

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Поздеева Т.Ю., Порозова С.Е., Лебедева А.С. Особенности исследования магнитного структурирования литых композиционных углерод-керамических материалов // Вестник ПНИПУ. Машиностроение. Материаловедение. – 2022. – Т. 24, № 2. – С. 23–31. DOI: 10.15593/2224-9877/2022.2.03

Please cite this article in English as:

Pozdeeva T.Yu., Porozova S.E., Lebedeva A.S. Features of the study of magnetic structuring of cast composite carbon-ceramic materials. *Bulletin of PNRPU. Mechanical engineering, materials science*. 2022, vol. 24, no. 2, pp. 23-31. DOI: 10.15593/2224-9877/2022.2.03

ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение
Т. 24, № 2, 2022
Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science
<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

Научная статья

DOI: 10.15593/2224-9877/2022.2.03

УДК 544.032.53

Т.Ю. Поздеева¹, С.Е. Порозова¹, А.С. Лебедева²

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

²Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия

**ОСОБЕННОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ МАГНИТНОГО СТРУКТУРИРОВАНИЯ
ЛИТЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ УГЛЕРОД-КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ**

Описана концепция создания и управления анизотропией материалов с помощью магнитных полей как перспективный метод управления структурой и конечными свойствами композитов. Образцы углерод-керамического композиционного материала получали методом шликерного литья под сверхнизким постоянным магнитным полем (5–10 мкТл) с дальнейшим искровым плазменным спеканием в вакууме при температуре 1200 °С с выдержкой в течение 5 мин и давлением прессования 2,6/6,2 кН. В качестве исходного сырья использовали высокодисперсный порошок диоксида титана (ТУ 31-10-020-90, ООО «Композит») и многостенные углеродные нанотрубки торговой марки «Таунит-М» («НаноТехЦентр», г. Тамбов), в качестве связки – поливиниловый спирт (ПВС). Для визуализации прохождения линий магнитного поля через литейный канал формы при различном расположении магнитов были дополнительно получены образцы с добавлением микронного железного порошка как ферромагнетика. Показано, что возможно использование комбинаций в расположении магнитов относительно литейного канала с целью получения различного распределения наполнителя в объеме матриц для применения в приборо- и машиностроении. Исследования структуры образцов проводили методами сканирующей электронной микроскопии, микрорентгеноструктурного анализа, рентгеновской компьютерной томографии. Результаты сканирующей электронной микроскопии показали, что под воздействием слабого магнитного поля углеродные нанотрубки собираются в агломераты, которые вытягиваются от одного полюса к другому по объему всего образца. Исследования методом компьютерной томографии не позволили провести дифференциацию углеродных нанотрубок и пор в керамической матрице из-за слабо выраженного фазового контраста.

Ключевые слова: анизотропия, многостенные углеродные нанотрубки, углерод-керамический шликер, постоянное магнитное поле, искровое плазменное спекание, сканирующая электронная микроскопия, рентгеновская компьютерная томография, фазовый контраст, карты распределения фаз.

T.Yu. Pozdeeva¹, S.E. Porozova¹, A.S. Lebedeva

¹Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

²Perm State National Research University, Perm, Russian Federation

**FEATURES OF THE STUDY OF MAGNETIC STRUCTURING
OF CAST COMPOSITE CARBON-CERAMIC MATERIALS**

The paper describes the concept of creating and controlling the anisotropy of materials using magnetic fields as a promising method for controlling the structure and final properties of composites. Samples of carbon-ceramic composite material were obtained by slip casting under an ultra-low constant magnetic field (5–10 μT) with further spark plasma sintering in vacuum at a temperature of 1200 °C with a holding time of 5 minutes and a pressing pressure of 2.6/6.2 kN. Highly dispersed titanium dioxide powder (TU 31-10-020-90, LLC "Composite") was used as a feedstock, polyvinyl alcohol (PVA) and multi-walled carbon nanotubes of the trademark "Taunit-M" ("NanoTechCenter", Tambov) were used as a binder. To visualize the passage of magnetic field lines through the casting channel with different arrangement of magnets, samples were additionally obtained with the addition of micron iron powder as a ferromagnet. It is shown that it is possible to use various combinations in the arrangement of magnets relative to the casting channel, in order to obtain a different distribution of the filler in the volume of matrices for various applications in instrumentation and mechanical engineering. The structure of the samples was studied by scanning electron microscopy, X-ray microanalysis, X-ray computed tomography. The results of scanning electron microscopy showed that under the influence of a weak magnetic field, carbon nanotubes are assembled into agglomerates, which are stretched from one pole to another throughout the entire sample. Computed tomography studies did not allow differentiation of carbon nanotubes and pores in the ceramic matrix due to a weakly pronounced phase contrast.

Keywords: anisotropy, multi-walled carbon nanotubes, carbon-ceramic slip, constant magnetic field, spark plasma sintering, scanning electron microscopy, X-ray computed tomography, phase contrast, phase distribution maps.

Введение

Разработка и производство анизотропных нанокompозитов становятся все более актуальным направлением в материаловедении, так как данный тип материалов дает возможность улучшения и адаптации свойств для узкоспециализированного применения.

Одним из вариантов достижения анизотропии является ориентация дисперсной фазы в композитах. Известно о выравнивании наполнителей в матричном объеме материала химическими и механическими методами, а также под воздействием электрических полей [1–3]. Однако данные методы имеют различные ограничения. Например, применение электрических полей ограничено в связи с электропроводностью матричного материала и наполнителей.

Перспективной альтернативой для структурирования композиционных материалов стало использование магнитных воздействий [2; 4]. Преимущества магнитного структурирования заключаются в том, что магнитные поля неинвазивны, поэтому структурная целостность образцов сохраняется на протяжении всего процесса. Применение магнитного поля различной природы и конфигурации (однородное или неоднородное, вращающееся или колеблющееся, постоянное или переменное и т.д.) допускает множество вариаций конечных структур. Дополнительно можно варьировать результат с помощью типа магнетизма самих материалов, который зависит от магнитной восприимчивости (диамагнитный, парамагнитный и т.д.). Известно также, что магнитные поля не так чувствительны к изменениям поверхности и pH, как электрические, и не вызывают химических изменений, что позволяет применять их в более широком спектре материалов [5].

Магнитное структурирование можно реализовать и в углерод-керамических композиционных материалах, поскольку углеродные нанотрубки (далее УНТ) также могут выполнять роль анизотропных частиц с высоким соотношением сторон. Так, в работе [6] в результате механического выравнивания УНТ получили анизотропную электропроводность.

Выравнивание углеродных нанотрубок в составе какого-либо композиционного материала имеет огромный потенциал для их практического использования в качестве наноматериала, в котором объемные свойства, такие как предел прочности, модуль изгиба, проводимость, зависящие от осевого направления нанотрубки, могут быть усилены выравниванием с помощью магнитных полей.

По своей природе УНТ обладают большой отрицательной магнитной восприимчивостью, что в свою очередь, говорит об их диамагнитных свойствах. Предположительно диамагнетизм обуслов-

лен протеканием электронных токов по их окружности. Несмотря на то что магнитная восприимчивость не зависит от пространственной ориентации образца, достаточно большое значение ее величины свидетельствует о том, что в одном из направлений она сравнима с идентичным значением для графита. Зависимость магнитной восприимчивости нанотрубок от температуры заметно отличается по своему характеру от других форм состояния углерода [7]. Однако стоит учитывать магнитную восприимчивость не только наполнителя, но и матричного материала, который является основной средой в композите, что может значительно влиять на объемное структурирование.

Анализ литературы показал, что выравнивания УНТ по силовым линиям магнитного поля добиваются различными методами, например, использованием модифицированных нанотрубок с присоединенными атомами металлов – магнетита/маггемита (Fe_3O_4 ; $\text{FeO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$), приложением сильных магнитных полей или выращиванием сразу ориентированных УНТ на специальных подложках в процессе синтеза проводящих пленок для микроэлектроники (так называемый «лес» нанотрубок). На намагничивание могут оказывать влияние и частицы металлов катализаторов, используемых при синтезе нанотрубок [8]. Значительным прорывом явились исследования [9], которые продемонстрировали ориентацию одностенных УНТ с использованием очень слабых магнитных полей и позволили установить, что в определенных условиях физические манипуляции возможны с помощью достаточно простого оборудования.

Большинство работ по магнитному структурированию углеродных нанотрубок проводится в полимерных [10–12], аморфных или металлических материалах [13], тогда как исследований по магнитному выравниванию в объеме керамической матрицы недостаточно, однако применение магнитного поля с целью микропаттернирования нанотрубок в керамике может оказать влияние на механизм брифинга трещин и, соответственно, на степень трещиностойкости, а также, как следствие, на характер работоспособности композита.

Одним из наиболее распространенных методов приложения магнитного поля является заливка УНТ-содержащего материала на подложку, которая помещается рядом с магнитом. Пока материал сохнет, УНТ выравниваются в направлении магнитного поля. В этом случае, в отличие от электрического поля, которое перемещает УНТ, магнитное поле только переориентирует их. Напряженность магнитного поля и размер образца являются ограничивающими параметрами данного метода [2].

Вышеизложенный принцип можно использовать не только при синтезе покрытий или в пле-

ночных технологиях (2D-материалы), но и при получении объемных компактов (3D). Например, в исследовании [14] на основе диоксида титана с углеродными нанотрубками была структурирована пленка на плоской подложке под однородным горизонтальным магнитным полем. В работе [15] была показана возможность магнитного структурирования армирующих частиц в виде стержней в объемных материалах с помощью сверхмалых магнитных полей (1–10 мТл) для производства синтетических композитов с заданной трехмерной ориентацией. С помощью данного метода возможно получение множеств структур, что приведет к созданию композитов с локальным упрочнением, износостойкостью и эффектами памяти формы.

На сегодняшний день возможно развитие и дальнейшее применение технологии синтеза порошковых наноматериалов с управляемой микроструктурой с помощью шликерного литья керамики с дополнительным магнитным воздействием и дальнейшей термообработкой. Шликерное литье керамики под магнитным воздействием позволяет выравнивать керамические зерна по предпочтительным кристаллографическим направлениям, тем самым создавая контролируемую структуру. Установлено, что керамика, независимо от химического состава, демонстрирует улучшенные свойства в результате структурирования [16].

С целью исследования возможности многостенных углеродных нанотрубок (МУНТ) выстраиваться по силовым линиям магнитного поля в процессе гелевого литья углерод-керамического материала проведена серия экспериментов на объемных образцах, полученных при различных конфигурациях расположения магнитов.

Исследование структуры образцов осуществлено с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) и рентгеновской компьютерной томографии (КТ). В проведенном исследовании предпринята попытка зафиксировать не только

плоскостное, но и объемное структурирование после слабого магнитного воздействия, что является весьма специфичной и нетривиальной задачей.

Ключевые достоинства КТ в сравнении с традиционной рентгенографией, – это съемка не одного, а нескольких снимков под различными углами с более высокой чувствительностью и точностью измерений геометрических соотношений, отсутствие теневых наложений на изображении, а также определение с помощью математических методов плотностей исследуемых веществ материала в наборе сечений [17; 18]. С помощью микрофокусного компьютерного томографа данные могут быть получены с высоким разрешением, даже на субмикронном уровне. Это делает компьютерную томографию ценным инструментом в исследовании материалов, особенно при анализе композитных материалов и их внутренней структуры [19; 20].

Экспериментальная часть

В качестве исходного углеродсодержащего сырья использовали многостенные углеродные нанотрубки (МУНТ) торговой марки «Таунит-М» (ООО «НаноТехЦентр», г. Тамбов). Основу образцов формировали из субмикронного керамического порошка диоксида титана (ТУ 31-10-020-90, ООО «Композит») со средним размером частиц 200–250 нм. Содержание углеродных нанотрубок составляло 0,2 масс. %.

Углерод-керамический шликер получали ультразвуковым смешиванием на установке УЗДН-2Т в течение 5 мин с внешним охлаждением углеродсодержащей суспензии. Перед введением МУНТ в состав шликера, нанотрубки предварительно подвергли ультразвуковой эксфолиации также на установке УЗДН-2Т в течение 30 мин в водном растворе смеси неионогенного поверхностно-активного вещества Tween-80 (0,5 масс. %) и поливинилового спирта (3–4 масс. %) с внешним охлаждением. Соотношение жидкой и твердой фаз в шликере 1:2 [21].

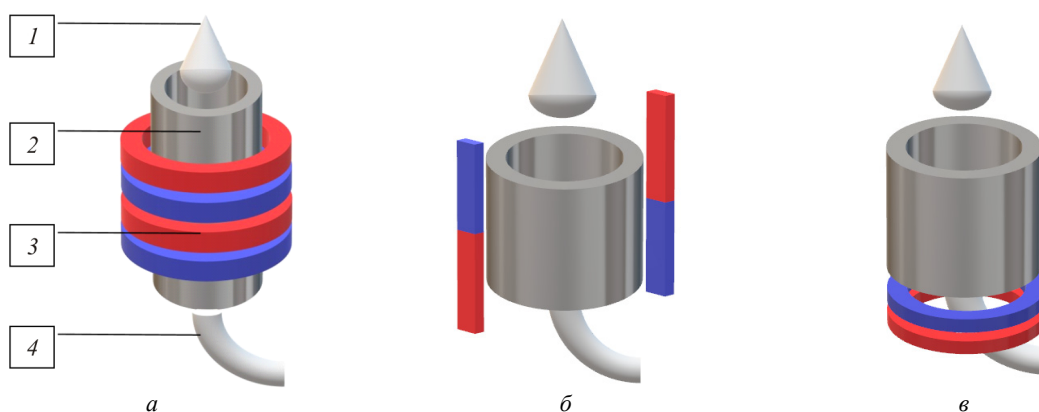


Рис. 1. Схемы заливки образцов с различным расположением магнитов: 1 – шликер; 2 – литьевая форма; 3 – постоянные магниты; 4 – к насосу; а – round; б – opposite; в – under

Шликер заливали в литевную форму из немагнитного материала. Для создания постоянного магнитного поля конструкция формы предусматривала добавление неодимовых магнитов (NdFeB) с характеристиками согласно ГОСТ Р 52956-2008 [22] в состав вакуумной лабораторной сборки с возможностью разрежения воздуха, соответствующей остаточному давлению в 133 Па. Для создания магнитного поля использовали магниты с различной пространственной конфигурацией в литевой форме (рис. 1). Напряженность магнитного поля в пределах от 5 до 10 мкТл.

Просушенные формовки образцов состава TiO_2 /МУНТ подвергали искровому плазменному спеканию в печи Dr. Sinter SPS – 1050 (SPS Syntex, Inc., Япония) при параметрах процесса: $T = 1200$ °C с выдержкой в течение 5 мин, $P = 2,6$ и $6,2$ кН.

Структуру изломов спеченных образцов исследовали с помощью сканирующего электронного микроскопа VEGA3 TESCAN (TESCAN, Чехия), совмещенного с системой анализа элементного состава материалов Advanced Aztec Energy (Inca Energy 350, Oxford Instruments) на базе энергодисперсионного детектора X-MAX50.

Исследования внутренней микроструктуры компактов проводили с помощью микрофокусной системы рентгеновского контроля с функцией компьютерной томографии Nikon Metrology XT H 225+180 ST (Япония) при следующих параметрах: разность потенциалов 180 кВ, сила тока 100 мкА, выдержка 4 с, количество проекций – 3142, два кадра усреднения. Затем производили реконструкцию полученных изображений в 3D-модели исследуемого объекта объемных растровых моделей.

Результаты и их обсуждение

Для визуализации прохождения линий магнитного поля через литевой канал формы при различном расположении магнитов приготовлены образцы на основе эпоксидной смолы ЭД-20 с отвердителем ПЭПА и железного порошка. Каждому образцу соот-

ветствует схема расположения магнитов в литевой форме по трем типам, как указано на рис. 2.

Исходя из полученных результатов, для отливки углерод-керамических образцов под магнитным полем выбрана конфигурация магнитов по типу *opposite*, так как данная схема расположения магнитов позволяет распределить наполнитель не только по периметру образца (*round*), но в толще и центральной области, что не достигается в схемах *round* и *under*.

Структуру изломов спеченных образцов состава TiO_2 /МУНТ исследовали с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) VEGA3 TESCAN (TESCAN, Чехия). На рис. 3 приведены СЭМ-изображения образцов при различных увеличениях и карта распределения углерода. Зафиксированы агломерация МУНТ (рис. 3, а, б), направленная ориентация агломератов (рис. 3, а, б), и отдельных нанотрубок в составе агломератов (рис. 3, в). Подтверждена высокая концентрация углерода в образованиях вытянутой формы (рис. 3, г). К сожалению, сканирующая электронная микроскопия позволяет наблюдать только поверхность излома или микрошлифа исследуемого объекта.

Картину объемного распределения наполнителя в матрице во многих случаях позволяет получить рентгеновская компьютерная томография (КТ). С целью получения карт объемного распределения наполнителя в матрице после магнитного воздействия в процессе гелевого литья исследованы объемные образцы следующих составов: TiO_2 /Fe и TiO_2 /МУНТ.

Образец TiO_2 /Fe был отлит по схеме *round* для визуализации влияния магнитного поля на микрочастицы наполнителя и возможности его распределения в керамической матрице. Высушенные образцы TiO_2 /Fe не подвергали высокотемпературной обработке.

Съемку проводили с использованием микрофокусной системы рентгеновского контроля с функцией КТ Nikon Metrology XT H 225+180 ST. Визуализация фаз при исследовании методом КТ

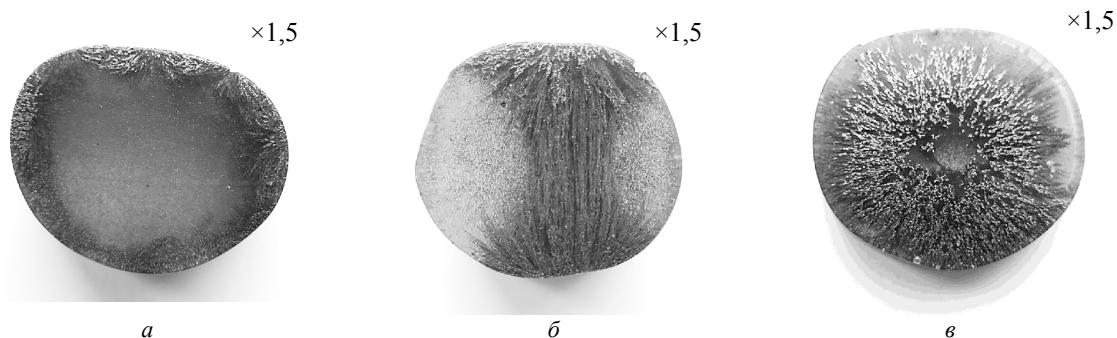


Рис. 2. Снимки образцов на основе эпоксидной смолы ЭД-20 и железного порошка, демонстрирующие расположение линий магнитного поля в литевом канале и объеме образца соответственно: а – *round*; б – *opposite*; в – *under*

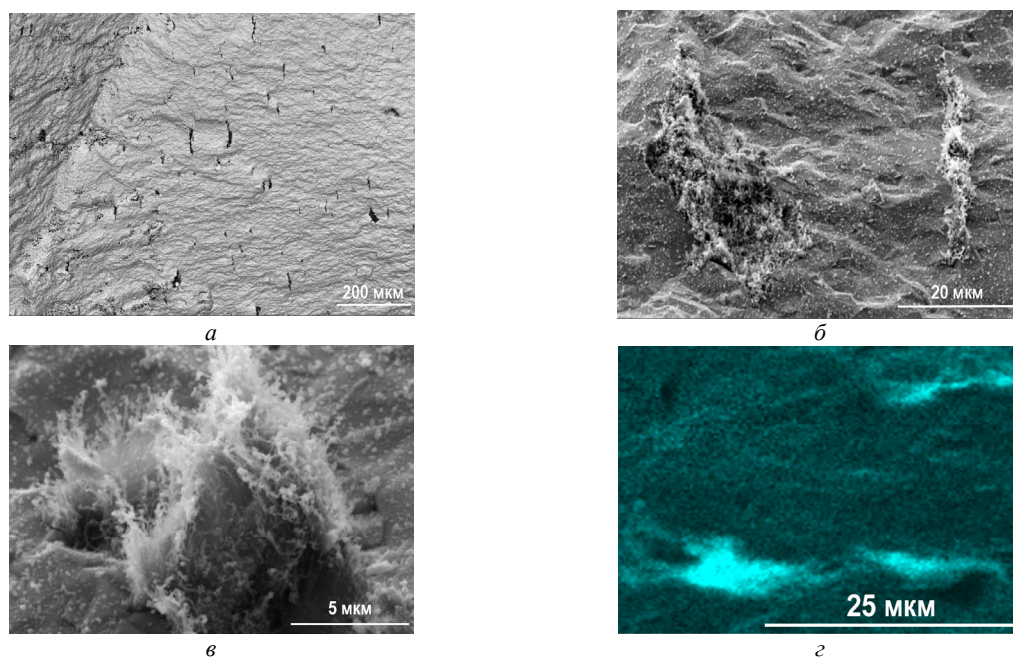


Рис. 3. СЭМ-изображения изломов спеченных образцов $\text{TiO}_2/\text{МУНТ}$ и карта распределения углерода; увеличение: $a - \times 250$; $b - \times 4000$; $c - \times 32000$

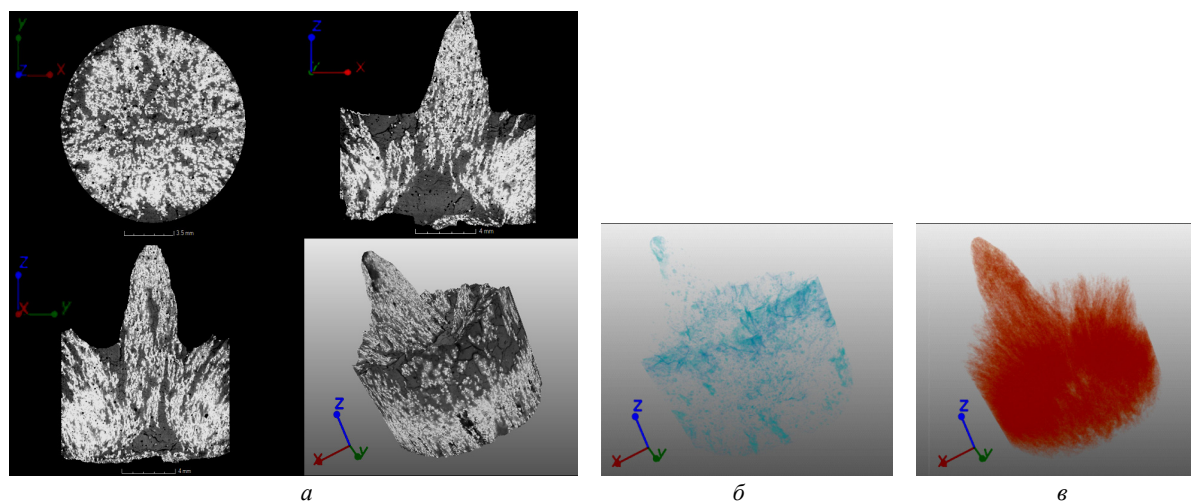


Рис. 4. Срезы 3D-модели, общий вид и карты распределения фаз образца TiO_2/Fe : a – срезы 3D-модели и общий вид; b – распределение пор; c – распределение частиц Fe

основывается на распределении всех присутствующих плотностей фаз на 255 оттенков серого цвета, где самая плотная фаза отображается белым цветом, а низкоплотная (воздух) черным цветом. В исследованных образцах известны следующие массовые плотности фаз: ρ (МУНТ) – 1,2–1,4 г/см³, ρ (Fe) – 7,87 г/см³, ρ (TiO_2) – 4,23 г/см³.

Результаты анализа срезов 3D-модели в разных плоскостях образца TiO_2/Fe показали, что распределение пор (b) и частиц железа (c) является неоднородным (рис. 4). Неизометрия формовки с характерным выступающим короноподобным образованием на верхней части образца обусловлена сложностью заливки железосодержащего шликера в литьевую форму под воздействием магнитного

поля, высоким откликом железных микрочастиц порошка на данное воздействие и выталкиванием их из объема формовки за счет кругового расположения магнитов.

Срезы 3D-модели образца $\text{TiO}_2/\text{МУНТ}$ представлены на рис. 5. По результатам анализа зафиксирована поверхностная зона с низкой плотностью (рис. 5, b). Белая полоса в центре образца является специфическим артефактом компьютерной томографии материалов данной плотности, в частности TiO_2 [23]. При исследовании структуры образца $\text{TiO}_2/\text{МУНТ}$ методом КТ фазы, явно принадлежащей агломератам МУНТ, не наблюдается, тогда как с помощью сканирующей электронной микроскопии ранее было установлено наличие включе-

ний агломератов углеродных нанотрубок по всему объему формовки. Отсутствие фазы, принадлежащей МУНТ, в 3D-модели образца может быть связано с ограничениями метода исследования. Ввиду

низкой по сравнению с TiO_2 , но близкой к плотности воздуха плотности МУНТ идентифицировать поры и МУНТ по оттенкам серого не представляется возможным.

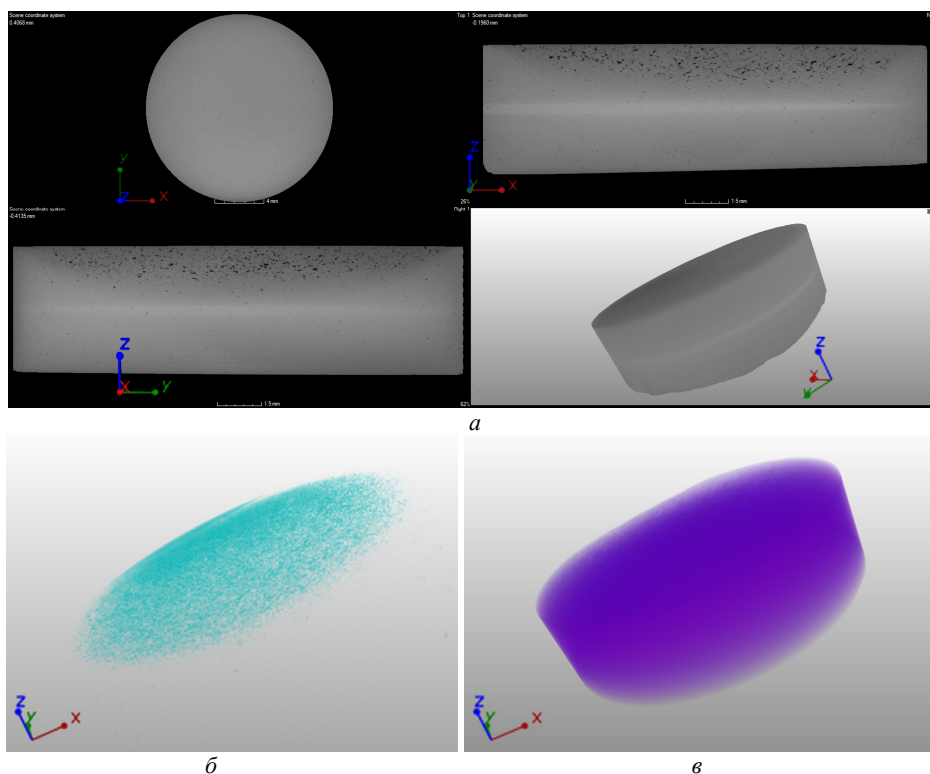


Рис. 5. Срезы 3D-модели, общий вид и карты распределения фаз образца $\text{TiO}_2/\text{МУНТ}$: а – срезы 3D-модели и общий вид; б – распределение пор; в – распределение TiO_2

Анализ литературы показал, что вопрос фазового контраста композиционных наноматериалов методом рентгеновской компьютерной томографии на сегодняшний день является до конца не изученным, что предполагает наличие ряда проблем и особенностей при идентификации различных фаз композитов. Основная масса работ представлена в области изучения углерод-углеродных композиционных материалов, исследования по изучению углерод-керамических композиционных наноматериалов встречаются значительно реже.

Одним из наиболее важных параметров для обнаружения особенностей является контраст между различными составляющими в интересующем объеме, между матрицей, наполнителем и дефектами. В рентгеновской КТ в режиме поглощения контраст возникает из-за разного линейного коэффициента ослабления составляющих. Материалы с низким атомным номером демонстрируют низкое ослабление рентгеновских лучей. Это, с одной стороны, является преимуществом, поскольку рентгеновские лучи могут проходить через большие композитные компоненты, но это также приводит к плохому контрасту между наполнителем и матрицей [24]. Когда коэффициенты ослабления рентге-

новских лучей на границе раздела между двумя разными материалами слишком близки, традиционные методы, основанные на поглощении, могут не показать значительной разницы в результирующих значениях серого [25].

Для увеличения фазового контраста проведена дополнительная съемка образца $\text{TiO}_2/\text{МУНТ}$ с медным анодом. По полученным снимкам ярко выраженной границы между фазами также не отмечено.

С целью проверки зависимости фазового контраста от плотности компонентов нанокompозита и регистрации МУНТ в объеме матрицы под магнитным полем был изготовлен образец на основе эпоксидной смолы, которая выступала в качестве матричного материала. Плотность эпоксидной смолы марки ЭД-20 (ГОСТ 10587-84) составляет $1,16\text{--}1,25\text{ г/см}^3$, данное значение наиболее близко к плотности углеродных нанотрубок. Полученные с разрешением $6,8\text{ мкм}$ 3D-модели образца показали, что подбор плотности матрицы и наполнителя способствует увеличению фазового контраста, однако говорить на основании данного метода исследования о выстраивании агломератов МУНТ по линиям магнитного поля недостаточно корректно.

Заключение

Проведенные опыты по магнитному структурированию композиционного углерод-керамического материала при формировании заготовки гелевым литьем показали, что варьирование конфигурации расположения магнитного поля относительно материала позволяет получать различный отклик в виде соответствующего расположения наполнителя в отливке.

При этом расположение магнитов по схеме *round* может найти применение при литье с поверхностной модификацией для повышения трибологических свойств различных деталей. Схема *opposite* может быть оптимальной при получении анизотропных тепло- и электропроводящих материалов. Схема *under* демонстрирует радиальное выстраивание наполнителя с пустой центральной областью и может представлять интерес, например, при разработке оптоволоконных материалов на основе тетраэтоксисилана.

Результаты сканирующей электронной микроскопии показали, что под воздействием слабого магнитного поля углеродные нанотрубки собираются в агломераты, которые вытягиваются от одного полюса к другому по объему всего образца. При этом углеродные нанотрубки в составе агломератов также имеют направленность, что указывает на структурную иерархию материала.

Исследования методом рентгеновской компьютерной томографии не позволили провести дифференциацию МУНТ и пор в матрице диоксида титана из-за слабо выраженного фазового контраста. Общее распределение элементов углерод-керамического композиционного материала ($\text{TiO}_2/\text{МУНТ}+\text{поры}$) определяется достаточно хорошо.

Библиографический список

1. Asyraf M.R.M., Saleh T. A review on micro-patterning processes of vertically aligned carbon nanotubes array (VACNTs Array) // *Current Nanoscience*. – 2019. – Vol.15, № 4. – P. 328 – 353. DOI: 10.2174/1573413714666180813110942
2. Beigmoradi R., Samimi A., Mohebbi-Kalhari D. Engineering of oriented carbon nanotubes in composite materials // *Beilstein journal of nanotechnology*. – 2018. – Vol. 9, № 1. – P. 415–435. DOI: 10.3762/bjnano.9.41
3. Xie X-L., Mai Y-W., Zhou X-P. Dispersion and alignment of carbon nanotubes in polymer matrix: A review // *Materials science and engineering: R: Reports*. – 2005. – Vol. 49, № 4. – P. 89–112. DOI: 10.1016/j.mser.2005.04.002
4. Sokolov A. S., Harris V. G. 3D crystallographic alignment of alumina ceramics by application of low magnetic fields // *Journal of the European Ceramic Society*. – 2018. – P. 1–7. DOI:10.1016/j.jeurceramsoc.2018.06.035

5. Sierra-Romero A., Chen B. Strategies for the preparation of polymer composites with complex alignment of the dispersed phase // *Nanocomposites*. – 2018. – Vol. 4, № 4. – P. 137–155. DOI: 10.1080/20550324.2018.1551830

6. High electrical conductivity and anisotropy of aligned carbon nanotube nanocomposites reinforced by silicon carbonitride / J. Yang, R. Downes, A. Schrand, J.G. Park, R. Liang, C. Xu // *Scripta Materialia*. – 2016. – Vol. 124. – P. 21–25.

7. Щурик А.Г. Искусственные углеродные материалы. – Пермь, 2009. – 342 с.

8. Alignment of carbon nanotubes under low magnetic fields through attachment of magnetic nanoparticles / M. A. Correa-Duarte, M. Grzelczak, V. Salgueiriño-Maceira, M. Giersig, L. M. Liz-Marzán, M. Farle, K. Sieradzki, R. Diaz // *J. Phys. Chem. B*. – 2005. – Vol. 109, № 41. – P.19060-19063.

9. Alignment of carbon nanotubes in weak magnetic fields/ J. Tumpene, N. Karousis, N. Tagmatarchis, B.N. Angew // *Chem. Int. Ed.* – 2008. – Vol. 47. – P. 5148–5152.

10. Mwcnts-PSOH Dispersion and Interaction Using Low Magnetic Fields / F.G. Granados-Martínez, D.L. García-Ruiz, J.J. Contreras-Navarrete, J.M. Ambriz-Torres, C.J. Gutiérrez-García, L. García-González, L. Zamora-Peredo, O. Hernández-Cristobal, Y. Arredondo-León, N. Flores-Ramírez, L. Domratcheva-Lvova // *MRS Advances*. – 2018. – Vol. 2, № 62. – P. 3891–3897.

11. Fabrication of Core-shell Type Alginate/CNT Composite Adsorbent Beads by Combined Method of Magnetic – field/electrospray: Effect of CNT Orientation on Adsorption of Methylene Blue and Environmental Applications [Электронный ресурс] // R. Beigmoradi, Y. Moayedfar, H. Khosravi, A. Samimi. – 2021. – P. 12. – URL: <https://www.researchsquare.com> (дата обращения: 13.01.2021).

12. Influence of the concentration of carbon nanotubes on electrical conductivity of magnetically aligned MWCNT-polyurethane composites / K. Kazemikia, F. Bonabi, A. Asadpoorchallo, M. Shokrzadeh // *Bull. Mater. Sci.* – 2016. – Vol. 39, № 2. – P.457–462.

13. Effect of magnetic field on microstructure of carbon nanotube reinforced Mg matrix composites / J. Liang, H. Li, S. Cheng, J. Wei, L. Qi // *International Conference on Manipulation, Manufacturing and Measurement on the Nanoscale*. – 2012. – Vol. 4. – P. 308–311. DOI: 10.1109/3M-NANO.2012.6472960

14. Tsuda K., Sakka Y. Simultaneous alignment and micropatterning of carbon nanotubes using modulated magnetic field // *Sci. Technol. Adv. Mater.* – 2009. – Vol. 10, № 1. – P. 1 – 7. DOI:10.1088/1468-6996/10/1/014603

15. Composites Reinforced in Three Dimensions by Using Low Magnetic Fields / R. M. Erb, R. Libanori, N. Rothfuchs, A. R. Studart // *Science*. – 2012. – Vol. 335. – P. 199–204. DOI: 10.1126/science.1210822

16. Ferrand H.L. Magnetic slip casting: a review of current achievements and issues // *Journal of the European Ceramic Society*. – 2021. – Vol. 41, № 1. – P. 24–37.

17. Вайнберг И.А., Вайнберг Э.И. Состояние и перспективы промышленной рентгеновской компьютерной томографии // *Двигатель*. – 2013. – № 3 (87). – С. 18–23.

18. Garcea S.C., Wang Y., Withers P.J. X-ray computed tomography of polymer composites // *Composites Science and Technology*. – 2018. – Vol. 156. – P. 305–319.

19. A Review of Current Challenges and Case Study toward Optimizing Micro-Computed X-Ray Tomography of Carbon Fabric Composites / A. Rashidi, T. Olfatbakhsh, B. Crawford, A. S. Milani // *Materials (Basel)*. – 2020. – Vol. 13, № 16. – P. 1–30.

20. Прусов Е.С. Компьютерная томография для задач трехмерного материаловедения [Электронный ресурс] // *Фундаментальные исследования*. – 2015. – № 5–2. – С. 318–323. – URL: <https://fundamentalresearch.ru/article/view?id=38215> (дата обращения: 13.01.2022).

21. Влияние гидрофильных сред на характеристики диспергируемых многостенных углеродных нанотрубок / С.Е. Порозова, Т.Ю. Поздеева, Д.С. Вохмянин, Ю.А. Лаптева // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение*. – 2020. – Т. 22, № 2. – С. 23–30.

22. ГОСТ Р 52956–2008. Материалы магнитотвердые спеченные на основе сплава неодим – железо – бор. Классификация. Основные параметры. – М.: Стандартинформ, 2008. – 12 с.

23. Казначеева А.О., Кокорев П.А. Анализ артефактов изображений в компьютерной томографии // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики: Университет ИТМО*. – 2008. – Т. 08, № 2. – С. 84–88.

24. Garcea S.C., Wang Y., Withers P.J. X-ray computed tomography of polymer composites // *Composites Science and Technology*. – 2018. – Vol. 156. – P. 305–319.

25. Advanced X-Ray Tomographic Methods for Quantitative Characterisation of Carbon Fibre Reinforced Polymers / J. Kastner, B. Plank, A. Reh, D. Salaberger, C. Heinzl // *4th International Symposium on NDT in Aerospace*. Augsburg, Germany – 2012 – P. 1–9.

References

1. Asyraf M.R.M., Saleh T. A review on micro-patterning processes of vertically aligned carbon nano-tubes array (VACNTs Array). *Current Nanoscience*, 2019, vol.15, no. 4, pp. 328 – 353. DOI: 10.2174/1573413714666180813110942

2. Beigmoradi R., Samimi A., Mohebbi-Kalhari D. Engineering of oriented carbon nanotubes in composite materials. *Beilstein journal of nanotechnology*, 2018, vol. 9, no. 1, pp. 415–435. DOI: 10.3762/bjnano.9.41

3. Xie X-L., Mai Y-W., Zhou X-P. Dispersion and alignment of carbon nanotubes in polymer matrix: A review. *Materials science and engineering: R: Reports*, 2005, vol. 49, no. 4, pp. 89–112. DOI: 10.1016/j.mser.2005.04.002

4. Sokolov A. S., Harris V. G. 3D crystallographic alignment of alumina ceramics by application of low magnetic fields. *Journal of the European Ceramic Society*, 2018, pp. 1–7. DOI:10.1016/j.jeurceramsoc.2018.06.035

5. Sierra-Romero A., Chen B. Strategies for the preparation of polymer composites with complex alignment of the dispersed phase. *Nanocomposites*, 2018, vol. 4, no. 4, pp. 137–155. DOI: 10.1080/20550324.2018.1551830

6. Yang J., Downes R., Schrand A., Park J.G., Liang R., Xu C. High electrical conductivity and anisotropy of aligned

carbon nanotube nanocomposites reinforced by silicon carbonitride. *Scripta Materialia*, 2016, vol. 124, pp. 21–25.

7. Shchurik A.G. Iskusstvennye uglerodnye materialy [Artificial carbon materials]. Perm', 2009, 342 p.

8. Correa-Duarte M. A., Grzelczak M., Salgueiriño-Maceira V., Giersig M., Liz-Marzán L. M., Farle M., Sieradzki K., Diaz R. Alignment of carbon nanotubes under low magnetic fields through attachment of magnetic nanoparticles. *Journal Phys. Chem. B*, 2005, vol. 109, no. 41, pp.19060-19063.

9. Tumpene J., Karousis N., Tagmatarchis N., Angew B.N. Alignment of carbon nanotubes in weak magnetic fields. *Chem. Int. Ed.*, 2008, vol. 47, pp. 5148–5152.

10. Granados-Martínez F.G., García-Ruiz D.L., Contreras-Navarrete J.J., Ambriz-Torres J.M., Gutiérrez-García C.J., García-González L., Zamora-Peredo L., Hernández-Cristobal O., Arredondo-León Y., Flores-Ramírez N., Domratcheva-Lvova L. Mwcnts-PSOH Dispersion and Interaction Using Low Magnetic Fields. *MRS Advances*, 2018, vol. 2, no. 62, pp. 3891–3897.

11. Beigmoradi R., Moayedfar Y., Khosravi H., Samimi A. Fabrication of Core-shell Type Alginate. CNT Composite Adsorbent Beads by Combined Method of Magnetic – field/electrospray: Effect of CNT Orientation on Adsorption of Methylene Blue and Environmental Applications, 2021, pp. 12. – URL: <https://www.researchsquare.com> (data available 13.01.2021).

12. Kazemikia K., Bonabi F., Asadpoorchalho A., Shokrzadeh M. Influence of the concentration of carbon nanotubes on electrical conductivity of magnetically aligned MWCNT–polypyrrole composites. *Bull. Mater. Sci.*, 2016, vol. 39, no. 2, pp. 457–462.

13. Liang J., Li H., Cheng S., Wei J., Qi L. Effect of magnetic field on microstructure of carbon nanotube reinforced Mg matrix composites. *International Conference on Manipulation, Manufacturing and Measurement on the Nanoscale*, 2012, vol. 4, pp. 308–311. DOI: 10.1109/3M-NANO.2012.6472960

14. Tsuda K., Sakka Y. Simultaneous alignment and micropatterning of carbon nanotubes using modulated magnetic field. *Sci. Technol. Adv. Mater.*, 2009, vol. 10, no. 1, pp. 1–7. DOI:10.1088/1468-6996/10/1/014603

15. Erb R. M., Libanori R., Rothfuchs N., Studart A. R. Composites Reinforced in Three Dimensions by Using Low Magnetic. *Science*, 2012, vol. 335, pp. 199–204. DOI: 10.1126/science.1210822

16. Ferrand H.L. Magnetic slip casting: a review of current achievements and issues. *Journal of the European Ceramic Society*, 2021, vol. 41, no. 1, pp. 24–37.

17. Vainberg I.A., Vainberg E.I. Sostoianie i perspektivy promyshlennoi rentgenovskoi komp'iuternoi tomografii [Status and prospects of industrial X-ray computed tomography] *Dvigatel'*, 2013, no. 3 (87), pp. 18–23.

18. Garcea S.C., Wang Y., Withers P.J. X-ray computed tomography of polymer composites. *Composites Science and Technology*, 2018, vol. 156, pp. 305–319.

19. Rashidi A., Olfatbakhsh T., Crawford B., Milani A.S. A Review of Current Challenges and Case Study toward Optimizing Micro-Computed X-Ray Tomography of Carbon Fabric Composites. *Materials (Basel)*, 2020, vol. 13, no. 16, pp. 1–30.

20. Prusov E.S. Komp'iuternaia tomografiia dlia zadach trekhmernogo materialovedeniia [Computed tomography for 3D material science problems]. *Fundamental'nye issledovaniia*,

2015, no. 5–2, pp. 318–323. URL: <https://fundamentalresearch.ru/ru/article/view?id=38215> (data available 13.01.2022).

21. Porozova S.E., Pozdeeva T.Iu., Vokhmianin D.S., Lapteva Iu.A. Vliianie gidrofil'nykh sred na kharakteristiki dispergiруemykh mnogostennykh uglerodnykh nanotrubok [Effect of hydrophilic media on the characteristics of dispersible multi-walled carbon nanotubes]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie*, 2020, vol. 22, no. 2, pp. 23–30.

22. GOST R 52956–2008. Materialy magnitotverdye spechennye na osnove splava neodim – zhelezo – bor. Klassifikatsiia. Osnovnye parametry. Moscow: Standartinform, 2008, 12 p.

23. Kaznacheeva A.O., Kokorev P.A. Analiz arte-faktov izobrazhenii v komp'iuternoi tomografii [Analysis of Image Artifacts in Computed Tomography]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki: Universitet ITMO*, 2008, vol. 08, no. 2, pp. 84–88.

24. Garcea S.C., Wang Y., Withers P.J. X-ray com-puted tomography of polymer composites. *Composites Science and Technology*, 2018, vol. 156, pp. 305–319.

25. Kastner J., Plank B., Reh A., Salaberger D., Heinzl C. Advanced X-Ray Tomographic Methods for Quantitative Characterisation of Carbon Fibre Reinforced Polymers. *4th International Symposium on NDT in Aerospace. Augsburg, Germany*, 2012, pp. 1–9.

Поступила: 30.03.2022

Одобрена: 12.05.2022

Принята к публикации: 27.05.2022

Сведения об авторах

Порозова Светлана Евгеньевна (Пермь, Россия) – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры механики композиционных материалов и конструкций Пермского национального исследовательского политех-

нического университета (Россия, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: sw.porozova@yandex.ru).

Поздеева Татьяна Юрьевна (Пермь, Россия) – аспирант, младший научный сотрудник кафедры механики композиционных материалов и конструкций Пермского национального исследовательского политехнического университета (Россия, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: pozdeevatu@gmail.com).

Лебедева Алена Сергеевна (Пермь, Россия) – инженер кафедры минералогии и петрографии Пермского национального исследовательского политехнического университета (Россия, 614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15, e-mail: alenal5@rambler.ru).

About the authors

Svetlana E. Porozova (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Mechanics of Composite Materials and Constructions, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky ave., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: keramik@pm.pstu.ac.ru).

Tatyana Yu. Pozdeeva (Perm, Russian Federation) – Postgraduate Student, junior researcher, Department of Mechanics of Composite Materials and Constructions, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky ave., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: pozdeevatu@gmail.com).

Alyona S. Lebedeva (Perm, Russian Federation) – Engineer, Department of Mineralogy and Petrography, Perm State National Research University (15, st. Bukirev, Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: alenal5@rambler.ru).

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 20-33-90085).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад всех авторов равноценен.