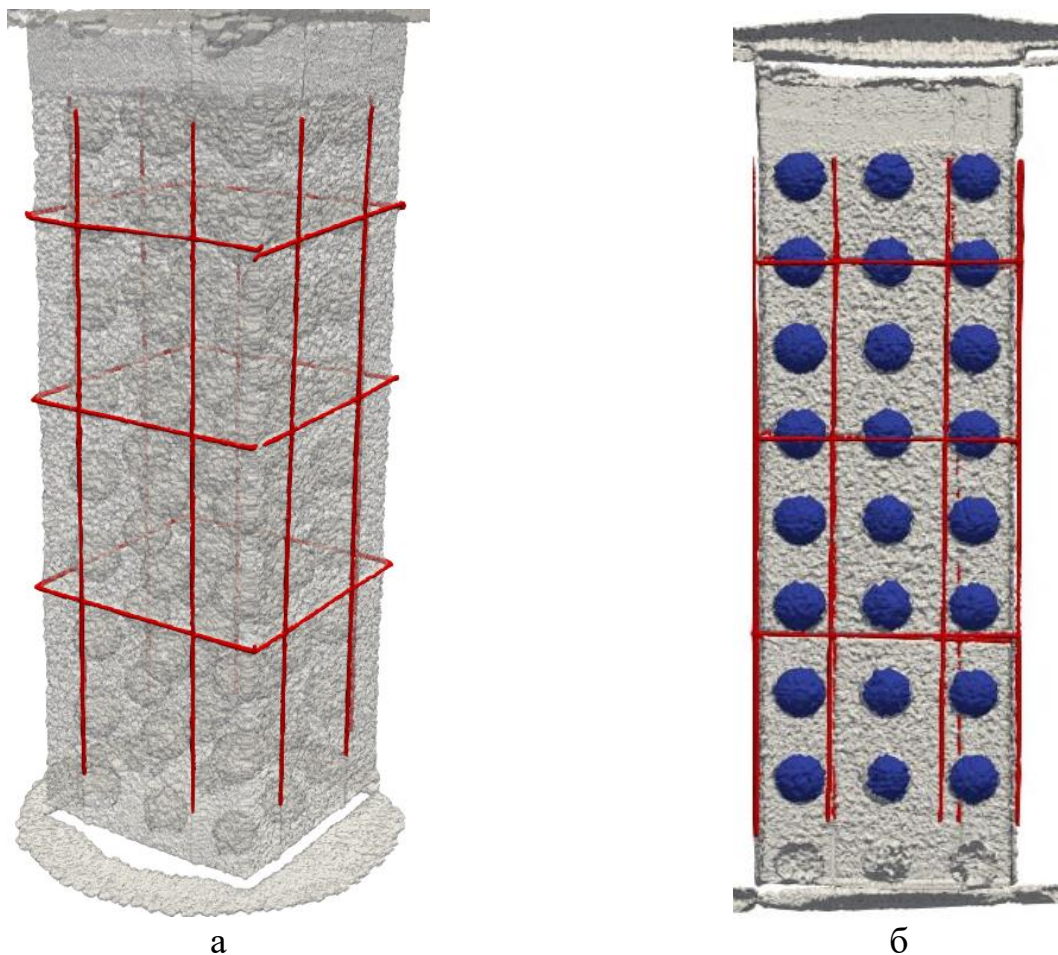


Рис.7. Компьютерная томография а) Структура образца б) Флюид в закрытых порах

В данном случае образцы состоят из двух фаз материала. Происходит это из-за не полимеризованной смолы внутри закрытых пор (Рис.7.б.). При анализе относительного изменения массы образцов оценивалось суммарное изменение массы твердой и жидкой фазы. В таблице 3 приведены медианные значения отклонения масс с указанием первого и третьего квартилей.

Таблица 3 – Отклонение массы для структуры.

Параметр	ЕЕ0	ЕЕ45	ЕЕ90
Отклонение, %	1.8 (0.7; 5.5)	4.8 (3; 5.2)	3.4 (1.3; 4.9)

Незначительные отклонения массы, от 0.3 % до 2.22% для образцов с эллипсоидальной порой, свидетельствуют о корректной сегментации и отсутствии систематических ошибок при обработке данных РКТ. Более высокие отклонения в исследовании с двухфазными образцами (до 4.8%) объясняются сложностью разделения жидкой и твердой фаз, что подчеркивает необходимость адаптации алгоритмов сегментации для гетерогенных материалов.

Заключение

В соответствии с требованиями ГОСТ 28840-90 «Машины для испытания материалов на растяжение, сжатие и изгиб» представленная оснастка относится к категории прессов с максимальной предельной нагрузкой 10 кН, где допустимая погрешность измерения нагрузки при прямом ходе соответствует группе 2-У, а погрешность измерения деформации образцов отнесена к группе 3-Д. При этом соотношение наибольшей и наименьшей скоростей перемещения активного захвата соответствует параметрам машин категории 5-С, что в совокупности обеспечивает полное соответствие оборудования установленным стандартам для испытательных систем данного типа.

Продемонстрированная методика по оценке корректности сегментирования цифровых двойников показывает, что использование рентгеновской компьютерной

томографии в сочетании с автоматизированной оснасткой позволяет точно отслеживать объемные деформации материалов в режиме реального времени.

Список источников

1. Аиша Х., Газанфар Али М., Тарик М.Р.Х. и др. Контроль и определение параметров сварной низкоуглеродистой стали E 6013 с помощью ультразвукового контроля и преобразования Гильберта-Хуанга // Дефектоскопия. 2021. № 5. С. 64-70. DOI: [10.31857/S0130308221050080](https://doi.org/10.31857/S0130308221050080)
2. Chavazas M.-L. et al. Impact of relative humidity variations on Carrara marble mechanical properties investigated by nonlinear resonant ultrasound spectroscopy // Construction and Building Materials. 2024. Vol. 431, P. 136529. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2024.136529](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136529)
3. Богомолова А.Д., Пальчиков Д.С. Исследование усталостной прочности слоистых полимерных композиционных материалов с учетом повреждений // Труды МАИ. 2024. № 138. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=182660>
4. Xin Z. et al. Assessing the density and mechanical properties of ancient timber members based on the active infrared thermography // Construction and Building Materials. 2021. Vol. 304, P. 124614. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2021.124614](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124614)
5. Травин А.А. и др. Совершенствование диагностики механизмов машин с использованием методов неразрушающего контроля // Труды МАИ. 2022. № 127. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=170352>. DOI: [10.34759/trd-2022-127-23](https://doi.org/10.34759/trd-2022-127-23)

6. Отока А.Г., Шлапак П.С. Опыт использования магнитопорошкового и капиллярного методов неразрушающего контроля при обнаружении дефектов в объектах контроля нефтяной промышленности // ПРОнефть. Профессионально о нефти. 2023. Т. 8, № 2 (28). С. 149-156. DOI: [10.51890/2587-7399-2023-8-2-149-156](https://doi.org/10.51890/2587-7399-2023-8-2-149-156)
7. Лаптев А.С. и др. Проблемы и задачи стандартизации в сфере капиллярного неразрушающего контроля в авиационной отрасли (обзор) // Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования. 2023. № 1 (71). С. 10-17.
8. Кудинов И.И. и др. Оценка эффективности использования источников ультрафиолетового излучения при проведении капиллярного люминесцентного контроля // Дефектоскопия. 2022. № 1. С. 52-66. DOI: [10.31857/S0130308222010055](https://doi.org/10.31857/S0130308222010055)
9. Снарский А.С., Янушонок А.Н. Неразрушающий метод определения механических характеристик металла труб магистрального трубопровода // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. 2024. № 2 (50). С. 135-143. DOI: [10.52928/2070-1616-2024-50-2-135-143](https://doi.org/10.52928/2070-1616-2024-50-2-135-143)
10. Горецкий Ю.Г., Коробко Т.Б. Применение неразрушающего контроля для оценки механических свойств биметаллической толстолистовой стали // Всероссийская научно-практическая конференция «Проблемы машиностроения: современные технологии обработки, материалы, машины, агрегаты» (Махачкала, 11-12 октября 2024): сборник статей. - Махачкала: Дагестанский государственный технический университет, 2024. С. 99-105.

11. Кузнецов С.В., Кручинин А.А., Ушкар М.Н. Экспресс-метод оценки состояния сотовых конструкций авиационного назначения после ударного воздействия // Труды МАИ. 2024. № 137. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=181879>
12. Зерщиков К.Ю., Семенов Ю.В. Структура полимерных композиционных материалов, армированных стеклянными волокнами различной длины, исследованная методом компьютерной томографии // Механика композиционных материалов и конструкций. 2024. Т. 30, № 2. С. 141-152. DOI: [10.33113/mkmmk.ras.2024.30.02.01](https://doi.org/10.33113/mkmmk.ras.2024.30.02.01)
13. Герасимов О.В. и др. Оценка напряжённого состояния позвоночных столбов собак на основе данных компьютерной томографии // Российский журнал биомеханики. 2024. Т. 28, № 1. С. 40-53. DOI: [10.15593/RZhBiomeh/2024.1.03](https://doi.org/10.15593/RZhBiomeh/2024.1.03)
14. Zhao X. et al. Prediction Models of Mechanical Properties of Jute/PLA Composite Based on X-ray Computed Tomography // Polymers. 2024. Vol. 16, No. 1. P. 160. DOI: [10.3390/polym16010160](https://doi.org/10.3390/polym16010160)
15. Акифьев К.Н. и др. Методика исследования пористости образцов с жидкостью рентгеновским компьютерным томографом при одноосном сжатии // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2023. № 2. С. 11-21. DOI: [10.15593/perm.mech/2023.2.02](https://doi.org/10.15593/perm.mech/2023.2.02)
16. Khosravani M.R., Reinicke T. On the use of X-ray computed tomography in assessment of 3D-printed components // Journal of Nondestructive Evaluation. 2020. Vol. 39, No. 4. P. 75. DOI: [10.1007/s10921-020-00721-1](https://doi.org/10.1007/s10921-020-00721-1)
17. Bolshakov P., Kuchumov A.G., Kharin N., Akifyev K., Statsenko E., Silberschmidt V.V. Method of computational design for additive manufacturing of hip endoprosthesis

based on basic-cell concept // International Journal for Numerical Methods in Biomedical Engineering. 2024. Vol. 40, P. 3802. DOI: [10.1002/cnm.3802](https://doi.org/10.1002/cnm.3802)

18. Толстиков В.Г. Пыхалов А.А. Анализ напряженно-деформированного состояния деталей планера самолета из композиционных материалов на основе сканирования и решения глобально-локальной задачи // Труды МАИ. 2021. № 118. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=158214>. DOI: [10.34759/trd-2021-118-05](https://doi.org/10.34759/trd-2021-118-05)

19. Николаев А.Л. и др. Устройство 3D визуализации деформированного состояния поверхности материала в области упругих деформаций. Патент RU 2714515. МПК G01N19/08, 18.02.2020.

20. Юргенсон С.А. Устройство для определения структуры материала или изделия, преимущественно полимерного композиционного материала. Патент RU 157585. МПК G01N3/02, 22.09.2014.

21. Hufenbach W. et al. A test device for damage characterisation of composites based on in situ computed tomography // Composites Science and Technology. 2012. Vol. 72 (12), P. 1361–1367. DOI: [10.1016/j.compscitech.2012.05.007](https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2012.05.007)

22. Qian W. et al. Time lapse in situ X-ray imaging of failure in structural materials under cyclic loads and extreme environments // Journal of Material Science and Technology. 2024. Vol. 175, P. 80–103. DOI: [10.1016/j.jmst.2023.07.041](https://doi.org/10.1016/j.jmst.2023.07.041)

23. Иванников В.П. и др. Способ исследования соединений с натягом с применением ультразвуковой томографии. Патент RU 2719276. МПК G01N29/04, 17.04.2020.

24. Саченков О.А. и др. Устройство для определения структуры материала или образцов при одноосном сжатии и способ его использования. Патент RU 2755098. МПК G01N23/046, 13.09.2021.
25. Gao Y. et al. Single energy CT-based mass density and relative stopping power estimation for proton therapy using deep learning method // *Frontiers in Oncology*. 2023. Vol. 13, DOI: [10.3389/fonc.2023.1278180](https://doi.org/10.3389/fonc.2023.1278180)
26. Nakao M. et al. Tolerance levels of mass density for CT number calibration in photon radiation therapy // *Journal of Applied Clinical Medical Physics*. 2019. Vol. 20, P. 45–52. DOI: [10.1002/acm2.12601](https://doi.org/10.1002/acm2.12601)
27. Kanematsu N. et al. Modeling of body tissues for Monte Carlo simulation of radiotherapy treatments planned with conventional x-ray CT systems // *Physics in Medicine and Biology*. 2016. Vol. 61, P. 5037–50. DOI: [10.1088/0031-9155/61/13/5037](https://doi.org/10.1088/0031-9155/61/13/5037)
28. Харин Н.В. и др. Влияние структурных параметров на физико-механические свойства неоднородных образцов под действием сжимающей нагрузки // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. 2024. № 8 (773). С. 11-23.
29. Харин Н.В. и др. Исследование пористости образца с флюид-насыщенными закрытыми порами под действием внешней нагрузки // *Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: Естественные науки*. 2024. № 3 (114). С. 70-91.

References

1. Aisha KH., Gazanfar Ali M., Tarik M.R.KH. et al. Control and determination of parameters of welded low-carbon steel E 6013 using ultrasonic testing and Hilbert-Huang

- transform. *Defektoskopiya*. 2021. No. 5. P. 64-70. (In Russ.). DOI: [10.31857/S0130308221050080](https://doi.org/10.31857/S0130308221050080)
2. Chavazas M.-L. et al. Impact of relative humidity variations on Carrara marble mechanical properties investigated by nonlinear resonant ultrasound spectroscopy. *Construction and Building Materials*. 2024. Vol. 431, P. 136529. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2024.136529](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136529)
3. Bogomolova A.D., Pal'chikov D.S. Study of the fatigut strenght of layered polymer composite materials taking into account damage. *Trudy MAI*. 2024. No. 138. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=182660>
4. Xin Z. et al. Assessing the density and mechanical properties of ancient timber members based on the active infrared thermography. *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 304, P. 124614. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2021.124614](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124614)
5. Travin A.A. et al. Improvement of diagnostics of machine mechanisms using non-destructive testing methods. *Trudy MAI*. 2022. No. 127. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=170352>. DOI: [10.34759/trd-2022-127-23](https://doi.org/10.34759/trd-2022-127-23)
6. Otoka A.G., Shlapak P.S. Experience in using magnetic particle and capillary methods of non-destructive testing for detecting defects in oil industry inspection objects. *PROneft'. Professional'no o nefti*. 2023. Vol. 8, No. 2 (28). P. 149-156. (In Russ.). DOI: [10.51890/2587-7399-2023-8-2-149-156](https://doi.org/10.51890/2587-7399-2023-8-2-149-156)
7. Laptev A.S. et al. Problems and tasks of standardization in the field of capillary non-destructive testing in the aviation industry (review). *Informatsionno-ekonomicheskie aspekty standartizatsii i tekhnicheskogo regulirovaniya*. 2023. No. 1 (71). P. 10-17. (In Russ.).

8. Kudinov I.I. et al. Evaluation of the effectiveness of using ultraviolet radiation sources in fluorescent penetrant testing. *Defektoskopiya*. 2022. No. 1. P. 52-66. (In Russ.). DOI: [10.31857/S0130308222010055](https://doi.org/10.31857/S0130308222010055)
9. Snarskii A.S., Yanushonok A.N. Non-destructive method for determining the mechanical properties of metal in main pipeline pipes. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya V. Promyshlennost'. Prikladnye nauki*. 2024. No. 2 (50). P. 135-143. (In Russ.). DOI: [10.52928/2070-1616-2024-50-2-135-143](https://doi.org/10.52928/2070-1616-2024-50-2-135-143)
10. Goretskii YU.G., Korobko T.B. Application of non-destructive testing for assessing the mechanical properties of bimetallic thick-plate steel. *Vserossiiskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Problemy mashinostroeniya: sovremennye tekhnologii obrabotki, materialy, mashiny, agregaty»*: sbornik statei. Makhachkala: Dagestanskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet Publ., 2024. P. 99-105.
11. Kuznetsov S.V., Kruchinin A.A., Ushkar M.N. Methodology for increasing the reliability and efficiency of on-board radio equipment structure at the early stages of design. *Trudy MAI*. 2024. No. 137. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=181879>
12. Zershchikov K.Yu., Semenov Yu.V. Structure of polymer composite materials reinforced with glass fibers of various lengths, studied by computed tomography. *Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruksii*. 2024. Vol. 30, No. 2. P. 141-152. (In Russ.). DOI: [10.33113/mkmk.ras.2024.30.02.01](https://doi.org/10.33113/mkmk.ras.2024.30.02.01)
13. Gerasimov O.V. et al. CT-based assessment of the stress state of dog spines. *Rossiiskii zhurnal biomekhaniki*. 2024. Vol. 28, No. 1. P. 40-53. (In Russ.). DOI: [10.15593/RZhBiomeh/2024.1.03](https://doi.org/10.15593/RZhBiomeh/2024.1.03)

14. Zhao X. et al. Prediction Models of Mechanical Properties of Jute/PLA Composite Based on X-ray Computed Tomography. *Polymers*. 2024. Vol. 16, No. 1. P. 160. DOI: [10.3390/polym16010160](https://doi.org/10.3390/polym16010160)
15. Akif'ev K.N. et al. Methodology for studying the porosity of fluid-saturated samples using X-ray computed tomography under uniaxial compression. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika*. 2023. No. 2. P. 11-21. (In Russ.). DOI: [10.15593/perm.mech/2023.2.02](https://doi.org/10.15593/perm.mech/2023.2.02)
16. Khosravani M.R., Reinicke T. On the use of X-ray computed tomography in assessment of 3D-printed components. *Journal of Nondestructive Evaluation*. 2020. Vol. 39, No. 4. P. 75. DOI: [10.1007/s10921-020-00721-1](https://doi.org/10.1007/s10921-020-00721-1)
17. Bolshakov P., Kuchumov A.G., Kharin N., Akifyev K., Statsenko E., Silberschmidt V.V. Method of computational design for additive manufacturing of hip endoprosthesis based on basic-cell concept. *International Journal for Numerical Methods in Biomedical Engineering*. 2024. Vol. 40, P. 3802. DOI: [10.1002/cnm.3802](https://doi.org/10.1002/cnm.3802)
18. Tolstikov V.G. Pykhalov A.A. Stress-strain analysis of aircraft airframe parts from composite materials based on scanning and global-local problem solution. *Trudy MAI*. 2021. No. 118. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=158214>. DOI: [10.34759/trd-2021-118-05](https://doi.org/10.34759/trd-2021-118-05)
19. Nikolaev A.L. et al. *Ustroistvo 3D vizualizatsii deformirovannogo sostoyaniya poverkhnosti materiala v oblasti uprugikh deformatsii*. Patent RU 2714515. MPK G01N19/08 (Device for 3D visualization of the deformed state of a material surface in the elastic deformation region. Patent RU 2714515), 18.02.2020.

20. Yurgenson S.A. *Ustroistvo dlya opredeleniya struktury materiala ili izdeliya, preimushchestvenno polimernogo kompozitsionnogo materiala. Patent RU 157585. MPK G01N3/02* (Device for determining the structure of a material or product, primarily a polymer composite material. Patent RU 157585.), 22.09.2014.
21. Hufenbach W. et al. A test device for damage characterisation of composites based on in situ computed tomography. *Composites Science and Technology*. 2012. Vol. 72 (12), P. 1361–1367. DOI: [10.1016/j.compscitech.2012.05.007](https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2012.05.007)
22. Qian W. et al. Time lapse in situ X-ray imaging of failure in structural materials under cyclic loads and extreme environments. *Journal of Material Science and Technology*. 2024. Vol. 175, P. 80–103. DOI: [10.1016/j.jmst.2023.07.041](https://doi.org/10.1016/j.jmst.2023.07.041)
23. Ivannikov V.P. et al. *Sposob issledovaniya soedinenii s natyagom s primeneniem ul'trazvukovoi tomografii. Patent RU 2719276. MPK G01N29/04* (Method for studying interference-fit joints using ultrasonic tomography. Patent RU 2719276), 17.04.2020.
24. Sachenkov O.A. et al. *Ustroistvo dlya opredeleniya struktury materiala ili obraztsov pri odnoosnom szhatii i sposob ego ispol'zovaniya. Patent RU 2755098. MPK G01N23/046* (Device for determining the structure of a material or samples under uniaxial compression and method of its use. Patent RU 2755098), 13.09.2021.
25. Gao Y. et al. Single energy CT-based mass density and relative stopping power estimation for proton therapy using deep learning method. *Frontiers in Oncology*. 2023. Vol. 13, DOI: [10.3389/fonc.2023.1278180](https://doi.org/10.3389/fonc.2023.1278180)
26. Nakao M. et al. Tolerance levels of mass density for CT number calibration in photon radiation therapy. *Journal of Applied Clinical Medical Physics*. 2019. Vol. 20, P. 45–52. DOI: [10.1002/acm2.12601](https://doi.org/10.1002/acm2.12601)

27. Kanematsu N. et al. Modeling of body tissues for Monte Carlo simulation of radiotherapy treatments planned with conventional x-ray CT systems. *Physics in Medicine and Biology*. 2016. Vol. 61, P. 5037–50. DOI: [10.1088/0031-9155/61/13/5037](https://doi.org/10.1088/0031-9155/61/13/5037)
28. Kharin N.V. et al. Influence of structural parameters on the physical and mechanical properties of heterogeneous samples under compressive load. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie*. 2024. No. 8 (773). P. 11-23. (In Russ.)
29. Kharin N.V. et al. Study of the porosity of a sample with fluid-saturated closed pores under external load. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N.E. Baumana. Seriya: Estestvennye nauki*. 2024. No. 3 (114). P. 70-91. (In Russ.)

Статья поступила в редакцию 28.03.2025

Одобрена после рецензирования 05.04.2025

Принята к публикации 25.08.2025

The article was submitted on 28.03.2025; approved after reviewing on 05.04.2025; accepted for publication on 25.08.2025