РАДИОФИЗИКА, ЭЛЕКТРОНИКА, АКУСТИКА

Проводимость в композитных материалах на основе ориентированных углеродных нанотрубок

Е. А. Воробьева,[1,2,a] А. П. Евсеев,[1,3] В. Л. Петров,[1] А. А. Шемухин,[1] Н. Г. Чеченин[1]

[1] *Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.*

[2] *Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт». Россия, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1.*

[3] *Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра физической электроники. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.*

Поступила в редакцию 12.10.2020, после доработки 03.11.2020, принята к публикации 05.11.2020.

В статье рассмотрены перспективы использования композитных материалов на основе полимерных матриц с включением углеродных нанотрубок, в том числе ориентированных, в качестве как функциональных, так и конструкционных материалов для наноспутников. Представлена оценка теплопроводности и электропроводности данных композитов, предложены методики получения углеродных нанотрубок, в том числе вертикально ориентированных, синтезированных на нитях, а также коаксиальных регулярных наномезоструктур, в качестве функциональной добавки для варьирования свойств материалов.

Ключевые слова: ориентированные многостенные углеродные нанотрубки, электропроводность и теплопроводность композитов, функциональные и конструкционные материалы, кубсаты.

УДК: 539.23, 538.93. PACS: 65.80.+n.

ВВЕДЕНИЕ

В современном спутникостроении все большую популярность приобретают так называемые «кубсаты» (от англ. CubeSat) — сверхмалые космические аппараты стандартизованной геометрии. Малые габариты спутников, доступность по цене их основных компонент и возможность попутного выведения на орбиту без специальной адаптации делает их крайне привлекательными для использования в учебных и исследовательских целях, в том числе для исследования новых космических технологий, а также мониторинга околоземного космического пространства [1].

Однако малый размер кубсатов требует все более совершенных и в то же время недорогих материалов из-за сильных массогабаритных ограничений спутника. В частности, малые доступные габариты и масса затрудняют обеспечение теплового режима космического аппарата и его защиты от статического электричества.

Условия космического пространства (большой перепад температур, радиация в широком спектре излучения, ударные воздействия микрочастиц и т.д.) требуют все более совершенных материалов, обладающих необходимым набором характеристик. Пристальное внимание производителей космической техники (например, NASA), в том числе корпораций-разработчиков (например, Boeing), привлекают нанокомпозитные материалы на основе полимерных матриц и углеродных наноструктур [2–4]. Разработке новых полимер-наноуглеродных композитов и исследованию их свойств уделяется большое внимание и различными научными коллективами [5, 6]. Материалы на основе полимерных матриц широко используются в промышленности из-за их малого веса, низкой стоимости, простоты обработки, разнообразных функциональных возможностей и химической стабильности. Однако низкие тепло- и электропроводность ограничивают применение таких материалов в качестве теплообменников и конструкционных материалов, что возможно обойти путем создания композитных материалов с использованием наполнителя с высокими тепло- и электропроводностью, например, различных углеродных структур. Из уникального многообразия аллотропных форм углерода наиболее очевидными перспективами практического использования обладают углеродные нанотрубки (УНТ). Углеродные нанотрубки рассматривают также как термоустойчивый межфазный материал в сверхъярких светодиодах [7], теплоотводах на процессорах [8] и транзисторах большой мощности [9]. Высокие функциональные характеристики УНТ позволяют надеяться на их активное использование и в космической промышленности в качестве наполнителей нанокомпозитных покрытий и материалов.

Композитные материалы на основе полимеров и углеродных нанотрубок, которые включают в себя уникальные свойства обеих компонент, как показывают многочисленные исследования, демонстрируют улучшенные свойства по сравнению с исходным материалом и имеют потенциальное применение во многих областях [10–13]. Тем не менее склонность УНТ к агрегации в полимерной матрице всегда была большой проблемой в изготовлении композитов. Доказано, что использование ориентированных массивов УНТ вместо случайно ориентированных УНТ заметно улучшает дисперсию нанотрубок в полимерной матрице [14–16]. С помощью оптимизации способов получения УНТ стало доступным получать

[a] E-mail: vorkate89@mail.ru

образцы нанотрубок макроскопической длины, что позволяет создавать нанокомпозиты с нанотрубками, которые проходят непрерывно через всю матрицу полимера. В нанокомпозитах с упорядоченно ориентированными УНТ всегда имеется связь нанотрубок с матрицей полимер–УНТ, что позволяет добиться крайне высокого модуля упругости и прочности материала.

Проводящие нанокомпозиты, состоящие из полимерной матрицы и УНТ, представляют особую ценность, поскольку они сочетают в себе лучшие механические качества полимерных материалов с хорошей электропроводностью, присущей углеродным нанотрубкам [17, 18], в частности требуются в различных приложениях, таких как электростатические рассеивающие покрытия, защита от электромагнитных помех, печатные схемы и прозрачные проводящие покрытия.

Для аморфных полимеров длина свободного пробега фононов является чрезвычайно малой величиной (примерно несколько ангстрем) в связи с рассеянием фононов на многочисленных дефектах, что приводит к очень низкой теплопроводности полимеров [19]. При использовании композиционных материалов в качестве теплоотвода в электронных системах в полимеры добавляют специальные теплопроводящие наполнители, например графит, углеродную сажу, углеродные волокна, металлические частицы (в частности, серебро) [20]. Высокий процент содержания наполнителя ($>$ 30 об. %), как правило, необходим для достижения соответствующего уровня теплопроводности полимерных композитов, однако большое количество наполнителя сильно меняет механические свойства полимера и плотность материала. По этой причине получение композитов с теплопроводностью выше, чем 4 Вт/м·К, вызывает большие сложности в настоящее время. Углеродные наполнители оказались лучшими перспективными наполнителями с высокой теплопроводностью и малым весом. Графит, углеродное волокно и сажа являются хорошо известными традиционными углеродными наполнителями.

Необычно высокую теплопроводность имеют УНТ, которые служат лучшим перспективным материалом в качестве наполнителя для теплопроводящих композитов. Все нанотрубки обладают очень хорошей теплопроводностью вдоль оси трубки, проявляются свойства, известные как «баллистическая проводимость». Температурная стабильность углеродных нанотрубок также высока; по оценкам, до 2800°C в вакууме и около 750°C на воздухе [21]. На теплопроводность нанотрубок и соответственно композитов с включением УНТ оказывают влияние атомная структура, диаметр, морфология, дефекты и степень чистоты УНТ [22]. Большое влияние на теплопроводность композита также оказывает диспергация УНТ по полимерной матрице [23]. В работе [24] исследователи пришли к выводу, что добавление в эпоксидную смолу многостенных углеродных нанотрубок (МУНТ) в количестве от 0.1 до 1.0% приводит к увеличению теплопроводности материала на 40% по сравнению с чистой эпоксидной смолой. Дальнейшее увеличение концентрации нанотрубок приводит к уменьшению теплопроводности. Такое поведение может быть результатом ухудшения дисперсии нанотрубок при высоких концентрациях.

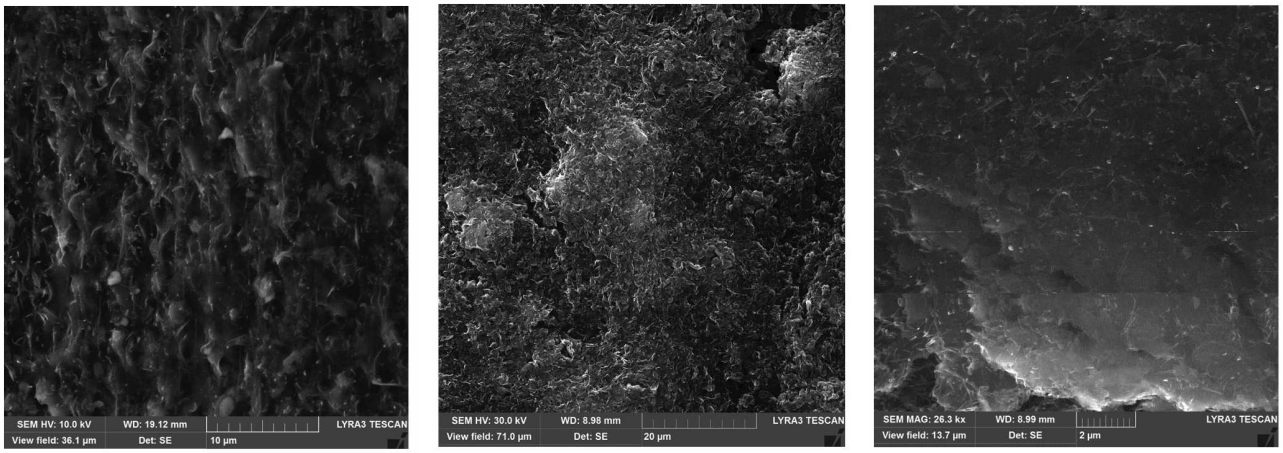
Геометрические размеры космических аппаратов типа кубсат кратны 10 см. Плотная компоновка электронных плат служебных систем и полезных нагрузок не позволяет обеспечивать их индивидуальными корпусами с достаточной площадью для снятия избыточного тепла. Кроме того, отдельные элементы крепления требуется изготавливать в сложной геометрии, но малом размере, что зачастую трудновыполнимо традиционными методами обработки металлов (фрезеровка, штамповка). В таких аппаратах тепловой баланс обеспечивается методом создания единого теплового контура с максимально возможной теплопроводностью между элементами конструкции для предотвращения перегрева или переохлаждения отдельных участков. При этом основные источники тепла, как правило, точечные (микросхемы вычислителей, силовые транзисторы и т. п.), без теплоотводов. Также заметно отсутствие общего электропроводящего покрытия корпуса, что может приводить к накоплению на отдельных участках поверхностей значительного статического заряда с возможными негативными последствиями для электроники космического аппарата [25].

Один из подходов к решению этих проблем состоит в использовании полимерных композитных материалов с наполнением УНТ: полимеры значительно проще подвергаются механической обработке, заготовкам изначально возможно придать нужную форму, что снижает расходы материала. Вдвое более низкая плотность по сравнению с дюралюминиевыми сплавами позволяет использовать детали нужной толщины без значительного увеличения общей массы космического аппарата, которые к тому же могут защитить электронные компоненты от накопления статического заряда [26]. Следует отметить, что при выборе полимерной основы используемого композита необходимо учитывать негативное воздействие факторов космического пространства, прежде всего ультрафиолетового излучения и космической радиации.

1. ЭКСПЕРИМЕНТ

Установка для синтеза ориентированных углеродных нанотрубок, так называемого «леса», методом пиролитического газофазного осаждения (ПГО) состоит из трубчатого кварцевого реактора (диаметром 30 мм с толщиной стенки 2.5 мм и длиной в 1 м), помещенного в лабораторную трубчатую печь, которая обеспечивает нагрев образцов до температуры 1200°C, и систем подачи газов-носителей и жидкого катализатора — ферроцена, растворенного в углеводороде (например, в циклогексане) [27].

Для измерения сопротивления полученных нанокомпозитов применялся экспериментальный комплекс, состоящий из следующих компонентов: тераомметр Е6-13А, предназначенный для измерения сопротивления постоянному току; экранированный от внешних наводок бокс для измерения сопротивления образцов; набор зажимов и держателей для образцов различных геометрических форм и параметров.



а *б* *в*

Рис. 1. СЭМ-изображения синтезированных структур: *а* — УНТ на нити каолиновой ленты; *б* — микротрубка из углеродных нанотрубок, полученных на альфа-корунде (коаксиальные нано-мезоструктуры); *в* — массив ориентированных УНТ на кремнии

Перед экспериментами по исследованию величины сопротивления образцов нанокомпозитов производилась предварительная подготовка образцов. Подготовка заключалась в тщательной шлифовке образцов и приведении серии образцов к единым размерам, что позволило в дальнейшем проводить сравнение полученных данных.

Теплопроводность и температуропроводность экспериментальных образцов измерялись с помощью прибора NETZSCH LFA 457 MicroFlash на основе стандартизованного метода в соответствии со следующими стандартами: ASTM E-1461, DIN EN 821 и DIN 30905.

Образцы нанокомпозитов с включением вертикально ориентированных УНТ были получены с использованием массивов («леса») УНТ, выращенных методом пиролитического газофазного осаждения с помощью раствора ферроцена в циклогексане на кремниевой подложке. Высота массива синтезированных углеродных нанотрубок достигает 2 мм, что позволяет синтезировать образцы композитов. Массив упорядоченно ориентированных УНТ пропитывался полимером при использовании капиллярного эффекта. В качестве полимерной основы в создании экспериментальных образцов использовалась эпоксидная смола (в частности, ЭД-20).

Вместе с тем создание эпоксидных композитов, модифицированных УНТ, вызывает существенные трудности, связанные с достижением их однородного распределения в матрице из-за высокой поверхностной активности, склонности к агрегированию и седиментации в менее плотной среде. Неоднородный характер заполнения полимерной матрицы нанотрубками приводит к повышенной хрупкости композиционного материала, которая проявляется в разрушении индивидуальных нанотрубок при относительно невысоких нагрузках. Было рассмотрено несколько вариантов решения данной проблемы: химические диспергаторы, которые препятствуют агломерации углеродных нанотрубок в жгуты, ультразвуковое воздействие и использование уже ориентированных массивов УНТ. Первый метод показал неэффективность в плане негативного влияния на физические свойства уже готового композита.

Эпоксидную смолу смешивали с отвердителем в количестве 15% по массе от массы эпоксидной смолы и тщательно механически перемешивали. Для более однородного проникновения смолы между нанотрубками необходимо было уменьшить вязкость смолы. Для этого осуществлялся нагрев эпоксидной смолы с отвердителем в течение 5 мин до 60°С. При повышении температуры смолы на 10°С ее вязкость снижается в 2–3 раза. Однако необходимо помнить, что с повышением температуры скорость реакции отверждения эпоксидной смолы увеличивается в разы. Если требуется покрыть эпоксидной смолой большую площадь, то лучше нагревать компоненты по отдельности. Преимущество данного метода по сравнению с добавлением растворителей состоит в том, что после отверждения нагретой смолы она обладает теми же характеристиками, что и смола, отвержденная без подогрева. Тепловой метод понижения вязкости смолы имеет ряд своих минусов. Процесс полимеризации в теплой смоле сильно ускоряется, особенно в толстом слое. Рабочее время смолы может сокращаться вплоть до 1 мин.

При работе, если позволяют условия, можно нагреть для снижения вязкости саму поверхность образца, на которую наносится эпоксидная смола, без нагрева смолы и отвердителя. Надо просто смешать компоненты и нанести смолу на теплую поверхность. При этом следует убрать источник тепла непосредственно перед самим нанесением. Когда смесь смолы с отвердителем оказывается на теплой поверхности, происходит ее нагревание и смола теряет вязкость. До понижения температуры поверхности смола успевает проникнуть и пропитать достаточно глубоко материал до начала реакции полимеризации. При использовании такого метода (нагрев поверхности вместо смолы) получаются два преимущества: непосредственно на рабочей поверхности смола греется и имеет низкую вязкость, за счет чего улучшаются ее текучесть и пропитывающая способность, а рабочая смесь эпоксидной смолы и отвердителя не теряет времени жизни в массе и есть столько же времени для работы с ней.

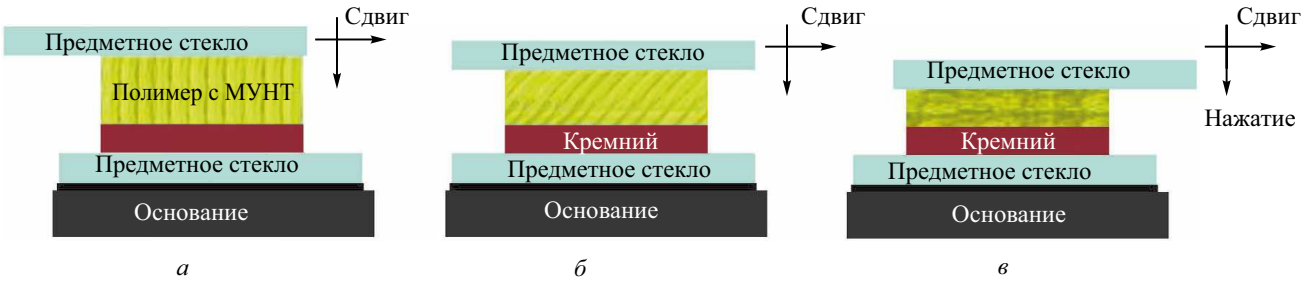


Рис. 2. Схема получения композитов с горизонтально ориентированными УНТ

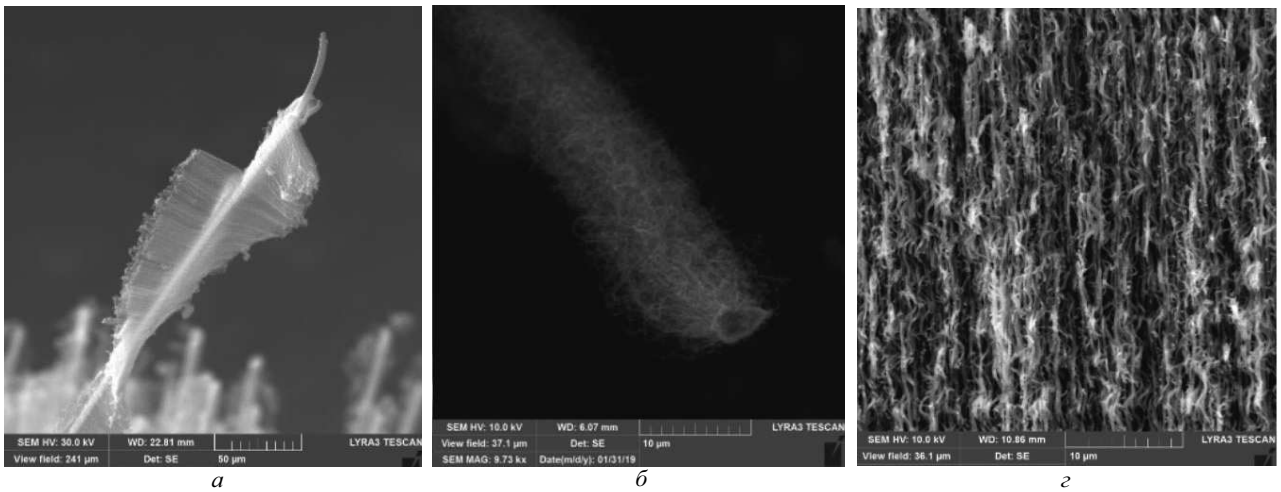


Рис. 3. СЭМ-изображения композитов: *а* — с вертикально ориентированными УНТ (вид сбоку); *б* — с вертикально ориентированными УНТ (вид сверху); *в* — с горизонтально ориентированными УНТ (вид сверху)

Небольшое количество полученного раствора эпоксидной смолы с помощью шприца выливается в центр образца (лес ориентированных УНТ на кремнии). Так как вязкость эпоксидной смолы снижена одним из перечисленных выше способов, то она легко проникает в пространство между нанотрубками, заполняя его полностью, вплоть до подложки из кремния, что хорошо подтверждается снимками сканирующего электронного микроскопа (рис. 1). На снимке сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) хорошо видно, что образец композита (лес УНТ, пропитанный эпоксидной смолой) является электропроводящим, в то время как чистая эпоксидная смола легко заряжается под действием электронного пучка, что говорит о ее диэлектрических свойствах. Однако отдельных УНТ рассмотреть не удается, эпоксидная смола обволакивает УНТ, это говорит о хорошем проникновении полимера в лес УНТ. При нормальной температуре смола достигает от 60 до 80% окончательной прочности спустя 24 ч. После полной полимеризации эпоксидной смолы образец подвергался алмазному шлифованию для снятия верхнего слоя эпоксидной смолы до торцов УНТ, т. е. до начала непосредственно композита. Высота слоя леса измерялась с помощью опции на сканирующем электронном микроскопе, при шлифовании толщина образца контролировалась микрометром.

Образцы нанокомпозитов с включением горизонтально ориентированных УНТ изготавливались следующим образом. Кремниевую подложку с «лесом» УНТ закрепляли на предметном стекле, обернутом фторопластовой лентой. В свою очередь, предметное стекло также фиксировали. Затем в центр массива вертикально ориентированных УНТ на кремниевой подложке с помощью шприца добавляли эпоксидную смолу с отвердителем (в количестве 15% по массе от массы эпоксидной смолы), вязкость которой уменьшена одним из способов, перечисленных выше. После того как эпоксидная смола полностью проникнет в «лес» УНТ, сверху аккуратно кладется второе предметное стекло, обернутое фторопластовой лентой и совершается сдвиг под плотным прижатием стекла к образцу (рис. 2).

Важно отметить, что УНТ действительно из вертикально ориентированных становятся горизонтально ориентированными. Далее образцы помещались на ровную поверхность и полимеризовались при комнатной температуре примерно 72 ч. После полной полимеризации образец подвергался алмазному шлифованию для снятия верхнего слоя эпоксидной смолы до начала непосредственно дисперсной фазы композита. Величина слоя «леса» измерялась с помощью опции на сканирующем электронном микроскопе, при шлифовании толщина образца контролировалась микрометром.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Разработанная методика синтеза позволяет получать различные структуры из УНТ на различных положках (рис. 3), в том числе достаточно большие по площади (до 15 × 100 мм) плотные массивы вертикально ориентированных многостенных УНТ с высотой до 2.5 мм (рис. 3, *в*).

Полученные в результате описанных экспериментов ориентированные массивы («леса») многостенных углеродных нанотрубок (МУНТ) могут быть использованы для получения семейства полимерных нанокомпозитов с заданным направлением анизотропии. Использование просто массива вертикально ориентированных нанотрубок возможно для композитов толщиной не более 2 мм, что ограничено высотой массива УНТ, однако зачастую требуются массивы с выраженной анизотропией свойств большего размера, в таком случае возможно использование МУНТ, синтезированных на нитях/тканях/волокнах (рис. 3, *а, б*), что упрощает производство композита.

В среднем диаметр ориентированных УНТ составляет 40 нм, расстояние между центрами — 200 нм, таки образом объемную долю УНТ можно оценить около $\Phi \approx 3\%$. Переориентация уменьшает толщину примерно до 60% от высоты леса. Такое увеличение плотности УНТ приводит к увеличению проводимости. Однако изменение углового распределения УНТ внутри композита может в некоторой степени уравновесить эффект уплотнения упаковки.

Определение величины сопротивления исследуемого нанокомпозита проводилось в нескольких точках для уменьшения возможных статистических ошибок при измерении. Одна из методик заключалась в измерении сопротивления поперек исследуемого образца, другая — в измерении сопротивления по длине образца с контролем расстояния между электродами для определения удельного сопротивления исследуемого нанокомпозитного материала. Измерение сопротивления по длине образца производилось с контролем расстояния между зондами. Зонды закреплялись на образце на определенном равном расстоянии для всей серии экспериментов. Для исследования электропроводности полимерных композитов с УНТ были синтезированы образцы: в частности эпоксидная матрица с неориентированными (ЭС+ПГО-УНТ) и ориентированными вертикально (ЭС+ВО УНТ) и горизонтально УНТ (ЭС+ГО УНТ).

Из рис. 4 видно, что проводимость композита с неориентированными нанотрубками при той же концентрации углеродных нанотрубок практически не изменилась по сравнению с чистой эпоксидной смолой (ЭС) без наполнителя. В то же время электропроводность композитов с вертикально и горизонтально ориентированными углеродными нанотрубками значительно выросла, более чем на 10 порядков. Образец ЭС+ГО УНТ был изготовлен путем прокатки вертикально ориентированного массива, что, конечно, сохраняет выделенное направление ориентации УНТ, но не делает их абсолютно параллельными относительно подложки, сохраняя концы нанотрубок перпендикулярными подложке. Этим можно объяснить слабое различие в поперечной и продольной проводимости. Проводимость же леса поперек образца значительно ниже проводимости вдоль УНТ.

В методе лазерной вспышки поверхность плоскопараллельного образца облучается лазерным импульсом длительностью 0.3 мс и измеряется температура на противоположной стороне образца. Возрастание

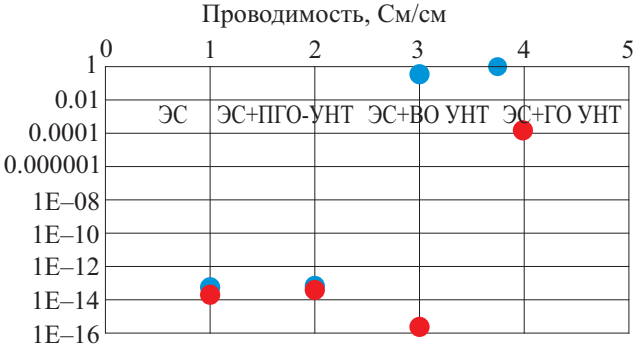


Рис. 4. Проводимость образцов: ЭС — эпоксидная смола, ЭС+ПГО-УНТ — эпоксидная смола с неориентированными нанотрубками, полученными методом ПГО; ЭС+ВО УНТ — эпоксидная смола с вертикально ориентированными нанотрубками; ЭС+ГО УНТ — эпоксидная смола с горизонтально ориентированными нанотрубками

температуры измеряется в зависимости от времени с помощью инфракрасного детектора. Это позволяет рассчитать коэффициент температуропроводности материала после соответствующей математической разработки. Температуропроводность α и в большинстве случаев удельная теплоемкость C_p могут быть определены по измеренному сигналу. Если известна плотность ρ, теплопроводность может быть рассчитана по формуле:

$$\lambda = \alpha \times C_p \times \rho.$$

Значительные погрешности в измерении теплопроводности могут возникать в результате теплового контакта и сопротивления образца. Это приводит к погрешности измерений тепловодности, как правило, 5–10%. В косвенных методах, таких как расчет теплопроводности по температуропроводности, погрешность определения значений плотности и теплоемкости образца будут также увеличивать погрешность экспериментальных значений теплопроводности.

Измеренные величины для композитов с неориентированными нанотрубками (ЭС+ПГО-УНТ) примерно совпадают с теплопроводностью для чистой эпоксидной смолы (рис. 5). Резкое увеличение теплопроводности — в 18.5 раз по сравнению с чистой эпоксидной смолой — наблюдалось в компо-

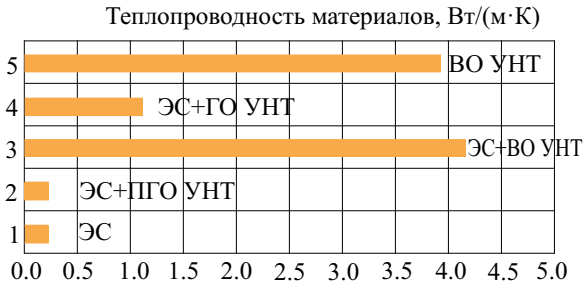


Рис. 5. Теплопроводность образцов: ЭС — эпоксидная смола; ЭС+ПГО-УНТ — эпоксидная смола с неориентированными нанотрубками, полученными методом ПГО; ЭС+ВО УНТ — эпоксидная смола с вертикально ориентированными нанотрубками; ЭС+ГО УНТ — эпоксидная смола с горизонтально ориентированными нанотрубками; ВО УНТ — массив вертикально ориентированных УНТ

зите с вертикально ориентированными углеродными нанотрубками (соответственно вдоль оси МУНТ). Композит с горизонтально ориентированными УНТ (ЭС+ГО УНТ) показал несколько более низкое увеличение — в 5 раз. Результаты измерений теплопроводности ЭС+ГО УНТ можно рассматривать как способ измерения поперечного транспорта тепла в УНТ, то есть перпендикулярно оси нанотрубки. Из вышеизложенного следует, что включение УНТ не приводит автоматически к увеличению теплопроводности композита. Одной из возможных причин низкой проводимости может быть несоосность и агломерация УНТ, делая расстояние между частицами больше, чем в случае тонкой дисперсии. Слабое усиление с неориентированными УНТ в ЭС+ПГО-УНТ указывает не только на уменьшенное количество нанотрубок в «правильном» направлении, но также и на наличие контактных термосопротивлений на границе нанотрубка—нанотрубка и нанотрубка—матрица, запрещающих перколяционный эффект в негомогенной системе. В отличие от неориентированных УНТ ориентированные соединяют верхнюю и нижнюю поверхности образца через всю толщу полимерного композита.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Применение ВО УНТ и впервые ГО УНТ в полимерных композитах позволяет существенно (на 10–12 порядков) увеличить их электропроводность ($\sigma = 0.85 \cdot 1/(\text{Ом} \cdot \text{см})$), тем самым переводя материал из разряда диэлектриков в разряд проводников.

2. Выравнивание УНТ может дать большой вклад в увеличение теплопроводности композита. УНТ могут обеспечить прямой контактный путь через всю толщу композита и, следовательно, высокую величину теплопроводности. Теплопроводность эпоксидной смолы с ВО УНТ (16.7% по объему) в 18.5 раз и впервые с ГО УНТ в 5 раз превышает теплопроводность исходной эпоксидной смолы, а также превышает теплопроводность эпоксидной смолы с неориентированными УНТ.

3. Упорядоченные микроструктуры, состоящие из ориентированных углеродных нанотрубок, могут быть успешно использованы для синтеза функциональных и конструкционных нанокомпозитных материалов для деталей космических аппаратов.

Статья подготовлена при финансовой поддержке Минобрнауки России по результатам исследований в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы» (уникальный идентификатор № RFMEFI60419X0237).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Панасюк М. И., Подзолко М. В., Калегаев В. В.* и др. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2018. № 6. С. 104. (*Panasyuk M. I., Podzolko M. V., Kalegaev V. V.* et al. // Moscow Univ. Phys. Bull. 2018. **73**. P. 687.)
2. https://technology.nasa.gov/patent/LAR-TOPS-53
3. https://technology.nasa.gov/patent/LAR-TOPS-292
4. https://technology.nasa.gov/patent/LAR-TOPS-5
5. *Kinloch I. A., Suhr J., Lou J.* et al. // Science. 2018. **362**. 6414. P. 547.
6. *De Volder M. F., Tawfick S. H., Baughman R. H.* et al. // Science. 2013. **339**. P. 535.
7. *Zhang K., Chai Y., Yuen M. M.* et al. // Nanotechnology. 2008. **19**, N 21. 215706.
8. *Kaur S., Raravikar N., Helms B. A.* et al. // Nature Communications. 2014. **5**. 3082.
9. *Hills G., Lau C., Wright A.* et al. // Nature. 2019. **572**. P. 595.
10. *Chen Y., Raravikar N. R., Schadler L. S.* et al. // Appl. Phys. Lett. 2002. **81**. 975.
11. *Kymakis E., Amartunga G. A.* // Appl. Phys. Lett. 2002. **80**. 112.
12. *Philip B., Abraham J. K., Chandrasekhar A.* et al. // Smart Mater. Struct. 2003. **12**. 935.
13. *Rege K., Raravikar N. R., Kim D.-Y.* et al. // Nano Lett. 2003. **3**. 829.
14. *Vigolo B., Penicaud A., Coulon C.* et al. // Science. 2000. **290**. 1331.
15. *Hinds B. J., Chopra N., Rantell T.* et al. //. Science. 2004. **303**. 62.
16. *Raravikar N. R., Schadler L. S., Vijayaraghavan A.* et al. // Chem. Mater. 2005. **17**. 974.
17. *Bauhofer W., Kovacs J. Z.* // Compos. Sci. Technol. 2009. **69**. 1486.
18. *Spitalsky Z., Tasis D., Papagelis K.* et al. // Prog. Polym. Sci. 2010. **35**. P. 357.
19. *Agari Y., Ueda A., Omura Y.* et al. // 1997. **38**. P. 801.
20. *Fischer J. E.* // Carbon Nanomaterials. Newyork: Taylor and francis group, 2006. P. 51.
21. *Thostenson E., Tsu-Wei C.* // Composites science and technology. 2005. **65**. P. 491.
22. *Zhang W.* et al. // Nanotechnology. 2004. **15**. P. 936.
23. *Song Y. S., Youn J. R.* // Carbon. 2005. **43**. P. 1378.
24. *Евсеева Л. Е., Танаева С. А.* // Latvijas Universitates, Polimeru Mehanikas Instituts. 2008. **44** (1). P. 117.
25. *Yadav R., Tirumali M., Wang X.* // Defence Technology. 2020. **16** (1). P. 107.
26. *Rawal S.* // Acta Astronautica. 2018. **146**. P. 151.
27. *Makunin A. V., Chechenin N. G., Vorobyeva E. A.* et al. // Inorganic Materials: Applied Research. 2018. **9** (3). P. 530.

Conductivity in composite materials based on oriented carbon nanotubes

E. A. Vorobyeva[1,3,a], **A. P. Evseev**[1,2], **V. L. Petrov**[1], **A. A. Shemukhin**[1], **N. G. Chechenin**[1]

[1]*Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics;* [2]*Department of physical electronics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia.*
[3]*National Research Center "Kurchatov Institute". Moscow 123182, Russia.*
E-mail: [a]*vorkate89@mail.ru.*

The prospects of composite materials based on polymer matrices with the inclusion of carbon nanotubes, including oriented carbon nanotubes, as both functional and structural materials for nanosatellites are considered.

The thermal conductivity and electrical conductivity of the composites has been measured. Techniques for producing carbon nanotubes, including vertically oriented nanotubes synthesized on filaments, and coaxial regular nanomesostructures as a functional additive for varying the properties of materials are proposed.

Keywords: oriented multi-walled carbon nanotubes, electrical conductivity and thermal conductivity of composites, functional and structural materials, CubeSats.
PACS: 65.80.+n.
Received 12 October 2020.

English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2021. **76**, No. 1. Pp. 29–35.

Сведения об авторах

1. Воробьева Екатерина Андреевна — науч. сотрудник, тел: (495) 939-24-16, e-mail: vorkate89@mail.ru.
2. Евсеев Александр Павлович — аспирант.
3. Петров Василий Львович — мл. науч. сотрудник, конструктор 1 категории.
4. Шемухин Андрей Александрович — канд. физ.-мат. наук, зав. лабораторией, зам. директора.
5. Чеченин Николай Гаврилович — доктор физ.-мат. наук, зав. отделом.