

УДК 661.666:539.4

С.В. Ветошкин

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия

А.В. Долгодворов, А.И. Сыромятникова

ОАО «Уральский научно-исследовательский институт
композиционных материалов», Пермь, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ОБЪЕМНОЙ МИКРОСТРУКТУРЫ КОНСТРУКЦИОННОГО УГЛЕРОД-УГЛЕРОДНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА И СОЗДАНИЕ КОМПЬЮТЕРНОЙ 3D-МОДЕЛИ ИССЛЕДУЕМОГО ОБРАЗЦА

Рассмотрен метод рентгеновской компьютерной томографии и применение его в исследовании микроструктуры композиционного материала на предмет дефектов, таких как макро- и микропористости, расслоения, трещины. Описаны основные принципы метода рентгеновской томографии, виды томографического сканирования исследуемых образцов: веерно-лучевой и конусно-лучевой. От выбора схемы сканирования зависит выбор модели вычислительного томографа. Изложены ключевые особенности промышленных томографов, которые позволили бы справиться с поставленной задачей. Описаны области применения и технические характеристики томографов.

Представлен технологический процесс получения пространственно-армированного углерод-углеродного композиционного материала структуры $2D + 1$, выполнен качественный анализ полученного материала. Пространственное армирование композита образовано системой углеродных нитей утка и основы углеродной ткани с последующей прошивкой пакета в перпендикулярном направлении углеродной нитью. Основные технологические этапы формирования углерод-углеродного композита включают следующие технологические операции: получение углепластика, карбонизацию углепластика, пироуплотнение карбонизованного углепластика.

В ходе работы исследованы основные этапы формирования микроструктуры композита, представлены наиболее характерные проекции томограмм с обозначением протяженности дефектов – пустот в материале. По полученным проекциям томограмм смоделирована объемная компьютерная 3D-модель материала. Применено специальное программное обеспечение для обработки изображений и анализа количественных свойств материала с описанием размеров дефектов во всем объеме материала в трех взаимно перпендикулярных плоскостях.

Ключевые слова: метод рентгеновской компьютерной томографии, промышленный вычислительный томограф, веерно-лучевой, конусно-лучевой, углерод-углеродный композиционный материал, микроструктура, дефекты микроструктуры.

S.V. Vetoshkin

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

A.V. Dolgodvorov, A.I. Syromyatnikova

OJSC "Ural Research Institute of Composite Materials", Perm, Russian Federation

RESEARCH OF MICROSTRUCTURE OF STRUCTURAL CARBON-CARBON COMPOSITE AND THE CREATION OF COMPUTER 3D-MODEL OF THE SAMPLE STUDIED

The paper considers an X-ray computer tomography method and its application for studying composite material microstructure to detect such defects as macro- and microporosity, exfoliation and cracks. The basic principles of X-ray tomography and types of computer tomography for sample scanning (fan-beam and cone-beam scanning) are described. Selection of a tomograph model depends on the chosen scheme of scanning. The paper describes key features, field of application and specifications of industrial tomographs that would cope with the assigned task.

Technical process of obtaining spatially reinforced carbon-carbon composite with 2D + 1 structure is presented and structure of carbon composite material is studied. Spatial reinforcement of the composite formed with warp and weft carbon fibers system with following insertion of the package in perpendicular direction by carbon filament. The process of carbon-carbon composite manufacturing consists of preparation of carbon fiber, carbon fiber carbonization, pirocompression of carbonized carbon fiber.

During the study the main formation stages of composite microstructure and most typical projections of tomograms with assigned defect's length (voids in the material) are presented. The material's 3D model is obtained by tomogram projections. For image processing and analysis of the material quantitative properties special software is used. Dimensions of volume defects in three mutually perpendicular planes are shown.

Keywords: method of X-ray computer tomography, computerized industrial tomography, fan-beam, cone-beam, carbon-carbon composite material, microstructure, microstructure defects.

Введение

Детали из композиционных материалов применяются во многих ответственных конструкциях аэрокосмической техники. Необходим качественный и быстрый неразрушающий метод контроля таких деталей на наличие дефектов.

Метод рентгеновской компьютерной томографии применяется для изучения структуры исследуемого объекта во многих отраслях, например таких, как медицина и промышленная дефектоскопия.

Исследуемый образец углерод-углеродного композиционного материала (УУКМ), волокна и матрицы которого созданы из одной и той же фазы, обладает рядом уникальных свойств [1]: сравнительно низкой плотностью, высокой прочностью, стойкостью к окислению (при ис-

пользовании защитных покрытий). Также УУКМ используют при изготовлении наружных корпусов возвращаемых на Землю летательных аппаратов. Особое место среди углерод-углеродных композиционных материалов занимают материалы на основе волокнистого наполнителя структуры 2D + 1 [2].

Требуемые свойства композиционных материалов достигаются только в случае реализации оптимальной структуры и соотношения матрицы и наполнителя [3]. Дефекты в микроструктуре УУКМ последовательно формируются на всех этапах изготовления. Для изучения структуры и возможных дефектов и получения объемной 3D-модели необходимо изучить метод рентгеновской компьютерной томографии, ознакомиться с промышленными томографами, существующими на рынке, и с технологией получения материала, из которого изготовлен образец, что и является задачей предлагаемой работы.

Метод рентгеновской компьютерной томографии

В основе метода рентгеновской компьютерной томографии лежит реконструкция пространственного распределения величины линейного коэффициента ослабления рентгеновского излучения объектом исследования на основе математической обработки теневых проекций [4].

Линейный коэффициент ослабления μ (см^{-1}) любого вещества зависит как от его химического состава и плотности, так и от энергии воздействующего на него излучения. Для фиксированной энергии рентгеновского излучения величина линейного коэффициента ослабления определяется по формуле

$$\mu = \mu_m \cdot \rho, \quad (1)$$

где μ_m – массовый коэффициент ослабления рентгеновского излучения рассматриваемого вещества при той же энергии, $\text{см}^2/\text{г}$; ρ – плотность вещества, $\text{г}/\text{см}^3$.

Для материалов со сложным химическим составом μ_m определяется по формуле

$$\mu_m = \sum \rho_i \cdot \mu_{m_i}, \quad (2)$$

где ρ_i – относительное массовое содержание в материале i -го элемента, имеющего массовый коэффициент ослабления μ_{m_i} .

Рассмотрим два вида томографического сканирования образца: веерно-лучевой и конусно-лучевой.

При веерно-лучевом сканировании коллимированный рентгеновский пучок после прохождения через образец регистрируется линейным детектором. Коллимация необходима для уменьшения влияния рассеивания рентгеновского излучения, которое приводит к появлению дополнительных попадающих в детектор рентгеновских лучей от областей вне пути источник – детектор. Для каждого тонкого слоя объекта снимается ряд профилей линии при постепенном пошаговом повороте образца на 360° с приращениями менее 1° за шаг. Данные профили являются входными данными для численной реконструкции томографического изображения слоя (рис. 1).

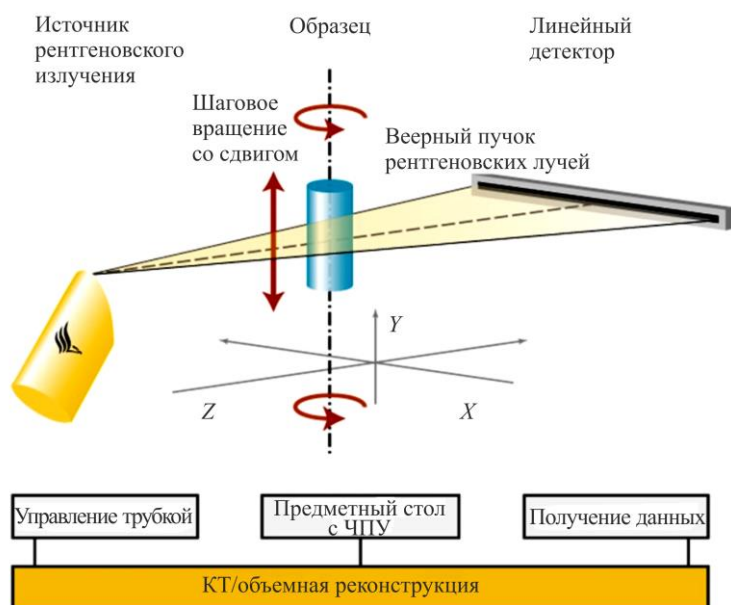


Рис. 1. Схема рентгеновской томографии с веерно-лучевым сканированием

С помощью вертикального перемещения образца по веерному пучку и повторения процедуры создается набор томографических изображений слоев для последующего представления объема.

При конусно-лучевом сканировании получение трехмерных изображений начинается со сбора множества двумерных рентгеновских проекций при постепенном пошаговом повороте образца на 360°

с приращениями менее 1° за шаг. Данные проекции содержат информацию по положению и плотности поглощающего объекта в образце. Собранный набор проекций затем используется для численной реконструкции объемных данных. Данные для всего объекта или его значительной части могут быть собраны за один оборот образца. Как правило, при конусно-лучевом сканировании данные подвержены некоторому размытию и искажению при удалении от центральной плоскости, соответствующей послойному сбору данных. При использовании излучения с более высокой энергией данные могут содержать образовавшиеся в результате рассеивания артефакты. Тем не менее возможность получения данных для множества слоев за один оборот является существенным преимуществом схемы. При этом больше времени уделяется сбору данных в каждом положении образца, что уменьшает шум изображения (рис. 2).

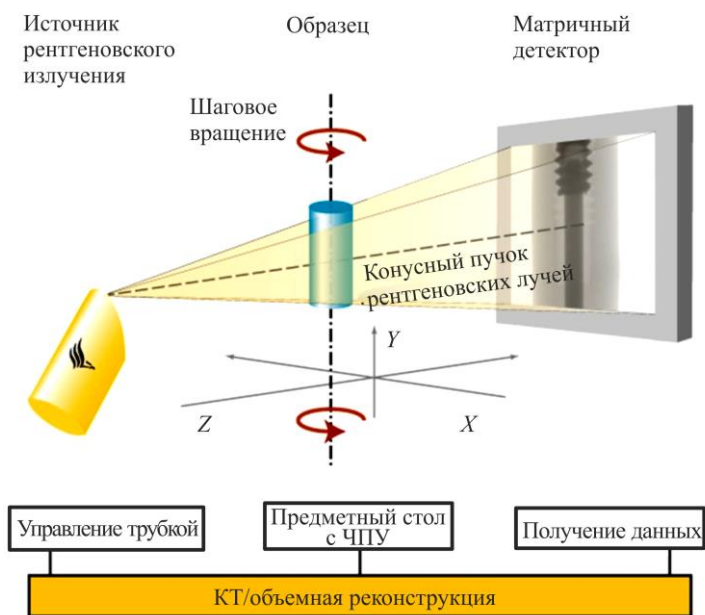


Рис. 2. Схема рентгеновской томографии с конусно-лучевым сканированием

Для точной реконструкции объемных данных глубина и диаметр всего образца в процессе полного оборота на 360° должны оставаться в зоне обзора и конуса (веера) излучения, чтобы весь диаметр образца полностью воспроизводился на каждой проекции или профиле линии

в процессе сбора данных. Поэтому увеличение ограничивается диаметром образца d и шириной детектора D : $M = D/d$. Для размера пиксела детектора P разрешение вокселя будет $V = P \cdot d/D$ (рис. 3).

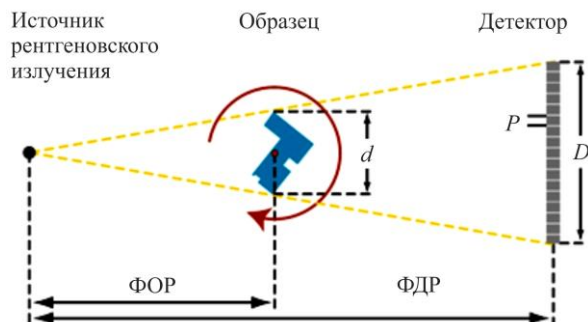


Рис. 3. Определение разрешения вокселя

Выбор схемы сканирования будет обусловлен оптимальным соотношением таких параметров испытаний, как продолжительность сканирования, объем получаемых данных и точность контроля. Для контроля габаритных заготовок предпочтительнее применять веерно-лучевую схему с линейным детектором. При контроле образцов для испытаний и небольших деталей – конусно-лучевую схему с планшетным детектором.

Обзор промышленных томографов

Промышленный вычислительный томограф ВТ-600ХА предназначен для количественного рентгеновского неразрушающего контроля и дефектоскопии внутренней пространственной структуры широкого класса промышленных изделий аэрокосмического назначения (металлических, композитных и комбинированных).

В его задачи входит получение количественных оценок свойств материала с точной пространственной привязкой каждого элемента томограммы.

Ключевые особенности томографа ВТ-600ХА:

- широкий диапазон длин, диаметров и веса контролируемых изделий;
- сочетание рентгеновского источника с ускорителем для просвечивания более 150 мм стали;

- возможность сканирования и реконструкции локальных зон внутри контролируемого сечения;
- высокая чувствительность к локальным дефектам и малым разноточностям в объеме изделий со сложной внутренней структурой;
- высокие пространственное разрешение и точность измерения размеров внутренних структурных элементов при формате томограмм до 2048×2048 ;
- наличие режима многослойного сканирования и 3D-реконструкции;
- наличие режима цифровой рентгенографии;
- оригинальное программное обеспечение;
- специализированное метрологическое обеспечение.

Принцип работы вычислительного томографа ВТ-600ХА основан на реконструкции и визуализации внутренней структуры тонких слоев контролируемых изделий посредством совместной вычислительной обработки набора теневых проекций, полученного при рентгеновском просвечивании объекта контроля в различных направлениях.

Технические характеристики томографа ВТ-600ХА:

Максимальный диаметр объекта контроля, мм	600
Максимальный вес объекта контроля, кг	300
Диаметр рабочего поля томограммы, мм	20–600
Эффективная толщина контролируемого слоя, мм	0,5–2
Геометрическая чувствительность контроля, мм	0,05
Чувствительность к произвольно ориентированным трещинам, мм	0,05
Максимальное напряжение рентгеновской трубки, кВ	450 (Fe – 150 мм; Al – 200 мм; Mg – 300 мм)
Максимальная энергия ускоренных электронов	5 МэВ (Fe – 150 мм; Al – 460 мм; Mg – 700 мм)
Минимальное время сканирования и реконструкции томограммы на поле 600 мм, мин	3
Диапазон перемещения положения контролируемого сечения по высоте, мм	1000
Среднеквадратичная погрешность измерения отклонения плотности, %	0,5
Время замены рентгеновского источника на ускоритель, мин	0,5
Число элементов в реконструируемых томограммах	от 1024×1024 до 2048×2048

Микрофокусная система компьютерной рентгеновской томографии кабинетного типа v|tome|x L 240 ориентирована прежде всего на проведение промышленных трехмерных КТ-исследований и двухмер-

ной инспекционной проверки электронных устройств, литевых заготовок, сварных швов и иных объектов. Благодаря тому, что для изготовления стенок кабинета v|tome|x L 240 используется многослойный свинцовый прокат, оператор не подвергается воздействию облучения в процессе выполнения исследований. Рентгеновские трубки и цифровой детектор располагаются на массивной гранитной станине, что позволяет исключить возникновение вибраций и смещений объекта вследствие ее теплового расширения.

Основной сферой применения v|tome|x L 240 является неразрушающее исследование деталей сложной формы и поиск дефектов (трещин, пустот). Детектор высокого разрешения позволяет работать с деталями, при производстве которых требуется строгое соблюдение заданных параметров, например с турбинными лопатками.

Ключевые особенности томографа v|tome|x L 240:

- микрофокусная рентгеновская трубка (240 кВ / 320 Вт) открытого типа с защитой от перегрева;
- цифровой детектор обладает широким динамическим диапазоном и оснащен системой температурной стабилизации;
- наличие двух рентгеновских трубок (нанофокусной 180 кВ и микрофокусной 240 кВ) позволяет проводить широкий спектр исследований;
- катоды излучающих элементов выполнены по технологии, обеспечивающей 10-кратное увеличение срока службы;
- входящее в комплект программное обеспечение предоставляет возможность проведения высокоточных 3D-метрологических исследований.

Технические характеристики томографа v|tome|x L 240:

Максимальные размеры объекта контроля (высота × диаметр), мм	350 × 250
Максимальная масса объекта контроля, кг	10
Предельное разрешение в режиме томографии (3D), мкм	4
Максимальное напряжение рентгеновской трубки, кВ	240
Максимальная мощность рентгеновской трубки, Вт	320
Скорость сбора данных	до 500 проекций за 10 мин
Скорость реконструкции	от 12 до 48 мин параллельно со сбором данных

Система рентгеноскопической и компьютерной томографии Metris X-Tek XT H 225 + 320 LC ориентирована на количественный неразру-

шающий анализ и контроль дефектов внутренней структуры широкого класса промышленных изделий, электронных устройств, литьевых заготовок, сварных швов и иных объектов. Рентгеновские трубки и цифровой детектор располагаются на массивной гранитной станине, что позволяет исключить возникновение вибраций и смещений объекта вследствие ее теплового расширения.

Основной сферой применения Metris X-Tek является неразрушающее исследование деталей и определение с высокой точностью (до 0,5 мкм) размеров и местоположения дефектов.

Ключевые особенности томографа Metris X-Tek XT H 225 + 320 LC:

- широкий диапазон цифрового разрешения изображения;
- возможность интерактивной визуализации;
- возможность анализа внутренней структуры объекта;
- повышенная безопасность, не требующая специальных мер предосторожности (соответствует стандарту радиационной безопасности DIN54113);
- мощный программный комплекс для обработки данных;
- интегрированный источник питания, не требующий наличия кабеля высокого напряжения;
- вращающаяся отражающая мишень со скоростью 6000 об/мин, что способствует равномерному распределению тепла и предотвращению выжигания мишени;
- регулируемый диаметр фокусного пятна рентгеновского луча до 0,5 мкм;
- максимальная величина ускоряющего напряжения в трубке от 100 до 450 кВ, в зависимости от типа системы.

Технические характеристики томографа Metris X-Tek XT H 225 + 320 LC:

Напряжение рентгеновской трубки, кВ	30–320
Максимальная мощность рентгеновской трубки, Вт	225, 320
Системное увеличение	300 ^x
Разрешение, мкм	<20
Число осей манипулятора	4
Максимальная масса образца, кг	50
Перемещение рабочего стола, мм	600×600×600
Диаметр и высота объекта при построении КТ, мм	300×600
Максимальная толщина стенок по всем сечениям образца при реконструкции КТ, мм	Сталь – 33 Алюминий – 110
Внешние габариты, мм	3240×1590×2500
Масса системы, кг	8000

Выбор оборудования для исследования объемной микроструктуры

Выбор томографа и схемы сканирования будет обусловлен оптимальным соотношением таких параметров испытаний, как продолжительность сканирования, объем получаемых данных, точность контроля и программный комплекс для обработки данных. Для контроля габаритных заготовок предпочтительнее применять веерно-лучевую схему с линейным детектором, реализуемую, например, на промышленном вычислительном томографе BT-600XA. При контроле образцов для испытаний и небольших деталей используют конусно-лучевую схему, реализуемую в системах компьютерной томографии v|tome|x s 240 и Metris X-Tek XT H 225 + 320 LC. Томографы v|tome|x s 240 и Metris X-Tek XT H 225 + 320 LC обладают современным компьютерным комплексом для обработки результатов с полученных томограмм и проведения количественного анализа.

Для исследования образца была выбрана конусно-лучевая схема на томографе Metris X-Tek XT H 225 + 320 LC с последующей компьютерной обработкой в программном комплексе Inspec-X.

Методика получения материала

Основные технологические переделы при изготовлении УУКМ включают следующие этапы: получение углепластика, карбонизацию углепластика, высокотемпературную обработку карбонизованного углепластика, получение УУКМ. Технологические режимы процессов выбраны на основе имеющихся рекомендаций для процессов уплотнения пироуглеродом вакуумным изотермическим методом карбонизованных материалов с волокнистыми наполнителями при разработке углеродной основы под силицирование [5].

В работе проведено исследование микроструктуры УУКМ структуры 2D + 1 при получении углепластика и при последующей термохимической обработке, включающей карбонизацию при 850 °С, высокотемпературную обработку при 1850 °С и уплотнение пиролитическим углеродом. Исследовано формирование макро- и микропористой структуры композита [6], образования межфазных дефектов, сегментных трещин и областей микрорасслоений [7] на различных этапах термохимической обработки, а также особенности газофазного гетерогенного осаждения пироуглерода вакуумно-изотермическим методом на заключительном этапе получения УУКМ [8].

В качестве армирующей системы были использованы ткановыкладочно-прошивные каркасы на основе высокомодульной углеродной ткани полотняного переплетения, наработанной из экс-ПАН-волокон УКН по основе и утку ткани.

Образец углепластика получен методом пресс-камерного формирования каркасов, предварительно пропитанных термореактивным фенолформальдегидным связующим и последующей полимеризацией с выдержкой при конечной температуре 130 °С в течение 10 ч.

Карбонизация углепластика проведена в защитной атмосфере азота с выдержкой при конечной температуре 900 °С в течение 8 ч; высокотемпературная термообработка проведена в вакууме (остаточное давление не более 1 мм рт. ст.) при конечной температуре 1850 °С в течение 3 ч; уплотнение пироуглеродом вакуумно-изотермическим методом проведено при температуре 950–1050 °С в течение 360 ч с использованием в качестве газа-реагента сетевого газа [9].

Используемая в данной работе структура каркаса 2D + 1 (рис. 4) со схемой укладки 0/90 позволяет получить ортогонально изотропный композиционный материал, характеризующийся наличием в каждом элементарном объеме трех взаимно перпендикулярных плоскостей симметрии свойств.

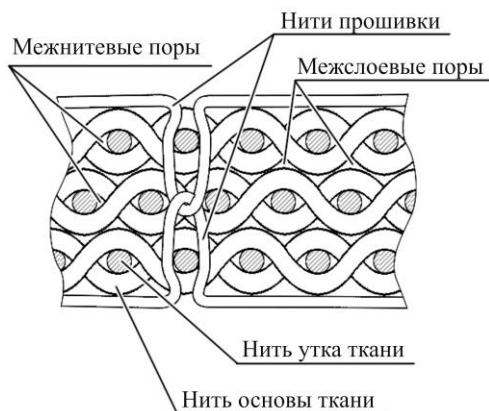


Рис. 4. Схема каркаса структуры 2D + 1

На рис. 4 изображена структура углеродного каркаса, которая представляет собой сложную систему, состоящую из нитей основы и утка исходной ткани, нитей прошивки, межнитевых и межслоевых пор, а также пор, образованных в результате прошивки по третьей координате.

Методика проведения эксперимента и обсуждение полученных результатов

В качестве предмета исследования структуры материала были использованы образцы углепластика, полученные по приведенной выше технологии.

Образцы вырезаны механическим путем, размером 100×20 мм и толщиной 3 мм. Исследование микроструктуры проводилось на томографе Metris X-Tek XT H 225 + 320 LC.

Образец был закреплен в держателе-манипуляторе шлифованной торцевой поверхностью вниз.

Для получения более точного представления о структуре сканируемой заготовки выполнялось предварительное рентгеновское сканирование. Получение обзорной рентгенограммы заготовки производилось для определения параметров режима сканирования. Дальнейшее послойное сканирование проводилось в режиме «Серия» с автоматическим управлением передвижением рабочего стола по высоте (Z) с заданным шагом 0,3 мм.

Передача данных велась в двух вариантах реконструкции – высокочастотной и взвешенной суммы (суммы значений низкочастотной и высокочастотной рентгенограмм). Точность сканирования сечений (XY) составляла 0,01 мм.

После завершения сканирования и получения изображений томограмм в графическом формате *.bmr был проведен импорт данных в программный комплекс Inspect-X.

На рис. 5, *а–в* представлены проекции томограмм образцов углепластика, в структуре которых были замечены дефекты (межниточные расслоения). Для структуры материала характерна плотная, равномерная укладка углеродных нитей с образованием небольшого количества некрупных межниточных пор (макропор) удлиненной формы. Как показано на рис. 5, *а*, в горизонтальной проекции, максимальная длина расслоения составляет 3,95 мм, ширина – 0,28 мм, на рис. 5, *в* длина – 4,25 мм, ширина – 0,16 мм. На рис. 5, *б* изображен пример разряженной укладки нитей основы и утка материала с максимальным размером дефекта $1,73 \times 2,16$ мм.

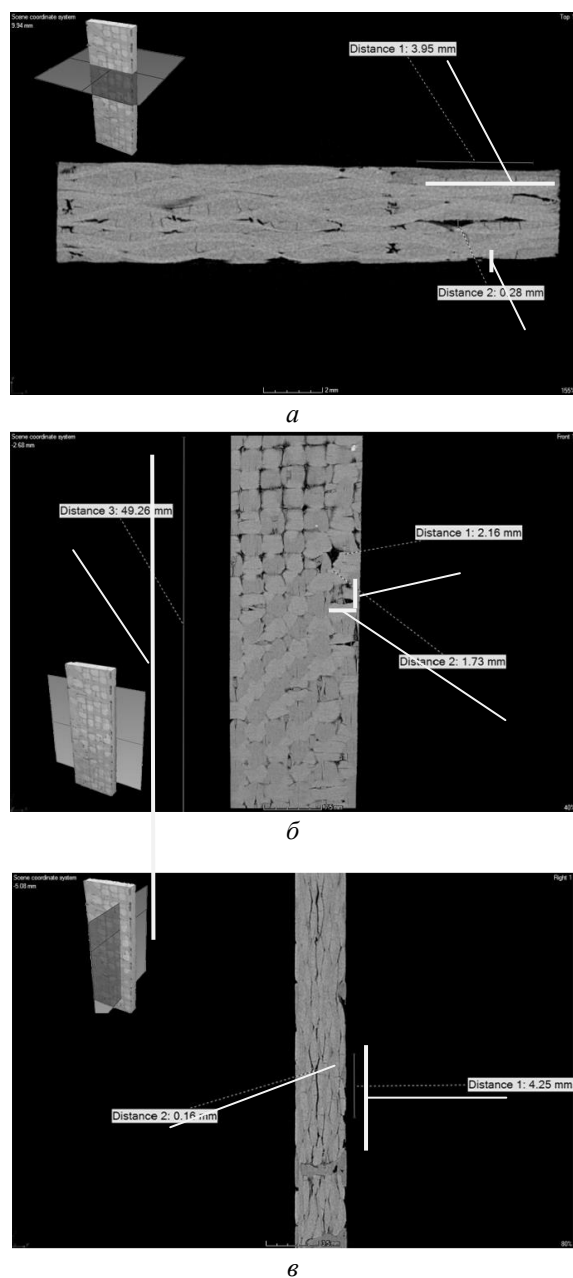
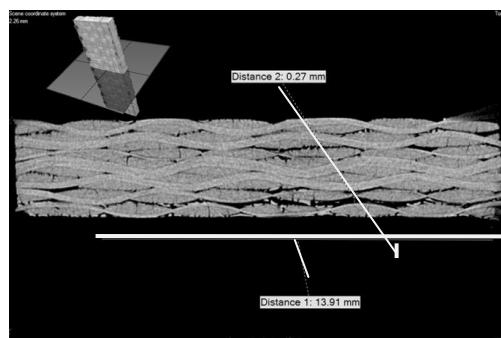


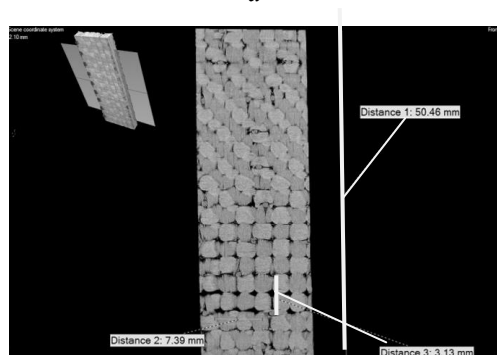
Рис. 5. Набор проекций томограмм образцов углепластика

Микроструктура карбонизованного углепластика (рис. 6, *a–в*) представляет собой систему плотно и равномерно расположенных углеродных нитей с образованием большого количества протяженных межниточных пор (макропор) на границе нитей основы и утка ткани.

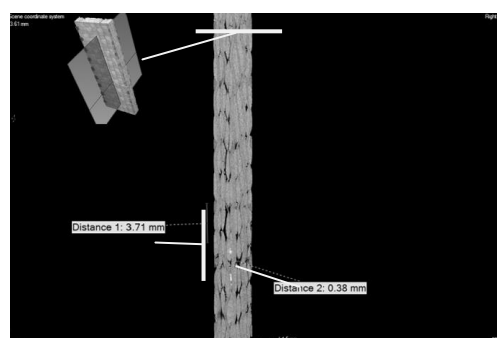
По толщине образца в поперечных нитях наблюдаются сегментные поры, которые делят нити на сегменты. В глубине материала наблюдаются участки с неплотной, разреженной укладкой филаментов.



a



б

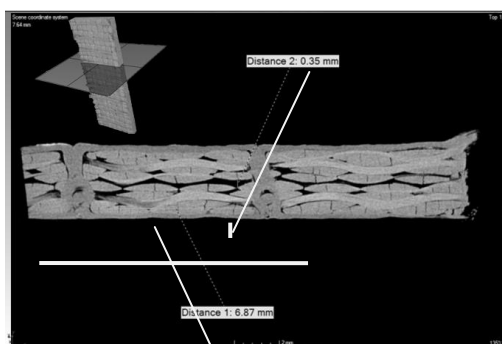


в

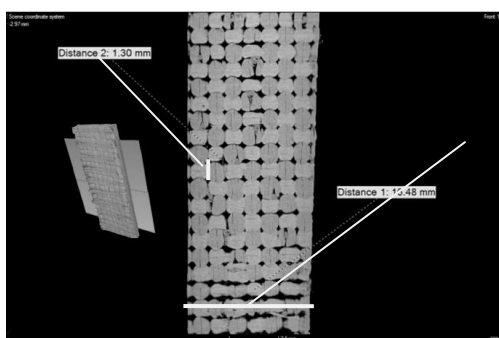
Рис. 6. Набор проекций томограмм образцов карбонизованного углепластика

Отличие микроструктуры углепластика от карбонизованного углепластика обусловлено термодеструкцией матрицы, сопровождаемой процессами усадки и образованием пор [10].

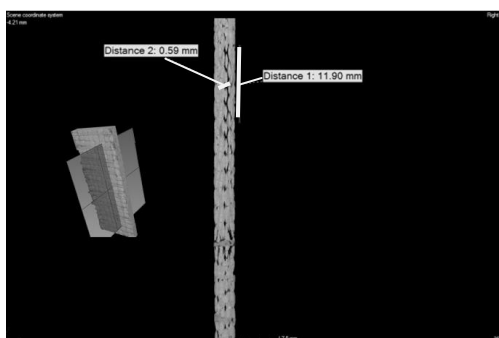
Особенностью процесса газофазного гетерогенного осаждения пироуглерода является равномерное заполнение пор материала по толщине, необходимое для обеспечения транспорта газа-реагента в срединные слои заготовки [11]. Таким образом, поры, образованные в процессе карбонизации, способствуют повышению равномерности распределения пироуглеродной матрицы в объеме материала [12].



a



б



в

Рис. 7. Набор проекций томограмм образцов карбонизованного углепластика, уплотненного пироуглеродом

На рис. 7, *a–в* представлена микроструктура карбонизованного углепластика, уплотненного пироуглеродом. Для структуры материала характерна плотная укладка углеродных нитей. По периметру межнитечных макропор имеется слой пироуглерода толщиной до 8–12 мкм. Распределение пироуглерода уменьшается от границ к центру, а распределение кокса и пироуглерода внутри нитей материала неравномерно.

По полученным проекциям томограмм в программном комплексе Inspect-X была смоделирована объемная 3D-модель образца УУКМ (рис. 8). Данная модель позволит получить векторное изображение томограммы в заданном сечении, что даст возможность сделать качественную оценку структуры материала, а также определить необходимые размеры ее элементов.

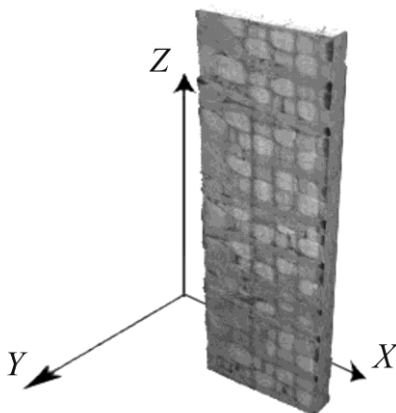


Рис. 8. Объемная компьютерная 3D-модель образца

Заключение

Проведен анализ формирования микроструктуры углерод-углеродного композиционного материала структуры 2D + 1. Материал получен из высокомодульного волокна плотняного переплетения, с последующей термохимической обработкой и карбонизацией при 850 °С и дальнейшим уплотнением заготовки пироуглеродом. Исследование образца выполнено методом рентгеновской компьютерной томографии с применением промышленного вычислительного томографа Metris X-Tek XT H 225 + 320 LC. Описаны основные этапы формирования микроструктуры композиционного материала. Представле-

ны наиболее характерные проекции томограмм, полученные методом послойного рентгеновского сканирование образцов, с обозначением протяженности межфазных дефектов – пустот, сегментных трещин, областей микрорасслоений. Получены рентгеновские данные серии сечений-проекций томограмм в формате *.bmp и объемная 3D-модель в формате *.max.

Библиографический список

1. Sokolkin Yu.V., Chekalkin A.A., Kotov A.G. A structural multiscale approach to the design of spatially reinforced carbon-carbon composites // *Mechanics of Composite Materials*. – 1995. – Vol. 31, № 2. – P. 143–148.
2. Morgan P. Carbon fibers and their composites. – New Western: Tailor&Francis group, 2005. – 1131 p.
3. Черноус Д.А., Шилько С.В., Панин С.В. Анализ механического поведения дисперсно-армированного нанокompозита. Метод расчета эффективных упругих характеристик // *Физическая мезомеханика*. – 2010. – Т. 13, № 4. – С. 85–90.
4. Хозяинов М.С., Козорезов Е.В. Неразрушающий анализ структуры минеральных образований с использованием рентгеновского компьютерного микротомографа / ВНИИГеоинформсистем. – М., 1996. – 71 с.
5. Докучаев А.Г., Бушуев В.М. Выбор технологических параметров процесса уплотнения пироуглеродом вакуумным изотермическим методом карбонизованного углепластика при разработке углеродной основы под силицирование // *Перспективные материалы*. – 2010. – № 9а. – С. 58–64.
6. Соколкин Ю.В., Чекалкин А.А., Бабушкин А.В. Прогнозирование физических и механических свойств порошковых и армированных высокопрочными волокнами металлических материалов // *Известия вузов. Цветная металлургия*. – 1995. – № 2. – С. 53–57.
7. Макарова Е.Ю., Соколкин Ю.В., Чекалкин А.А. Структурно-феноменологические модели прогнозирования упругих свойств высокопористых композитов // *Вестник Самар. гос. техн. ун-та. Физико-математические науки*. – 2010. – № 5 (21). – С. 276–279.
8. Features of powder material deformation with cyclic loading / V.N. Antsiferov, A.V. Babushkin, Yu.V. Sokolkin, A.A. Shatsov, A.A. Che-

kalkin // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. – 2001. – Vol. 40, № 11–12. – P. 569–572.

9. Long-term durability of glass-fiber-reinforced composites under operation in pulp and reactant pipelines / A.A. Chekalkin, A.V. Babushkin, A.G. Kotov, S.E. Shakleina // Mechanics of Composite Materials. – 2003. – Vol. 39, № 3. – P. 273–282.

10. Sokolkin Yu.V., Kotov A.G., Chekalkin A.A. Structural multi-stage model of the bearing capacity of carbon-carbon laminate shells // Mechanics of Composite Materials. – 1994. – Vol. 30, № 1. – P. 55–60.

11. Sokolkin Yu.V., Postnykh A.M., Chekalkin A.A. Probabilistic model of the strength, crack resistance, and fatigue life of a unidirectionally reinforced fibrous composite // Mechanics of Composite Materials. – 1992. – Vol. 28, № 2. – P. 133–139.

12. Postnykh A.M., Chekalkin A.A., Khronusov V.V. Structural-statistical model of the reliability and durability of a fiber composite // Mechanics of Composite Materials. – 1991. – Vol. 26, № 5. – P. 633–637.

References

1. Sokolkin Yu.V., Chekalkin A.A., Kotov A.G. A structural multiscale approach to the design of spatially reinforced carbon-carbon composites. *Mechanics of Composite Materials*, 1995, vol. 31, no. 2, pp. 143–148.

2. Morgan P. Carbon fibers and their composites. New Western: Taylor&Francis group, 2005. 1131 p.

3. Chernous D.A., Shilko S.V., Panin S.V. Analiz mekhanicheskogo povedeniya dispersno-armirovannogo nanokompozita. Metod rascheta effektivnykh uprugikh kharakteristik [Analysis of the mechanical behavior of particulate-reinforced nanocomposite. Method of calculating the effective elastic characteristics]. *Fizicheskaya mezomekhanika*, 2010, vol. 13, no. 4, pp. 85–90.

4. Khozyainov M.S., Kozorezov E.V. Nerazrushayushchiy analiz struktury mineralnykh obrazovaniy s ispolzovaniem rentgenovskogo kompyuternogo mikrotomografa [Non-destructive analysis of the structure of mineral formations using X-ray computer microtomograph]. Moscow: VNIIGeoinformsistem, 1996. 71 p.

5. Dokuchaev A.G., Bushuev V.M. Vybor tekhnologicheskikh parametrov protsessa uplotneniya pirouglerodom vakuumnym izotermicheskim metodom karbonizovannogo ugleplastika pri razrabotke uglerodnoy osnovy

pod silitsirovanie [Selection process parameters pyrocarbon seal vacuum isothermal method carbonized carbon fiber in the development of the carbon substrate under siliconising]. *Perspektivnye materialy*, 2010, no. 9a, pp. 58-64.

6. Sokolkin Yu.V., Chekalkin A.A., Babushkin A.V. Prognozirovanie fizicheskikh i mekhanicheskikh svoystv poroshkovykh i armirovannykh vysokoprochnymi voloknami metallicheskih materialov [Prediction of physical and mechanical properties of powder and reinforced with high-strength fibers of metallic materials]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Tsvetnaya metallurgiya*, 1995, no. 2, pp. 53-57

7. Makarova E.Yu., Sokolkin Yu.V., Chekalkin A.A. Strukturno-fenomenologicheskie modeli prognozirovaniya uprugikh svoystv vysokoporiistyykh kompozitov [Structural-phenomenological models predict the elastic properties of highly porous composites]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Fiziko-matematicheskie nauki*, 2010, no. 5 (21), pp. 276-279.

8. Antsiferov V.N., Babushkin A.V., Sokolkin Yu.V., Shatsov A.A., Chekalkin A.A. Features of powder material deformation with cyclic loading. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 2001, vol. 40, № 11-12, pp. 569-572.

9. Chekalkin A.A., Babushkin A.V., Kotov A.G., Shakleina S.E. Long-term durability of glass-fiber-reinforced composites under operation in pulp and reactant pipelines. *Mechanics of Composite Materials*, 2003, vol. 39, no. 3, pp. 273-282.

10. Sokolkin Yu.V., Kotov A.G., Chekalkin A.A. Structural multi-stage model of the bearing capacity of carbon-carbon laminate shells. *Mechanics of Composite Materials*, 1994, vol. 30, no. 1, pp. 55-60.

11. Sokolkin Yu.V., Postnykh A.M., Chekalkin A.A. Probabilistic model of the strength, crack resistance, and fatigue life of a unidirectionally reinforced fibrous composite. *Mechanics of Composite Materials*, 1992, vol. 28, no. 2, pp. 133-139.

12. Postnykh A.M., Chekalkin A.A., Khronusov V.V. Structural-statistical model of the reliability and durability of a fiber composite. *Mechanics of Composite Materials*, 1991, vol. 26, no. 5, pp. 633-637.

Получено 15.03.2014

Об авторах

Ветошкин Сергей Викторович (Пермь, Россия) – студент 4-го курса кафедры «Механика композиционных материалов и конструкций» ФГБОУ ВПО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: sega-w92@mail.ru).

Долгодворов Александр Викторович (Пермь, Россия) – инженер-конструктор ОАО «Уральский научно-исследовательский институт композиционных материалов» (614000, г. Пермь, ул. Новозвягинская, 57, e-mail: sanya_dvor@mail.ru).

Сыромятникова Александра Игоревна (Пермь, Россия) – начальник сектора отдела материаловедения ОАО «Уральский научно-исследовательский институт композиционных материалов» (614000, г. Пермь, ул. Новозвягинская, 57).

About the authors

Vetoshkin Sergey Victorovich (Perm, Russian Federation) – 4-th year student, Department of Mechanics of Composite Materials and Constructions, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: sega-w92@mail.ru).

Dolgodvorov Aleksandr Viktorovich (Perm, Russian Federation) – Constructor Engineer of OJSC “Ural Research Institute of Composite Materials” (57, Novozvyaginskaya st., Perm, 614000, Russian Federation, e-mail: sanya_dvor@mail.ru).

Syromyatnikova Aleksandra Igorevna (Perm, Russian Federation) – Head of Sector Materials of OJSC “Ural Research Institute of Composite Materials” (57, Novozvyaginskaya st., Perm, 614000, Russian Federation).