

УДК 678.747.2

*Л.В. Соловьянчик¹, С.В. Кондрашов¹***ПЕРСПЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК
ДЛЯ ПРИДАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ
ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СВОЙСТВ (обзор)**

DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-9-11-21

Представлен обзор научно-технической литературы, посвященный различным способам получения электропроводящих полимерных материалов и покрытий. Показана перспективность использования углеродных нанотрубок (УНТ) для придания поверхности материалов высоких электропроводящих свойств. Описан механизм формирования структурированной поверхности полимерных материалов с УНТ. Показано, что использование УНТ позволяет придавать поверхности не только электропроводящие, но и высоко-(супер-)гидрофобные свойства.

Ключевые слова: электропроводящие материалы, электропроводящие покрытия, супергидрофобные поверхности, токопроводящие частицы, углеродные нанотрубки.

*L.V. Solovyanchik¹, S.V. Kondrashov¹***THE PROSPECTS OF USING CARBON NANOTUBES
TO IMPART FUNCTIONAL PROPERTIES TO THE SURFACE
OF POLYMER MATERIALS (review)**

Presents a review of the scientific literature on various methods for producing electrically conductive polymer materials and coatings. The prospects of using carbon nanotubes (CNT) to impart high electrical properties to the surface of materials are shown. The mechanism of formation of the structured surface of polymer materials with CNT is described. It is shown that the use of CNT is a promising way to impart electrically conductive and superhydrophobic properties to the surface.

Keywords: electrically conductive material, electrically conductive coating, superhydrophobic properties, electric conductivity, carbon nanotubes.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

Придание поверхности изделий из полимерных материалов функциональных свойств является актуальной задачей для авиационного материаловедения [1, 2].

Анализ метеорологических факторов, влияющих на безопасность полета беспилотного летательного аппарата (БПЛА), показал, что в облаках и вблизи облаков, а также во время осадков, несущих электрические заряды, вследствие трения о поверхность летательного аппарата частиц атмосферной влаги (капель, снежинок) и пыли происходит электризация его поверхности [3].

Статическая электризация – это накопление электрических зарядов на поверхности материалов с низкой электропроводностью и большим поверхностным сопротивлением (10^{14} – 10^{18} Ом).

Если носители зарядов обеих полярностей распределены в материале равномерно, то он является электрически нейтральным. При переносе электронов с одной части тела в другую или при переходе заряда от одного тела к другому на его поверхности образуются заряды статического электричества [4].

Накопление зарядов статического электричества на поверхности корпуса БПЛА способно вызывать перебои в работе радиоэлектронного оборудования [5, 6], повышать вероятность попадания молнии [7] и создавать угрозу возникновения очагов возгорания [8].

Для предотвращения электризации поверхности корпуса БПЛА необходимо создание замкнутого электропроводящего контура по всей поверхности корпуса – например, путем приформовки к пластику медных и алюминиевых фольг или вязаных металлических сеток [9–11]. Однако данные технологии подразумевают увеличение массы корпуса и их применение является нецелесообразным в конструкциях малых БПЛА с номинальной массой не более 500 кг.

Для БПЛА без антистатической защиты рекомендуется избегать полетов в облаках и в непосредственной близости от грозовых облаков, обладающих наиболее мощными объемными электрическими зарядами, не производить полет в условиях повышенной влажности воздуха на высотах менее 3 км в диапазоне температур от +5 до –20 °С.

Таким образом, для расширения возможности применения летательных аппаратов малой авиации актуальной задачей является разработка электропроводящих полимерных материалов и/или покрытий с минимальными весовыми характеристиками.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 15. «Наноструктурированные, аморфные материалы и покрытия» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [12].

Электропроводящие полимерные композиционные материалы

Одним из возможных вариантов предотвращения электризации поверхности БПЛА является использование в конструкции полимерных композиционных материалов (ПКМ) с антистатическими (электропроводящими) свойствами. Кроме того, использование в составе полимерного материала токопроводящих частиц позволяет создавать изделия не только с поверхностной, но и с трансверсальной проводимостью, которые предназначены для экранирования радиоэлектронного оборудования от внешнего воздействия электромагнитного излучения.

Для получения электропроводящих пластиков используют различные токопроводящие частицы – например, технический углерод [13–20], углеродные нанотрубки (УНТ) [21–23], углеродсодержащие [24, 25] и металлуглеродные [26] наночастицы.

По результатам экспериментов, представленных в работе [18], показано, что композиции на основе полиэтилена с добавками технического углерода являются электропроводящими с величинами удельного объемного сопротивления до 10^3 Ом·см и удельного поверхностного сопротивления до 10^4 Ом. Описанные в данной работе материалы также характеризуются высокой термостабильностью и технологичностью.

В работе [19] продемонстрировано, что введение в состав ПКМ на основе полипропилена технического углерода с концентрацией больше порога перколяции позволяет снизить величину удельного сопротивления до 10^3 См·м, что на 8 порядков меньше, чем у исходного материала.

Электропроводящие характеристики полимерных материалов напрямую зависят от количества наполнителя и равномерности его распределения по объему. Из научно-технических литературных данных [13, 20] известно, что содержание 10–15 % (по массе) технического углерода в полимерной матрице является достаточным для того, чтобы придать поверхности антистатические свойства. Однако для получения материалов, проводящих электрический ток, концентрация углерода должна быть увеличена до 20–40 % (по массе), что обусловлено необходимостью обеспечения непосредственного контакта между частицами наполнителя или доведения расстояния между ними до нескольких десятых нанометров [27].

В полимерных композитах агрегаты технического углерода, соединяясь друг с другом за счет сил Ван дер Ваальса, образуют агломераты [28], которые также значительно влияют на их электропроводимость. Распределение по размерам у агломератов еще шире, чем у агрегатов [29]. Природа поверхности технического углерода оказывает влияние на контактное сопротивление между частицами [30]. Например, кислородсодержащие группы на поверхности печного технического углерода образуют диэлектрические слои, снижая проводимость [31].

С целью одновременного сокращения количества технического углерода и повышения электропроводящих свойств материала возможно применение комбинации наполнителей. Так, в работе [32] описан способ получения электропроводящей термопластичной композиции на основе полиэтилена высокого давления и этиленпропилендиенового каучука, в которой в качестве наполнителей использована смесь технического углерода и графита.

Одним из наиболее перспективных способов придания электропроводящих свойств полимерным композитам является использование нативных и функционализированных углеродных нанотрубок (УНТ) [32–43]. Например, в работе [37] для придания электропроводимости в состав связующего вводили 0,8 % (по массе) функционализированных УНТ, а затем получали ПКМ с использованием инфузионных технологий. Образцы полученного стеклопластика имели удельное сопротивление на уровне $2,5 \cdot 10^5$ Ом·см.

Введение в состав полимерного связующего нековалентно функционализированных УНТ позволило получить стеклопластики с удельным объемным электрическим сопротивлением в поперечном и продольных направлениях $9 \cdot 10^2$ и 30–50 Ом·см соответственно и повысить трансверсальную электропроводимость углекомпозитов более чем в 70 раз [38].

Однако, несмотря на более чем двадцатилетнюю историю исследований, посвященных разработке получения нанокompозитов на основе УНТ, их потенциал раскрыт не полностью [39].

Одной из ключевых проблем приготовления нанокompозитов является равномерное распределение нанотрубок по объему полимерной матрицы. Высокая удельная поверхность УНТ, с одной стороны, обеспечивает эффективное перераспределение нагрузки по матрице композита при малых концентрациях нанонаполнителя, а с другой – затрудняет разрушение исходных агломератов и способствует агрегации предварительно диспергированных УНТ. Оставшиеся или вновь образовавшиеся агрегаты приводят к ухудшению свойств нанокompозитов [40–43].

Однако в работе [44] показано, что введение в состав нанокompозита фторкремнийорганического модификатора позволяет эффективно регулировать его электропроводность (от 2,2 до 27,5 См/м) и вязкость модифицированных связующих при постоянной концентрации УНТ.

Несмотря на то, что введение токопроводящих частиц в полимерный материал позволяет придавать ему не только антистатические, но и радиозащитные свойства, для их изготовления необходимо специализированное оборудование, что увеличивает себестоимость готовой продукции. Поэтому наиболее целесообразно для придания полимерным материалам антистатических свойств использование токопроводящих полимерных покрытий.

Электропроводящие покрытия

В настоящее время разработан широкий ассортимент токопроводящих эмалей – например, марок АК-562, АС-588, ХВ-5211, ХС-567, ХС-5132 и др. Объемное электросопротивление получаемых из них покрытий, как правило, находится в пределах 10^5 – 10^2 Ом·м [45].

В качестве токопроводящих частиц в составе полимерных покрытий широко применяются технический углерод, графит, углеродное волокно, порошки металлов: меди, цинка, алюминия, нержавеющей стали и др. [46].

Серебро и золото обладают наивысшей среди металлов электропроводностью. Содержание металла в лакокрасочных материалах зависит от того, каким способом их наносят на поверхность. При нанесении кистью количество электропроводящего наполнителя – не менее 50 % (по массе), при распылении 35 % (по массе). Токопроводящие лакокрасочные материалы приготавливаются диспергированием порошка металла в растворе связующего в органическом растворителе. Однако токопроводящие покрытия с весьма высоким содержанием металлических порошков имеют очень высокую насыпную плотность, поэтому их трудно нанести на подложку [47].

Обычно при изготовлении токопроводящих красок используют смесевые наполнители. Например, смесь графита и сажи в количестве 59–61 % (по массе) и порошок карбонильного железа в количестве 5–8,2 % (по массе) позволяют получать покрытия с удельной электропроводностью 10^2 Ом·см [48].

В патенте [49] описан способ получения электропроводящей краски для радиопоглощающих наполнителей с удельной электропроводностью на уровне 10^3 – 10^4 Ом·см, где в качестве наполнителя использована смесь графита и сажи в количестве 55–64 % (по массе).

Технический углерод также широко используется в качестве токопроводящего наполнителя [50], поскольку не приводит к деструкции полимера, как в случае использования металлических порошков [51], поэтому рекомендуется использовать его при содержании не более 23 % (по массе) [52]. Например, введение 21 % (по массе) технического углерода позволяет получать покрытия с поверхностным сопротивлением на уровне 10^3 Ом/□ [53].

Наполнитель в виде прослойки мешает слиянию расплавленных частиц при пленкообразовании, в результате чего может происходить растрескивание получаемого покрытия. На рис. 1 представлены результаты исследования покрытий с помощью растрового электронного микроскопа при различном содержании технического углерода в составе порошковой краски марки ОХТЭК-1 [54].

Несмотря на то, что увеличение содержания технического углерода в порошковой смеси положительно влияет на электропроводимость покрытий, одновременно снижается однородность покрытия, что сопровождается повышением его пористости. Это связано с тем, что наличие технического углерода препятствует равномерному пленкообразованию.

Для снижения концентрации наполнителя и повышения электропроводимости лакокрасочных покрытий в зарубежных исследованиях большое внимание уделяется использованию УНТ [55].

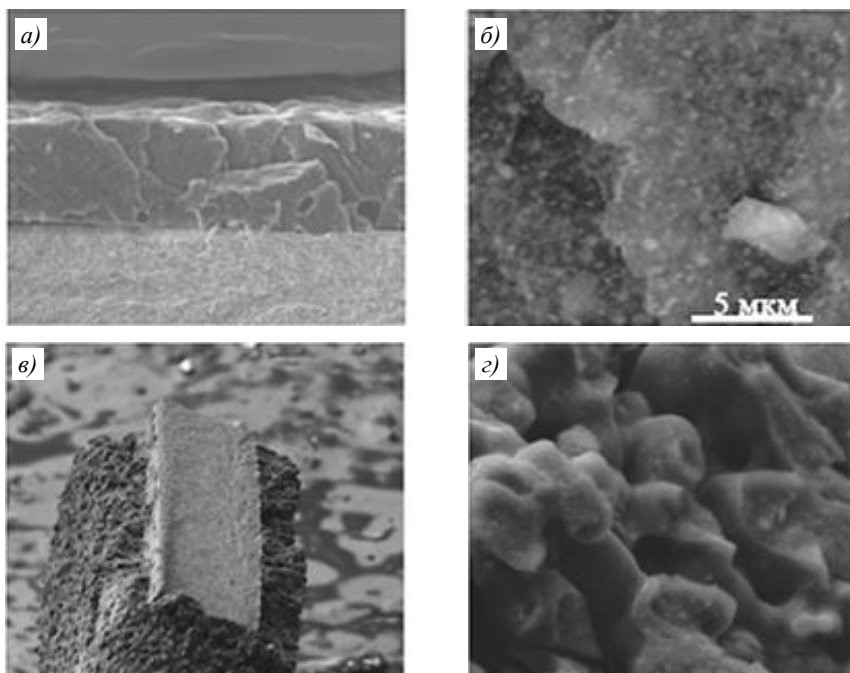


Рис. 1. Микроизображения (а, в – общий вид; б, г – структура) скола покрытия с содержанием технического углерода 12,5 (а, б) и 20 % (по массе) (в, г)

Одной из важнейших характеристик смеси УНТ+полимер является величина порога перколяции – концентрации наполнителя, при превышении которой начинается резкое увеличение электропроводимости [56]. Величину этого порога можно легко оценить, используя концепцию исключенного объема Онзагера (V_{ex}), в рамках которой предполагается, что порог перколяции определяется не истинным объемом проводящих волокон, а объемом вокруг волокна, внутрь которого другое волокно проникнуть не может. Для цилиндров с аспектным соотношением $\mu = \frac{L}{W}$ (L , W – длина и диаметр ци-

линдра соответственно) и объемом $V = \frac{W^2 L \pi}{2}$, равномерно распределенных по объему и ориентированных случайным образом, величина исключенного объема составит

$$V_{ex} \approx \frac{WL^2 \pi}{2}, \quad (1)$$

величина порога перколяции определяется выражением

$$\Phi_c \approx \frac{0,7}{\mu}. \quad (2)$$

Как видно из приведенного выражения (2), величина порога уменьшается с увеличением аспектного соотношения μ .

С увеличением концентрации УНТ больше порогового значения проводимость растет сначала в результате формирования новых проводящих путей, а затем в результате уменьшения контактного сопротивления между УНТ из-за сокращения расстояния между ними (рис. 2).

Электропроводимость, помимо контактного сопротивления между отдельными трубками, определяется процессом формирования непрерывной сети из УНТ. Локализация электропроводящего наполнителя в полимере уменьшает расстояние между УНТ, приводит к снижению величины порога перколяции и, как следствие, к увеличению электропроводимости.



Рис. 2. Формирование электропроводящей сети при повышении концентрации углеродных нанотрубок [57]

На локализацию электропроводящего наполнителя существенное влияние также оказывают процессы агрегации УНТ, протекающие при испарении растворителей из жидкой пленки.

Механизм структурообразования полимерных пленок заключается в следующем. При улетучивании растворителей вследствие неодинаковой концентрации растворителя в поверхностном (C_2) и глубинном (C_1) слоях создается градиент поверхностного натяжения по толщине пленки: $\Delta\sigma = \sigma_2 - \sigma_1$ (рис. 3). Его значение тем больше, чем больше разность $C_1 - C_2$ и чем сильнее различаются поверхностные натяжения пленкообразователя и растворителя.

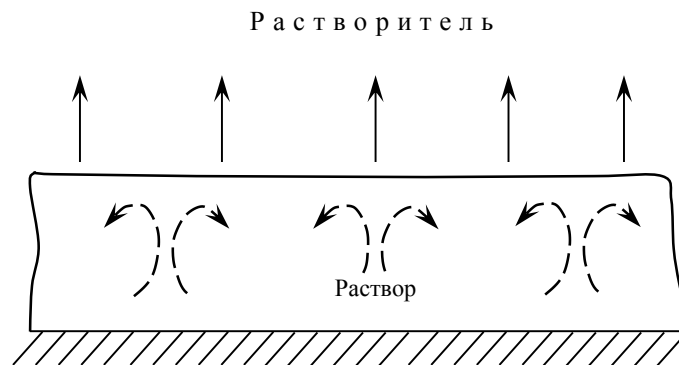


Рис. 3. Схема движения растворителя и раствора при пленкообразовании

Наличие градиента напряжения $\Delta\sigma$ вызывает образование турбулентных потоков в растворе, которые при отверждении придают поверхности соответствующую структуру. Структурирование поверхности с использованием УНТ позволяет придавать материалам не только электропроводящие, но и сверхгидрофобные свойства [58].

Электропроводящие гидрофобные поверхности с углеродными нанотрубками

Перспективность использования углеродных частиц в качестве функционального наполнителя для одновременного придания материалам электропроводящих и высокогидрофобных свойств показана в работах [59–61].

В работе [59] приведены исследования, посвященные выращиванию слоя модифицированных УНТ на предварительно текстурированной методом травления поверхности нержавеющей стали марки N304. Данный способ позволил достичь значений угла смачивания до 170 градусов и поверхностного сопротивления – от 1 до 10 кОм (по сравнению с 2–3 Ом для стальной пластины).

В работе [60] продемонстрирован способ получения многофункциональной поверхности за счет припрессовывания слоя из УНТ к поверхности различных полимеров. По результатам такого эксперимента достигнуты значения угла смачивания ~160 градусов, угла скатывания – до 2 градусов и поверхностного сопротивления 10–10³ Ом/□.

В работе [61] описан способ получения гидрофобного электропроводящего стеклопластика на основе эпоксидного связующего, модифицированного теломерами тетрафторэтилена и функционализированными УНТ. Показано, что использование такого способа позволяет получать пластики с углом смачивания до 136 градусов и поверхностным сопротивлением на уровне 300–500 Ом/□.

Однако, несмотря на высокие функциональные свойства полученных в работах [59–61] покрытий, описанные способы имеют ряд недостатков. Во-первых, поверхностный слой, состоящий исключительно из УНТ, за счет слабого взаимодействия с полимерной матрицей или металлической подложкой не стоек к истиранию. Вторым недостатком являются технологические трудности, связанные с получением таких поверхностей на крупногабаритных сложнопрофильных конструкциях.

В работах [62, 63] описаны наиболее технологичные методы получения многофункциональных покрытий – нанесение дисперсий из углеродных наночастиц и ряда гидрофобных полимерных матриц. Угол смачивания изготовленных образцов в представленных работах превышал значение 150 градусов, а поверхностное сопротивление варьировалось от 10² до 10⁶ Ом/□.

Получаемые методом нанесения из дисперсий покрытия, как правило, неоднородны по толщине и составу, а их свойства и структура в значительной степени определяются характером взаимодействия функционального наполнителя с полимерной матрицей и между собой. На рис. 4 представлены микроструктуры покрытий на основе фторполимерной матрицы, наполненных графеновыми пластинками и углеродной сажей в различных соотношениях [64].

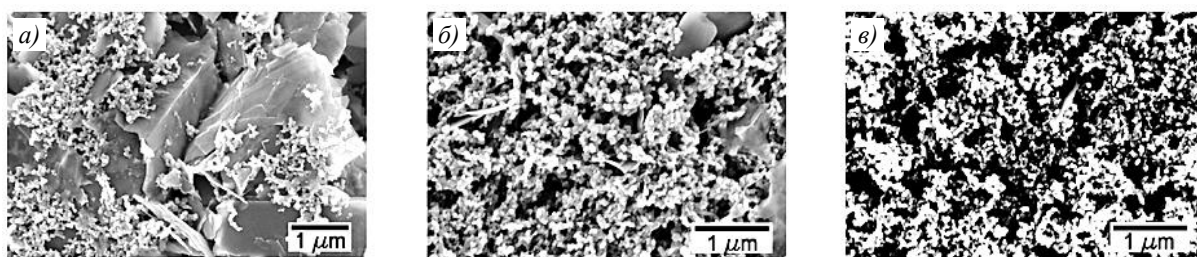


Рис. 4. Микроструктуры (СЭМ) гибридных фторполимерных покрытий, содержащих графеновые пластинки и углеродную сажу в соотношениях соответственно 1:0,5 (а), 1:1 (б) и 1,5:1 (в)

После нанесения и испарения дисперсионной среды углеродные частицы самоорганизуются на поверхности в монослой (рис. 4, в) либо агрегируют с образованием би- (рис. 4, б) или многомодальной шероховатости (рис. 4, а).

Так, в работе [65] получены нанокомпозитные покрытия на основе фторполимерной матрицы с двумя типами УНТ, обладающие поверхностным сопротивлением – до 16 Ом/□, углом смачивания – до 140 градусов и водоотталкивающими свойствами.

Материалы и покрытия, обладающие одновременно электропроводящими и сверхгидрофобными свойствами, могут использоваться в конструкции БПЛА для антистатической защиты, экранирования радиоэлектронного оборудования от воздействия электромагнитных импульсов естественного (молниевый разряд) и искусственного происхождения, гидроизоляции конструкции, а также повышения эффективности тепловых противообледенительных систем.

Заключения

На основании проведенного в работе анализа различных способов получения электропроводящих полимерных материалов и покрытий показано, что одним из наиболее перспективных является использование в качестве токопроводящего наполнителя как нативных, так и функционализированных УНТ.

По сравнению с техническим углеродом использование в составе полимерного материала УНТ позволяет существенно снизить количество токопроводящего наполнителя, а также повысить электропроводность покрытий и ПКМ как в продольном, так и в поперечном направлении.

За счет своих уникальных свойств УНТ в составе полимера в процессе улетучивания растворителей формируют электропроводящие сети и особую структуру поверхности, что в комплексе позволяет придавать материалам не только электропроводящие, но и сверхгидрофобные свойства.

Такие материалы позволяют создавать водонепроницаемые электропроводящие поверхности, которые могут найти применение в различных отраслях промышленности.

Библиографический список

1. Каблов Е.Н. Авиакосмическое материаловедение // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2008. № 3. С. 2–14.
2. Kablov E.N. Chemistry in aviation materials science // Russian Journal of General Chemistry. 2011. Vol. 81. No. 5. P. 967–969.
3. Федусив И.Н., Чермошенцев С.Ф. Двигательная электризация беспилотного летательного аппарата // XXII Туполевские чтения (школа молодых ученых). Казань: КНИТУ-КАИ, 2015. С. 150–153.
4. Хорват Т., Берта И. Нейтрализация статического электричества / пер. с англ. А.В. Орлова. М.: Энергоатомиздат, 1987. 104 с.
5. Гайнутдинов Р.Р., Чермошенцев С.Ф. Методология обеспечения внутрисистемной электромагнитной совместимости бортового оборудования беспилотных летательных аппаратов // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2016. № 4. С. 155–160.
6. Горлов М.И., Емельянов А.В., Плебанович В.И. Электростатические заряды в электронике. Минск: Белорусская наука, 2006. 295 с.
7. Hirano Y., Yoshimura A. Coupled thermal-electrical analysis for carbon fiber/epoxy composites exposed to simulated lightning current // Composites. Part A. 2010. No. 41. P. 973–981.
8. Ткаченко А.Н., Вишняков Л.Р., Гогаев К.А. и др. Медные микропровода для молниезащитных сеток трикотажной структуры // Технологические системы. 2009. № 4. С. 16–20.
9. Полозков В.Т., Гончарюк В.А., Линецкий В.А., Султанович А.И. Охрана труда на нефтеперерабатывающих и нефтехимических заводах. М.: Химия, 1973. 296 с.
10. Халилов Ф.Х. Электромагнитная совместимость электроэнергетики, техносферы и биосферы: учеб. пособие. СПб.: Центр подготовки кадров энергетики, 2014. 190 с.
11. Мельников А.А., Щур П.А. Прозрачные электропроводящие антиотражающие покрытия на основе ИТО, SiO₂, TiO₂ // Труды ВИАМ. 2019. № 8 (80). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.06.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-8-56-66.

12. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
13. Княжева О.А., Бакланова О.Н., Жансакова К.С. и др. Физико-механические свойства и электропроводность композиций полипропилен–технический углерод // 9-я Междунар. науч.-техн. конф. «Техника и технология нефтехимического и нефтегазового производства». Омск, 2019. С. 165–165.
14. Low-resistivity polymer positive temperature coefficient material and preparation method thereof: pat. CN 102167859; filed 20.01.11; publ. 31.08.11.
15. Improved thermal conductive polymeric PTC compositions: pat. US 2008039575; filed 03.08.07; publ. 14.02.08.
16. Polyolefin/carbon black PTC conductive composite material and preparing method thereof: pat. CN 1528817; filed 30.09.03; publ. 15.09.04.
17. PTC conductive composition containing a low molecular weight polyethylene processing aid: pat. US 6620343; filed 19.03.02; publ. 16.09.03.
18. Рагушина М.Д., Евсеева К.А., Калугина Е.В., Ушакова О.Б. Полимерные композиционные материалы с антистатическими и электропроводящими свойствами // *Пластические массы*. 2021. № 3–4. С. 6–9.
19. Степашкина А.С., Цобкалло Е.С., Алешин А.Н. Моделирование электропроводности композитных материалов, полученных на основе полипропилена и технического углерода // *Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности*. 2014. Т. 25. С. 51–54.
20. Матковский П.Е., Седов И.В., Саратовских С.Л., Яруллин Р.С. Термопластичные композиционные материалы // *Все материалы. Энциклопедический справочник*. 2011. № 2. С. 2–16.
21. Lubineau G., Rahaman A. A review of strategies for improving the degradation properties of laminated continuous-fiber/epoxy composites with carbon-based nanoreinforcements // *Carbon*. 2012. Vol. 50. P. 2377–2395.
22. Лукина Е.А., Зайцев Д.В., Романенко В.А. Структура и свойства композиционного материала на основе алюминиевого сплава с добавлением углеродных нанотрубок // *Авиационные материалы и технологии*. 2019. № 4 (57). С. 27–34. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-4-27-34.
23. Garcia E.J., Wardle B.L., Hart J.A., Yamamoto N. Fabrication and multifunctional properties of a hybrid laminate with aligned carbon nanotubes grown In Situ // *Composites Science and Technology*. 2008. Vol. 68. P. 2034–2041.
24. Гуняев Г.М., Каблов Е.Н., Алексахин В.М. Модифицирование конструкционных углепластиков углеродными наночастицами // *Российский химический журнал*. 2010. Т. LIV. № 1. С. 5–11.
25. Душин М.И., Донецкий К.И., Тимошков П.Н., Караваев Р.Ю. Исследование процесса безавтоклавного формования семипрегов на основе углеродных наполнителей (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2018. № 9 (69). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.06.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-9-21-31.
26. Popkov O.V., Yurkov G.Y., Fionov A.S. Stabilization of nanoparticles on the surface of detonation nanodiamond // *Physics, chemistry and application of nanostructures* / eds. V.E. Borisenko, S.V. Gaponenko, V.S. Gurin. Singapore: World Scientific, 2009. P. 369–372.
27. Гуль В.Е., Шенфиль Л.З. Электропроводящие полимерные композиции М.: Химия, 1984. 240 с.
28. Ивановский В.И. Технический углерод. Процессы и аппараты: учеб. пособие. Омск: Тех-углерод, 2004. 228 с.
29. Donnet J.B., Bansal R.C., Wang M.J. Carbon Black: Science and Technology. 2nd ed. New York: Marcel Dekker Inc., 1993. 461 p.
30. Ключко Б.Н., Зачатейский Е.Е., Биидер В.Я. Влияние дисперсности и структурности сажи на ее электрическое сопротивление // *Каучук и резина*. 1969. № 8. С. 22–24.

31. Sommers D.J. Carbon black for electrically conductive plastics // *Polymer Plastics Technology and Engineering*. 1984. Vol. 23 (1). P. 83–98.
32. Сафронов В.А., Ключкова Д.А., Селезнев А.А. Электропроводящие термопластичные эластомеры на основе полиолефинов // XXII Региональная конф. молодых ученых Волгоградской области. Волгоград, 2017. С. 26–27.
33. Bauhofer W., Kovacs J.Z. A review and analysis of electrical percolation in carbon nanotube polymer composites // *Composites Science and Technology*. 2009. Vol. 69. P. 1486–1498.
34. Polymer–carbon nanotube composites. Preparation, properties and applications / ed. by T. McNally, P. Pötschke. Woodhead Publishing Limited, 2011. 820 p.
35. Carbon Nanotubes – Polymer Nanocomposites / ed. by S. Yellampalli. Published by InTech., 2011. 396 p.
36. Иржак В.И. Эпоксидные композиционные материалы с углеродными нанотрубками // *Успехи химии*. 2011. № 8. С. 821–839.
37. Раков Э.Г. Углеродные нанотрубки в новых материалах // *Успехи химии*. 2013. Т. 82. № 1. С. 227–247.
38. Reia da Costa E.F., Skordos A.A., Partridge I.K., Rezai A. RTM processing and electrical performance of carbon nanotube modified epoxy/fibre Composites // *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2012. Vol. 43. No. 4. P. 593–602.
39. Бадамшина Э.Р., Гафурова М.П., Эстрин Я.И. Модифицирование нанотрубок и синтез полимерных композитов с их участием // *Успехи химии*. 2010. Т. 79. № 11. С. 1027–1063.
40. Grady B.P. Carbon Nanotube-Polymer Composites: Manufacture, Properties, and Applications. Wiley, 2011. 352 p.
41. Troung V.T., Tsang K.M.C., Keough S.J., St John N.G. Effect of Sonication on the Mechanical Properties of Poly Vinyl Alcohol // Carbon Nanotube Composites. 2006. No. 6415. P. 641–503.
42. Кондрашов С.В., Шашкеев К.А., Петрова Г.Н., Мекалина И.В. Полимерные композиционные материалы конструкционного назначения с функциональными свойствами // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № 5. С. 405–419. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-5-405-419.
43. Акатенков Р.В., Алексахин В.М., Аношкин И.В., Бабин А.Н., Богатов В.А., Грачев В.П., Кондрашов С.В., Минаков В.Т., Раков Э.Г. Критерий эффективности использования функционализированных углеродных нанотрубок для улучшения физико-механических свойств эпоксидных смол // *Авиационные материалы и технологии*. 2010. № 3 (16). С. 22–27.
44. Соловьянчик Л.В., Шашкеев К.А., Солдатов М.А. Способ управления электропроводящими свойствами полимерной композиции // *Вестник Московского авиационного института*. 2017. Т. 24. № 4. С. 184–194.
45. Яковлев А.Д. Химия и технология лакокрасочных покрытий: учебник для вузов. СПб.: Химиздат, 2010. 448 с.
46. Матковский П.Е., Седов И.В., Саратовских С.Л., Яруллин Р.С. Термопластичные композиционные материалы // *Энциклопедия инженера-химика*. 2011. № 6. С. 49–57.
47. Ричардсон М. Промышленные полимерные композиционные материалы М.: Химия, 1980. С. 472.
48. Составы для электропроводящих покрытий и способ изготовления твердых электропроводящих покрытий: пат. 2460750 Рос. Федерация. № 2011115573/05; заявл. 21.04.11; опубл. 10.09.12.
49. Кац Г.С., Милевски Д.В. Наполнители для полимерных композиционных материалов: справочное пособие. М.: Химия, 1981. С. 736.
50. Электропроводящая краска для радиопоглощающих наполнителей: пат. 2472825 Рос. Федерация. № 2011145154/05; заявл. 09.11.11; опубл. 20.01.13.
51. Щибря Н.Г. Антистатические декоративные покрытия на основе порошкового покрытия // *Лакокрасочные материалы и их применение*. 1996. № 12. С. 19–20.
52. Толмачева Д. Порошковые краски с металлическим эффектом. Особенности производства // *Промышленная окраска*. 2011. № 2. С. 33–34.

53. Языков С.Ю., Даммер В.Х., Панин С.В., Вечкин Б.Б. Антистатические композиционные покрытия для защиты магниевых сплавов на основе порошковых красок, обработанных в планетарной шаровой мельнице // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2014. Т. 325. № 2. С. 105–111.
54. Кондрашов Э.К. Лакокрасочные покрытия специального назначения // Лакокрасочные материалы и их применение. 1994. № 11–12. С. 23–24.
55. Guldi D.M., Nazario M. Carbon Nanotubes and Related Structures: Synthesis, Characterization, Functionalization, and Applications. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co., 2010. P. 562.
56. Lordi V., Yao N. Molecular mechanics of binding in carbon-nanotube–polymer composites // Journal of Materials Research. 2000. Vol. 15. No. 12. P. 2770–2779.
57. Fritzsche J., Lorenz H., Kluppel M. et al. Elastomer–carbon nanotube composites in Polymer–carbon nanotube composites. Preparation, properties and applications / ed. by T. McNally, P. Pötschke. Woodhead Publishing Limited, 2011. 820 p.
58. Бойнович Л.Б., Емельяненко А.М. Гидрофобные материалы и покрытия: принципы создания, свойства и применение // Успехи химии. 2008. Т. 77. № 7. С. 619–638.
59. Zou J., Chen H., Chunder A. et al. Preparation of a Superhydrophobic and Conductive Nanocomposite Coating from a Carbon-Nanotube-Conjugated Block Copolymer Dispersion // Advanced Materials. 2008. Vol. 20. No. 17. P. 3337–3341.
60. Peng M., Liao Z., Qi J., Zhou Z. Nonaligned carbon nanotubes partially embedded in polymer matrixes: a novel route to superhydrophobic conductive surfaces // Langmuir. 2010. Vol. 26. No. 16. P. 13572–13578.
61. Каблов Е.Н., Соловьянчик Л.В., Кондрашов С.В., Юрков Г.Ю., Бузник В.М., Куш П.П., Кичигина Г.А., Кириухин Д.П., Дьячкова Т.П. Электропроводящие гидрофобные полимерные композиционные материалы на основе окисленных углеродных нанотрубок, модифицированных теломерами тетрафторэтилена // Российские нанотехнологии. 2016. Т. 11. № 12. С. 91–97.
62. Das A., Nayraci H.T., Tiwari M.K. et al. Superhydrophobic and conductive carbon nanofiber/PTFE composite coatings for EMI shielding // Journal of colloid and interface science. 2011. Vol. 353. No. 1. P. 311–315.
63. Han J.T., Kim S.Y., Woo J.S., Lee G.W. Transparent, conductive, and superhydrophobic films from stabilized carbon nanotube/silane sol mixture solution // Advanced Materials. 2008. Vol. 20. No. 19. P. 3724–3727.
64. Asthana A., Maitra T., Büchel R., Tiwari M. K., Poulikakos D. Multifunctional superhydrophobic polymer/carbon nanocomposites: graphene, carbon nanotubes, or carbon black? // ACS applied materials & interfaces. 2014. Vol. 6. No. 11. P. 8859–8867.
65. Соловьянчик Л.В., Кондрашов С.В., Нагорная В.С., Волков И.А., Дьячкова Т.П., Борисов К.М. Электропроводящие, высокогидрофобные наноконкомпозиты на основе фторполимера с углеродными нанотрубками // Журнал прикладной химии. 2018. Т. 91. № 10. С. 1462–1467.