ПРИМЕНЕНИЕ НАНОМАТЕРИАЛОВ И НАНОТЕХНОЛОГИЙ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Обзорная статья
УДК 691.57
https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-2-139-151

CC BY 4.0

Антистатические полимерные материалы

Павел Александрович Юдаев, Бакари Тамбура, Евгений Михайлович Чистяков*
Российский химико-технологический университет им Д.И. Менделеева, Москва, Россия
* Автор, ответственный за переписку: e-mail: ewgenijj@rambler.ru

АННОТАЦИЯ: Введение. В связи с растущим спросом к условиям жизни и работы в гражданском и промышленном строительстве возрастает необходимость в качественных строительных материалах, обладающих требуемым набором эксплуатационных свойств. Полимерные армированные композиционные материалы являются перспективными материалами в строительной индустрии благодаря их высокой прочности, долговечности, надежности и экономичности. Полимеры, такие как поливинилхлорид, полиуретаны, полиакрилаты, эпоксидные смолы, полипропилен, используются в строительстве для изготовления элементов декора, наливных полов, покрытий приборов и оборудования. Однако применение полимерных материалов создает риски поражения электрическим током в связи с генерацией статического заряда. Применение электропроводящих наноматериалов в качестве наполнителей позволяет снизить удельное сопротивление полимерных материалов и замедлить поток электрических зарядов. **Основная часть.** В настоящей обзорной статье приведены достоинства и недостатки антистатических добавок для полимерных материалов, применяемых в промышленности и в строительной индустрии. **Заключение.** Анализ литературы показал, что за последние семь лет наибольшее число работ посвящено углеродным материалам в качестве антистатических добавок (8 статей), наночастицам металлов и оксидов металлов (7 статей), ионным жидкостям (7 статей), полианилину (7 статей). Наиболее изученными параметрами антистатических полимерных материалов являются удельное поверхностное R_s и объемное R_v сопротивление. Согласно данным рассмотренных статей, наночастицы металлов и оксидов металлов являются наиболее подходящими антистатическими добавками к полимерным материалам, поскольку хорошо диспергируются в полимерной матрице. Однако необходимы дальнейшие исследования для устранения негативного влияния наночастиц на механические свойства полимерных материалов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: наночастицы, статическое электричество, углеродные нанотрубки, оксид графена, ионные жидкости, строительная индустрия.

БЛАГОДАРНОСТИ: Исследование выполнено за счет гранта РНФ № 22-43-02056, https://rscf.ru/project/22-43-02056/.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Юдаев П.А., Тамбура Б., Чистяков Е.М. Антистатические полимерные материалы // Нанотехнологии в строительстве. 2023. Т. 15, № 2. С. 139–151. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-2-139-151. – EDN: ASGLVK.

ВВЕДЕНИЕ

Статическое электричество является серьезной проблемой на производстве [1], в промышленном и гражданском строительстве, больничных палатах [2]. Это объясняется тем, что статические заряды создают опасность возгорания и взрыва [3, 4]. Статическое электричество возникает вследствие накопления положительных или отрицательных зарядов на поверхности полимерных покрытий и лакокрасочных материалов, например, избытка электронов за счет поверхностного трения при контакте с пылью [5, 6]. Приборы, оборудование, упаковка на производстве изготовлены из полимерных материалов, обладающих высоким удельным поверхностным сопротивлением, составляющим порядка 10^{11}–10^{14} Ом/см^2 [7]. Для устранения статического электричества на производстве и в быту необходима разработка антистатических покрытий измерительных приборов и оборудования, панелей внутренних и наружных стен зданий, обладающих в отличие от полимеров высокой электропроводностью и позволяющих безопасно отводить избыточный заряд в землю [8]. Для удаления заряда покрытие должно обладать удельным электрическим сопротивлением в диапазоне 10^3–10^{10} Ом/см^2 [9]. При более низком сопротивлении возрастает риск поражения тела человека электрическим током [10].

В качестве добавок к полимерным покрытиям для придания им антистатических свойств используют токопроводящие ионные жидкости [11], наночастицы металлов [12] и оксидов металлов [13], углерод-

© Юдаев П.А., Тамбура Б., Чистяков Е.М., 2023

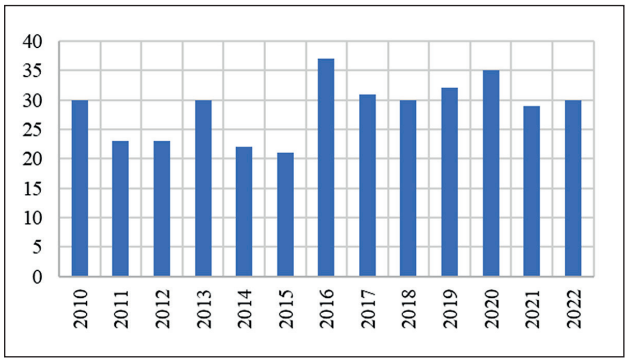

Рис. 1. **Число статей согласно базе данных Scopus (поисковый запрос antistatic coatings)**

ные нанотрубки [14], нанолисты оксида графена [15], проводящие полимеры [16], например, полианилин, политиофен, полипиррол, а также поверхностно-активные вещества [17].

Наноматериалы находят широкое применение в строительной отрасли. Наночастицы добавляют в лакокрасочные материалы для придания им антистатических свойств и устойчивости к царапинам, для защиты от пыли и тумана. Клеи для изготовления антистатических полов на основе наноматериалов обладают сильной электропроводностью [18]. Покрытия, содержащие наноматериалы, снижают адгезию пыли на фотоэлектрических панелях, которые размещают на крышах экозданий [19].

Разработка антистатических добавок для полимерных покрытий является перспективным направлением исследований, о чем свидетельствует большое количество статей за период 2010–2022 гг., согласно базе данных Scopus (рис. 1). Из приведенных данных видно, что наибольший интерес к данной теме наблюдался в 2016-ом году, а наименьший – в 2015-ом году. В 2022-ом году количество публикаций сократилось по сравнению с 2016-ым годом, но интерес к антистатическим покрытиям по-прежнему остается высоким (30 статей в год).

АНТИСТАТИЧЕСКИЕ ДОБАВКИ НА ОСНОВЕ УГЛЕРОДА

К проводящим наполнителям на основе углерода относятся сажа (технический углерод) [20, 21], углеродные волокна [1, 22], углеродные нанотрубки [13, 23–26], графит [27], графен [28, 29], оксид графена (GO) [30, 31].

Углеродные нанотрубки

Наибольшее распространение получили углеродные нанотрубки, а именно многостенные углеродные нанотрубки (MWCNTs), благодаря их малому весу, большому соотношению длины к диаметру, хорошим механическим свойствам, химической стабильности, электропроводности, сравнимой с металлами [32].

Основным недостатком использования углеродных нанотрубок в полимерных антистатических покрытиях является их низкая дисперсность в полимерных матрицах, особенно в высококристаллических полимерах, из-за их запутанности и агрегации в пучки [33, 34]. Это вызвано, главным образом, высокоэнергетическими Ван-дер-Ваальсовыми взаимодействиями и электростатическими силами в MWCNTs. Для улучшения диспергирования MWCNTs в полимере нанотрубки обрабатывают стабилизирующими веществами с помощью ковалентной и нековалентной (или ультразвуковой) модификации [35, 36].

Наиболее перспективна нековалентная модификация без образования химических связей между MWCNTs и стабилизатором, поскольку при ковалентной модификации возможен разрыв на более короткие участки [37]. Например, Yan W. с соавт. использовали в качестве стабилизатора экологически чистую и дешевую дубильную кислоту. Стабилизация, по мнению авторов, объясняется образованием нековалентных π–π связей между ароматическими фенольными кольцами дубильной кислоты и графеновыми структурами нанотрубок [38].

Авторы работы [39] использовали MWCNTs (Сеул, Корея, диаметр 10–20 нм, длина 20–100 мкм), стабилизированные экологически безопасным политаннинуретаном, для изготовления антистатического покрытия на основе поливинилхлорида (ПВХ).

При добавлении MWCNTs к полимеру поверхностное сопротивление уменьшалось с 10^{16} до 10^{8} Ом/см^2. Причем содержание антистатической добавки было невелико и составило 0,5 мас. %. Политаннинуретан продемонстрировал превосходную диспергирующую способность для MWCNTs. На основе строения политаннинуретана авторы делают вывод, что ароматические кольца политаннинуретана закрепляются на поверхности MWCNTs за счет π–π взаимодействий, что способствует дезагрегации [40].

Авторы работы [39] привели сравнительную характеристику изготовленного ПВХ покрытия с покрытиями на основе полиуретана, содержащего MWCNTs, и установили, что покрытие показало близкие характеристики удельного поверхностного сопротивления [39, 41].

В работе [42] для усиления дисперсии MWCNTs в матрице полиоксиметилена и улучшения электрических свойств (электропроводности, поверхностного сопротивления) полимерного нанокомпозита были использованы циануровая кислота и иономер на основе сополимера этилена, метакриловой кислоты и натриевой соли метакриловой кислоты. В ре-

зультате поверхностное сопротивление композитов было снижено на порядок по сравнению с чистым полиоксиметиленом (рис. 2). Установлено, что максимальное снижение поверхностного сопротивления достигается при концентрации иономера 3 мас. % (рис. 2 а) и 0,5 мас. % циануровой кислоты (рис. 2 б). Авторы объясняют стабилизацию MWCNTs нековалентным π-π взаимодействием с наружной поверхностью нанотрубки (обертыванием нанотрубки) для циануровой кислоты и катион-π взаимодействием для иономера.

Однако недостатком полимерных материалов, полученных в работах [39, 42], является слабая адгезия, что приводит к короткому сроку их службы и загрязнению окружающей среды, а также низкие значения прочности на растяжение и ударной вязкости.

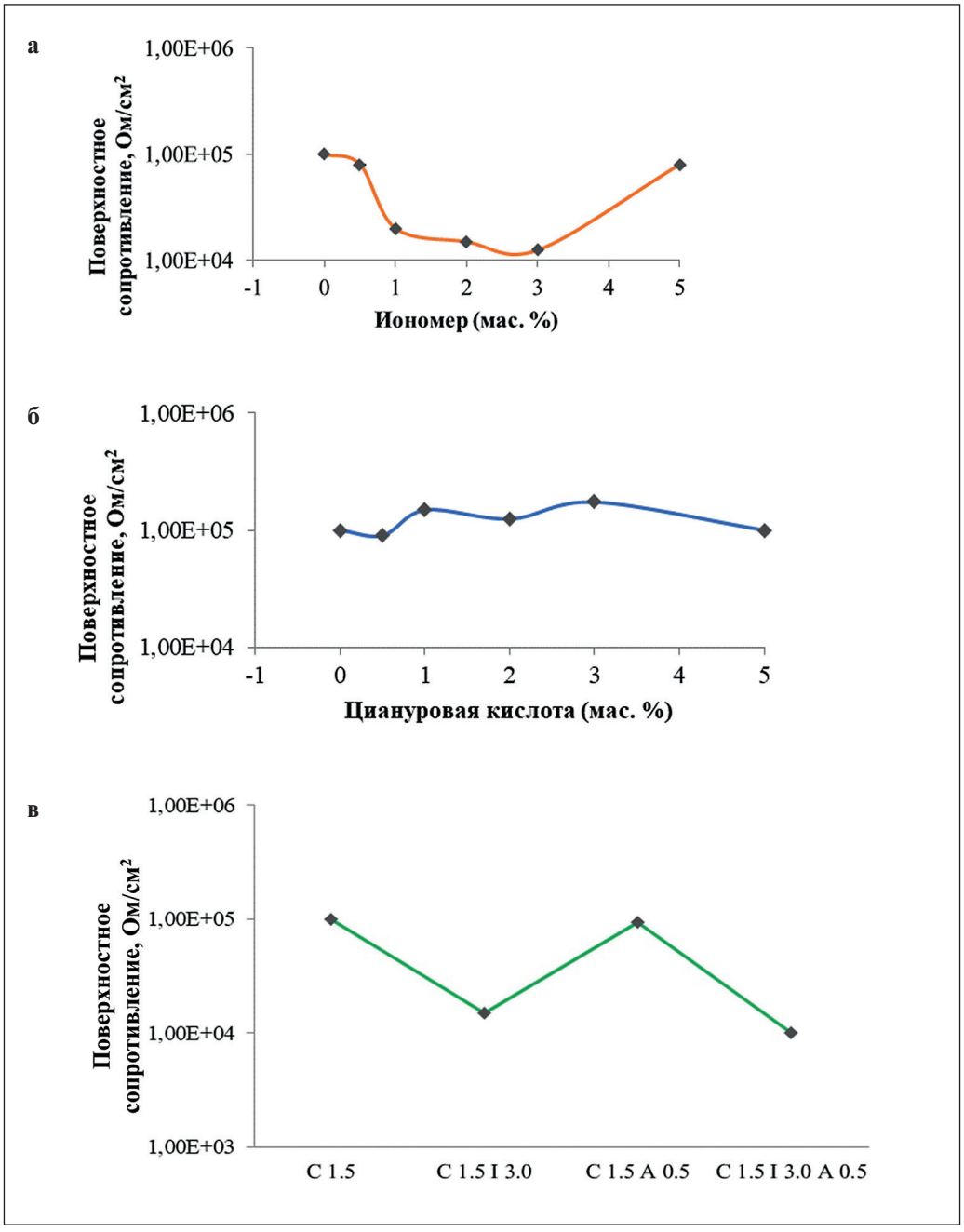

Рис. 2. **Поверхностное сопротивление композитов, содержащих MWCNTs, поверхность которых покрыта иономером (а), циануровой кислотой (б), иономером и циануровой кислотой (в) в зависимости от концентрации добавки.** C – нанотрубки, I – иономер, A – циануровая кислота

Восстановленный оксид графена как антистатическая добавка

Нанолисты восстановленного оксида графена (rGO) наряду с углеродными нанотрубками обладают высокой механической прочностью, большой удельной площадью поверхности, высокой электропроводностью, что делает перспективным их использование в полимерных композитах как антистатических агентов [43–46]. Однако недостатком нанолистов оксида графена, в отличие от наночастиц металлов и оксидов металлов, является их плохая диспергируемость в полимерной матрице, что затрудняет создание путей, проводящих электроны [47, 48], а также низкая стабильность. Для улучшения диспергируемости оксид графена покрывают *in situ* химическими модификаторами, в частности поверхностно-активными веществами [49, 50], полимерами [51]. Например, полидофамин с функциональными катехоловыми, амино- и иминогруппами, ковалентно привитый к поверхности GO, обеспечивает хорошую диспергируемость с полиуретаном за счет улучшения межфазной адгезии [52]. Плохая диспергируемость и склонность к агрегации и отслаиванию нанолистов восстановленного оксида графена обусловлена силами Ван-дер-Ваальса на границе раздела нанолистов [53].

Химическая модификация оксида графена диметилформамидом и карбоновыми кислотами позволяет создавать на графеновых листах положительный заряд, имеющий дзета-потенциал порядка 20 мВ [54]. Добавка rGO в полиуретановые покрытия на водной основе позволила снизить поверхностное электрическое сопротивление на пять порядков. Значение поверхностного электрического сопротивления при добавлении 3 мас. % rGO составило $5{,}4 \cdot 10^9$ Ом/см^2, что достаточно для изготовления антистатических покрытий. Данный факт авторы объясняют sp^2-гибридизацией в структуре rGO. Использование наногибридов rGO и проводящих полимеров, в частности, полианилина, позволяет снизить удельное поверхностное сопротивление до 10^6 Ом/см^2 [54]. По мнению авторов работы [54], это связано с синергическим действием rGO и полианилина, обусловленным сопряженной структурой полианилина.

Однако авторы работы [54] не приводят подробного объяснения, за счет чего создаются проводящие пути в матрице полиуретана, что является существенным недостатком работы [54].

Авторы работы [55] ввели в состав полиуретанового покрытия нанолисты rGO и наночастицы меди (содержание добавок 3 мас. %) и наблюдали снижение удельного поверхностного сопротивления полиуретана с 10^{14} до 10^9 Ом/см^2. Авторы предположили, что синергическое антистатическое действие обусловлено образованием проводящих связей наночастицами меди, выступающих в качестве проводника, между нанолистами rGO (рис. 3).

Таким образом, небольшое количество добавок на основе углерода понижает удельное поверхностное сопротивление полимерных материалов на не-

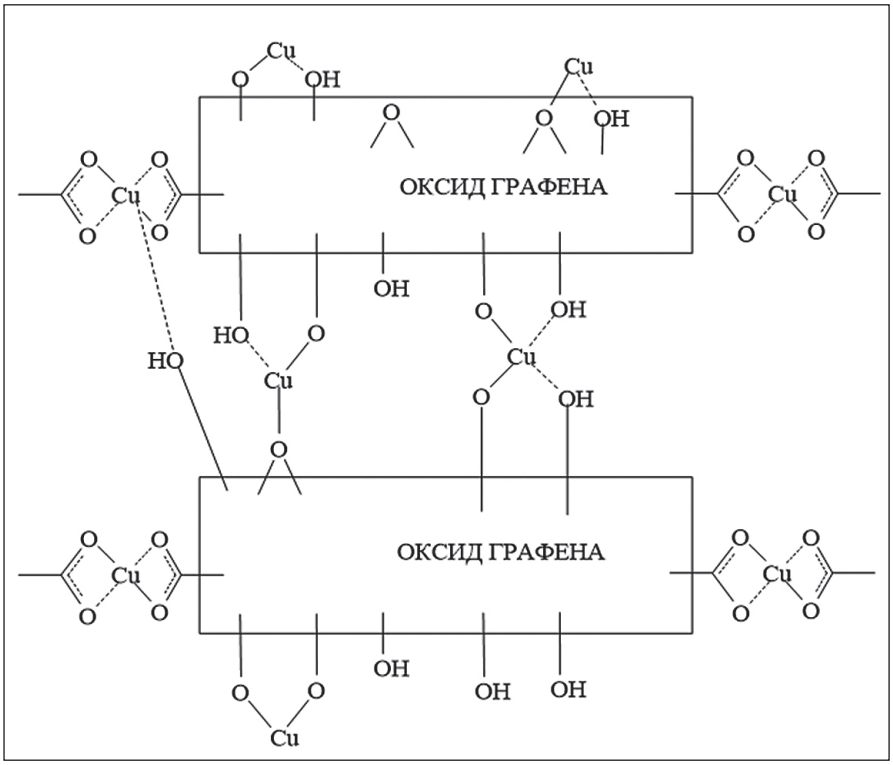

Рис. 3. **Структура, образующаяся в результате реакции rGO и сульфата меди (II)**

сколько порядков. Однако наполнители на основе углерода способны ухудшать механические свойства и повышать водопоглощение полимерных покрытий [54]. Основной проблемой, связанной с использованием углеродных материалов в промышленности, является сложность их диспергирования в полимерах, необходимость придания гидрофильности для обработки полимерных волокон, текстиля [56]. Углеродные наполнители ухудшают прозрачность пленок, что требует использования метода многослойной сборки (метод Layer by Layer). Например, в работе для сохранения прозрачности пленок [57] пленки поли-*L*-лактида последовательно обрабатывали двумя типами полиэлектролитов – положительно заряженного хитозана или полиэтиленимина и отрицательно заряженного GO. Этот метод позволяет наносить несколько бислоев на пленку.

Поверхностно-активные вещества как антистатические добавки

К поверхностно-активным веществам (ПАВ), используемым как антистатические добавки, относятся вещества, содержащие гидрофильные группы и липофильные углеводородные группы. Это позволяет легко совмещать ПАВ с эпоксидными смолами [58], ПВХ [59], текстильными волокнами на основе полиэфиров [60]. Наибольшее распространение в качестве антистатиков получили катионные ПАВ – четвертичные аммонийные соли, поскольку они хорошо растворяются в эпоксидных смолах, легко адсорбируются на отрицательно заряженных полиэфирных волокнах без их повреждения [61]. Например, в работе [58] были получены антистатические покрытия на основе эпоксидной смолы Е-51, полиэфирамина (отвердителя) и четвертичных аммонийных солей поли(ди-н-пропиламин-со-эпихлоргидрина) P(DPA-EPI) и поли(ди-н-бутиламин-со-эпихлоргидрина) P(DBA-EDI). Покрытия наносили на подложку из полипропилена. Покрытия сохраняли прозрачность при добавлении ПАВ. Для проявления антистатических свойств требовался всего 1 мас. % ПАВ (рис. 4). В результате удельное поверхностное сопротивление снизилось на три порядка (от 10^{12} до 10^{8} Ом/см^2). По мнению авторов, это обусловлено адсорбцией влаги воздуха поверхностно-активным веществом и образованием проводящего гигроскопического слоя полярными гидроксильными и четвертичными аммонийными группами ПАВ.

Причем удельное поверхностное сопротивление покрытий с P(DBA-EDI) снижалось больше по сравнению с покрытиями, содержащими P(DPA-EPI). Следовательно, длина углеводородной цепи при атоме азота влияет на антистатические свойства эпоксидных покрытий.

Однако недостатком ПАВ является миграция их на поверхность полимерного материала с течением времени, что приводит к потере антистатических свойств [62]. Кроме того, твердость эпоксидных покрытий, несмотря на хорошую адгезию, уменьшается при добавлении ПАВ [56], поэтому интерес к использованию ПАВ в антистатических полимерных материалах снижается.

Наночастицы как антистатические добавки

Наночастицы металлов и оксидов металлов обеспечивают электропроводящую структуру для полимерных покрытий [63], в отличие от углеродных частиц легко диспергируются в полимерной матрице [64], по сравнению с ПАВ создают длительное антистатическое действие без миграции на поверхность полимерного материала и без вымывания [65, 66], улучшают стойкость полимерных волокон к ультрафиолету [64, 67–69].

В работе [70] было изготовлено антистатическое покрытие на основе полипропилена, модифицированного наночастицами серебра, включенными в пористую структуру микрошариков шлака газификации угля. Благодаря малому размеру частиц, малой плотности и большой удельной поверхности наночастицы серебра легко встраивались в микрошарики, и наполнитель легко диспергировался в матрице полипропилена. Объемное удельное сопротивление при добавлении 10 мас. % микрошариков в полипропиленовую матрицу составило 3,35 • 10^5 Ом·см, что

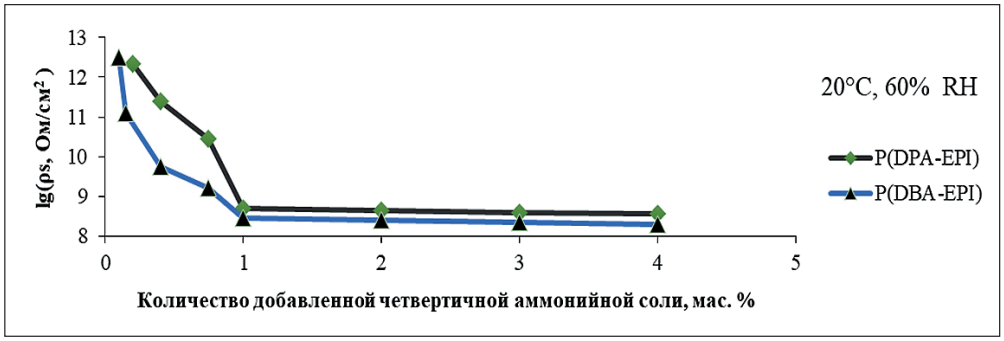

Рис. 4. **Изменение удельного поверхностного сопротивления эпоксидного покрытия с ростом содержания ПАВ.** RH – влажность воздуха

входит в необходимый диапазон антистатических свойств. Однако наполнение ухудшало механические свойства полипропилена. В частности, снизилась механическая прочность полипропилена, что объясняется увеличением концентраций напряжений на границе раздела полимер-наполнитель. Недостатком работы является то, что авторы не объяснили, почему они используют наночастицы серебра на микрошариках, а не индивидуально.

Наночастицы оксидов металлов, например, оксида алюминия (III), оксида цинка (II), оксида железа (III), оксида циркония (IV) являются экологически безопасными, химически стабильными и недорогими антистатическими добавками для полимерных покрытий и волокон [63, 71, 72].

В работе [73] был установлен рост электропроводности полипропилена при введении наночастиц оксида алюминия (размер частиц 20–40 нм) к полипропилену. Модифицированный полипропилен предлагается использовать для антистатического покрытия инструментов и приборов. Сообщается, что с ростом концентрации наночастиц от 1 до 5 мас. % удельное поверхностное сопротивление модифицированных образцов уменьшается. Если концентрация наночастиц в композите невысока (не более 5 мас. %), модификация приводит к увеличению прочности на растяжение. Однако если концентрация наночастиц в объеме полипропилена 30 мас. %, то механические и поверхностные свойства полипропилена будут ухудшаться. После электронного облучения модифицированных полипропиленовых образцов проводимость увеличивается незначительно, в среднем на 5–6%. Данный факт авторы объясняют тем, что в полипропилене при воздействии излучения происходит разрыв полимерных цепей, в результате чего увеличивается количество свободных радикалов и ненасыщенных связей, а также образуются сопряженные двойные связи.

Применение 6 мас. % наночастиц диоксида циркония размером 20–50 нм и сферической формы в полиуретановых покрытиях позволяет рассеивать электростатические заряды и уменьшать удельное поверхностное сопротивление до 10^9 Ом/см^2. Кроме того, преимуществом наночастиц диоксида циркония по сравнению с другими наночастицами является их способность улучшать адгезионную прочность полиуретанового покрытия и образовывать на поверхности покрытия шероховатую структуру, что препятствует накоплению пыли [74].

Однако в литературе [63, 71–74] отсутствуют данные о механизме антистатического действия наночастиц оксидов металлов.

Несмотря на то, что наночастицы металлов и оксидов металлов лучше диспергируются в полимерной матрице, чем углеродные материалы, для проявления антистатических свойств полимерных материалов необходимы большие концентрации наночастиц по сравнению с углеродными материалами, что приводит к ухудшению механических свойств. Кроме того, наночастицы металлов (меди, серебра) склонны к окислению, что требует их дополнительной обработки, в частности легированием [75].

Ионные жидкости как антистатические добавки

Ионные жидкости (ИЖ) представляют собой соли с высокой термической стабильностью и низкой горючестью [76]. Ионные жидкости являются перспективной альтернативой наноразмерным порошкообразным неорганическим наполнителям полимерных материалов благодаря их экологической безопасности и возможности использовать для их изготовления возобновляемое природное сырье [77–83]. ИЖ способны снижать удельное сопротивление полимерных покрытий, находящихся как во влажном, так и в сухом состоянии. Например, авторы работы [84] апробировали ионную жидкость йодид цис-олеилимидазолиния в качестве антистатика в керамических и деревянных напольных покрытиях. ИЖ смешивали с полиуретаном. Значения удельного поверхностного сопротивления покрытия с ИЖ (2–9 мас. %) находилось в диапазоне от 10^6 до 10^9 Ом/см^2, что позволит медленно и безопасно отводить электрический заряд в землю. Антистатические свойства ИЖ, по мнению авторов работы [84], обусловлены электропроводящим действием иодид-ионов и способностью притягивать меньше пыли. Полученное покрытие может быть использовано в строительной индустрии для обработки полов, как элемент декора. Недостатком изготовленного авторами покрытия и работы в целом является желтый цвет полученного покрытия из-за наличия в ИЖ иодид-аниона, что делает невозможным его применение на белых поверхностях.

Для устранения данного эффекта авторы работы [85] использовали в качестве наполнителя полиуретановых пленок ИЖ, не содержащую иода, – полимеризованный бис(трифторметансульфонилимид) [2-метакрилоилокси)этил]триметиламмония (рис. 5).

В результате применения ИЖ удалось на два-три порядка снизить поверхностное и объемное удельное сопротивление полиуретана при низкой концентрации наполнителя, равной всего 1000 ppm (табл. 1). Пленка сохраняла прозрачность при добавлении ИЖ. Авторы объясняют механизм антистатического действия ИЖ диссоциацией ИЖ в матрице полиуретана и миграции анионов $[Tf_2N]^-$ вдоль флуктуаций полиуретановых цепей [84]. ИЖ не вымывалась из пленки в метанольном растворе. Однако недостатком данной ИЖ является ее твердое агрегатное

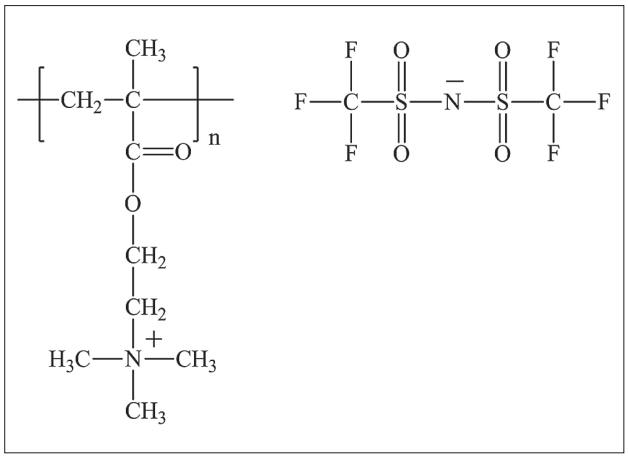

Рис. 5. **Полимеризованный бис(трифторметансульфонилимид) [2-метакрилоилокси)этил]триметиламмония**

состояние, что затрудняет ее диспергирование в полимерной матрице.

Включение ИЖ в состав полиметилметакрилатных, полибутилметакрилатных пленок и покрытий на основе полимочевины позволяло снизить их удельное сопротивление без потери прозрачности [86–88]. ИЖ с более низкой вязкостью, содержащие более короткие алкильные цепи, обладают лучшими антистатическими свойствами [86, 88]. Данный факт объясняется тем, что увеличение алкильной цепи в ИЖ приводит к увеличению сил Ван-дер-Ваальса и уменьшению подвижности ионов [89–91]. Однако ИЖ на основе катионов имидазолия и аммония лучше совмещаются с акрилатной матрицей по сравнению с катионами фосфония, что обусловлено их лучшей растворимостью [86]. Следовательно, на совместимость ИЖ с полимерами большое влияние оказывает гидрофобность катионов.

Таблица 1

Значения удельного поверхностного R_S и объемного R_V электрических сопротивлений полиуретановых пленок, содержащих ИЖ

Содержание ИЖ, ppm	R_S, Ом • см$^{-2}$	R_V, Ом • см
0	$2{,}1 \cdot 10^{12}$	$5{,}1 \cdot 10^{9}$
10	$3 \cdot 10^{11}$	$9 \cdot 10^{9}$
100	$6 \cdot 10^{10}$	$9{,}8 \cdot 10^{8}$
1000	$4{,}7 \cdot 10^{9}$	$5 \cdot 10^{7}$

Анионы ИЖ также оказывают влияние на проводимость. Авторы работы [86] сравнили удельное объемное и поверхностное сопротивление полибутилметакрилатных пленок (Blank), содержащих ионные жидкости на основе катионов имидазолия $[C_4mim]^+$ и анионов $[BF_4]^-$, $[CF_2SO_3]^-$, $[PF_6]^-$, $[FSI]^-$, $[Tf_2N]^-$. Установлено, что наибольшее снижение удельного поверхностного сопротивления наблюдалось для ИЖ с анионом $[BF_4]^-$, а наименьшее – для ИЖ с анионом $[Tf_2N]^-$ (рис. 6). Авторы объясняют снижение сопротивления пластифицирующим эффектом ИЖ и созданием последовательного проводящего пути в полимерной матрице. Однако влияние типа анионов на сопротивление авторы оставили без должного объяснения, что является существенным недостатком работы.

Добавление ИЖ с низкой вязкостью в небольших концентрациях в полимерные материалы позволяет получать антистатические полимерные пленки и покрытия. В частности, для снижения электрического сопротивления полимочевины на пять порядков достаточно ввести 2 мас. % гексафторфосфата

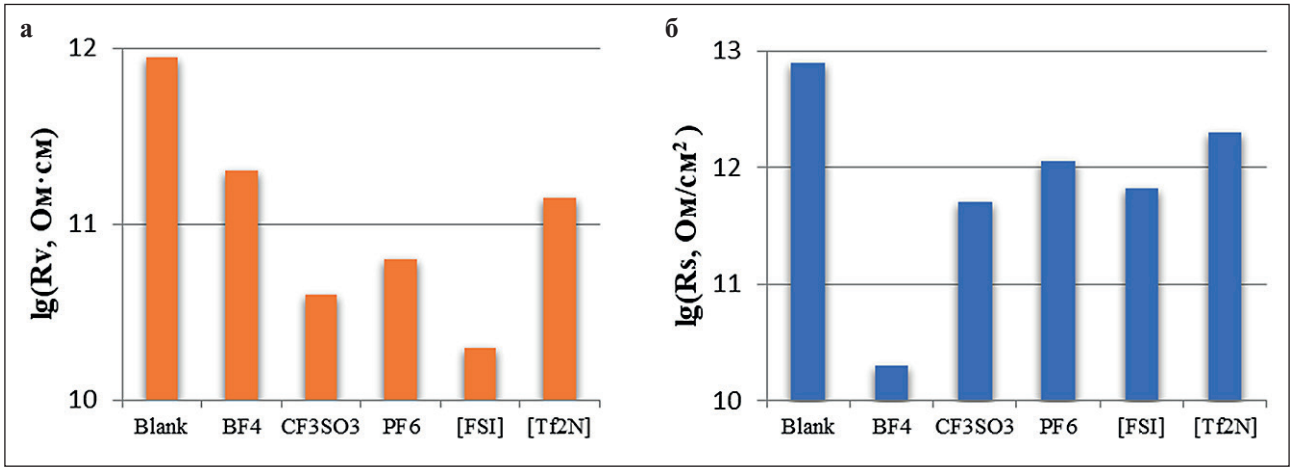

Рис. 6. **R_V (оранжевый) и R_S (синий) пленок полибутилметакрилата, содержащих 10 мас. % ИЖ**

калия [11, 87]. При этом прозрачность покрытий сохраняется в отличие от покрытий с добавлением углеродных наполнителей. Однако ионные жидкости являются более дорогими антистатическими добавками по сравнению с графеном, порошком алюминия и меди. Например, стоимость ИЖ гексафторфосфата калия составляет 46 евро/кг, в то время как цена сажи примерно 1000 $/тонна. Также возможно ухудшение механических свойств покрытий на основе полимочевины при добавлении ИЖ, в частности, прочности на растяжение вследствие миграции ИЖ на поверхность [87].

Проводящие полимеры как антистатические добавки

Проводящие полимеры, главным образом, полианилин, являются недорогой и доступной альтернативой ИЖ. В работе [92] проводящий полианилин был диспергирован в метилпирролидоне и добавлен к латексам полиуретан-акрилат. Полианилин добавляли для улучшения электроизоляции демпфирующих покрытий, применяемых в железнодорожных поездах. По мере увеличения содержания полианилина удельное сопротивление пленок снижалось, а электропроводность возрастала. При содержании полианилина 10 мас. % удельное объемное сопротивление составило $3{,}19 \cdot 10^5$ Ом·см, а наилучшие антистатические характеристики пленок наблюдались при содержании дисперсии полианилина 45 мас. %.

Преимуществом полианилина по сравнению с наночастицами является его контролируемая электропроводность за счет возможности его легирования [93]. В частности, в работе [93] полианилин легировали акриловой эпоксидной смолой с функциональными карбоксильными группами A-g-EP, что, по мнению авторов, обеспечивало проводящие мосты между доменами полианилина. В результате удалось снизить поверхностное сопротивление покрытий на 6 порядков по сравнению с A-g-EP (от $1{,}6 \cdot 10^{11}$ Ом/см^2 до $2{,}4 \cdot 10^5$ Ом/см^2). Gao X. et al. показали [94], что добавка 3 мас. % полианилина, легированного додецилбензолсульфоновой кислотой, к полиуретану повышает электропроводность полиуретановой пленки. Недостатком работ [92, 93] является отсутствие данных о влиянии полианилина на механические свойства полимерных композитов.

Однако недостатком полианилина является трудность его диспергирования в полимерной матрице из-за его агрегации, что ухудшает проводимость, затрудняет создание в покрытии проводящей сети, нерастворимость в большинстве органических растворителей [95], необходимость использования больших концентраций для достижения антистатического эффекта (в работе [96] добавляли 20 мас. % полианилина к натуральному каучуку), а также меньшая электропроводность по сравнению с наночастицами диоксида титана [97].

Высокое содержание полианилина в матрице может привести к плохой механической стабильности конечного продукта. Во избежание ухудшения механических свойств полианилин смешивают с наночастицами [98]. Авторы работы [98] включили наногибрид полианилина, меди и оксида цинка в водную основу полиуретановой дисперсии. Полученное полиуретановое покрытие обладало повышенной адгезионной прочностью к стали и устойчивостью к царапинам по сравнению с покрытием без наночастиц. Авторы объясняют данный факт заряженной гидрофильной поверхностью покрытия. Кроме того, добавление наногибрида обеспечивает лучший антистатический эффект полиуретана по сравнению с индивидуальными добавками. Разработанное наногибридное полиуретановое покрытие востребовано в современном промышленном строительстве для обеспыливания мягкой стали и в операционных помещениях больниц. Однако авторы не приводят объяснения механизма синергического действия наночастиц и полианилина.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Углеродные нанотрубки являются перспективными антистатическими добавками к полимерным покрытиям на основе поливинилхлорида для изготовления декоративных отделочных материалов в строительстве и композитам на основе полиоксиметилена, предназначенным для фиксации приспособлений для электронных устройств (мобильных телефонов, дисплеев). Однако необходимы дальнейшие исследования для улучшения механических и адгезионных свойств наполненных полимерных материалов.

Нанолисты оксида графена могут быть использованы в качестве добавок в полиуретановые покрытия на водной основе только в синергии с наночастицами металлов или проводящими полимерами. Покрытия могут применяться в гражданском строительстве как элемент декора.

Наночастицы металлов и оксидов металлов благодаря их хорошей диспергируемости в полимерной матрице могут быть пригодны в качестве добавок к полипропиленовым и полиуретановым промышленным покрытиям приборов и оборудования.

Ионные жидкости являются перспективными добавками в полиуретановые покрытия и полиакрилатные пленки, которые могут быть использованы в гражданском, промышленном строительстве и электронике.

Поверхностно-активные вещества вымываются из полимерных покрытий, поэтому не вызывают интереса у исследователей.

Полианилин представляет интерес в качестве дешевой добавки к полиуретановым покрытиям на водной основе для применения в медицинских учреждениях (покрытия стен, полов в больницах, стоматологических кабинетах и др.) только в сочетании с наночастицами металлов и оксидов металлов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Yadav R., Tirumali M., Wang, X., Naebe M., Kandasubramanian B. Polymer composite for antistatic application in aerospace. *Defence Technology*. 2020;16(1):107-118. https://doi.org/10.1016/j.dt.2019.04.008

2. Kalender-Smajlović S., Kukec A., Dovjak M. The problem of indoor environmental quality at a general Slovenian hospital and its contribution to sick building syndrome. *Building and Environment*. 2022;214:108908. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.108908

3. Jeong M.Y., Byung-Yoon A.H.N., Sang-Koul L.E.E., Won-Ki, L.E.E., Nam-Ju, J.O. Antistatic coating material consisting of poly (butylacrylate-co-styrene) core-nickel shell particle. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2009;19:119-123. https://doi.org/10.1016/S1003-6326(10)60258-0

4. Chou H.C., Yeh C.T., Shu C.M. Fire accident investigation of an explosion caused by static electricity in a propylene plant. *Process Safety and Environmental Protection*. 2015; 97:116-121. https://doi.org/10.1016/j.psep.2015.02.007

5. Baytekin H.T., Baytekin B., Hermans T.M., Kowalczyk B., Grzybowski B.A. Control of surface charges by radicals as a principle of antistatic polymers protecting electronic circuitry. *Science*. 2013; 341(6152):1368-1371. https://doi.org/10.1126/science.1241326

6. Al-Badra M.Z., Abd-Elhady M.S., Kandil H.A. A novel technique for cleaning PV panels using antistatic coating with a mechanical vibrator. *Energy Reports*. 2020; 6:1633-1637. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.06.020

7. Amsc N., Reli A. Military handbook electrostatic discharge control handbook for protection of electrical and electronic parts, assemblies and equipment (excluding electrically initiated explosive devices) (metric). 1991.

8. Bhardwaj P., Grace A N. Antistatic and microwave shielding performance of polythiophene-graphene grafted 3-dimensional carbon fibre composite. *Diamond and Related Materials*. 2020;106; 107871. https://doi.org/10.1016/j.diamond.2020.107871

9. ESD Association (2020) Part 6: ESD Standards. https://www.esda.org/esd-overview/esd-fundamentals/part-6-esd-standards/. Accessed 13 Dec 2022.

10. ESD Flooring-Definition, Types, Applications, Antistatic Resistance Standard & Best Options. Available online: https://www.accessfloorstore.com/news/228--esd-flooring-definition-types-applications-antistatic-resistance-standard--best-options. (Accessed on 13 May 2021).

11. Kosiński S., Rykowska I., Gonsior M., Krzyżanowski P. Ionic liquids as antistatic additives for polymer composites – A review. *Polymer Testing*. 2022;112(1); 107649. https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2022.107649

12. Memon H., Wang H., Yasin S., Halepoto A. Influence of incorporating silver nanoparticles in protease treatment on fiber friction, antistatic, and antibacterial properties of wool fibers. *Journal of Chemistry*. 2018. https://doi.org/10.1155/2018/4845687

13. Rahman M.M. Polyurethane/zinc oxide (PU/ZnO) composite-synthesis, protective property and application. Polymers. 2020; 12(7); 1535. https://doi.org/10.3390/polym12071535

14. Tian Y., Zhang X., Geng H.Z., Yang H.J., Li C., Da S.X., Lu X., Wang J., Jia S.L. Carbon nanotube/polyurethane films with high transparency, low sheet resistance and strong adhesion for antistatic application. *RSC advances*. 2017; 7(83):53018-53024. https://doi:10.1039/C7RA10092B.

15. Sangermano M., Marchi S., Valentini L., Bon S.B., Fabbri P. Transparent and conductive graphene oxide/poly (ethylene glycol) diacrylate coatings obtained by photopolymerization. *Macromolecular Materials and Engineering*. 2011; 296(5):401-407. https://doi.org/10.1002/mame.201000372

16. Saini P., Choudhary V., Dhawan S.K. Improved microwave absorption and electrostatic charge dissipation efficiencies of conducting polymer grafted fabrics prepared via in situ polymerization. *Polymers for Advanced Technologies*. 2012;23(3):343-349. https://doi.org/10.1002/pat.1873

17. Zheng A., Xu X., Xiao H., Li N., Guan Y., Li S. Antistatic modification of polypropylene by incorporating Tween/modified Tween. *Applied surface science*. 2012; 258(22):8861-8866. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2012.05.105

18. Wei Y., Jiang S., Li C., Li J., Li X., Li J., Fang Z. Organic-inorganic hybrid network to enhance the electrostatic shielding of multifunctional soybean meal-based adhesive. *Industrial Crops and Products*. 2022; 189:115850. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115850

19. Elnozahy A., Abd-Elbary H., Abo-Elyousr F.K. Efficient Energy Harvesting from PV Panel with Reinforced Hydrophilic Nano-materials for Eco-buildings. Energy and Built Environment. 2022. https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2022.12.001

20. Karmankar R.G. Extraction of Carbon Black from The Coconut Shell. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. 2016; 3(1):1286-1291.

21. Choi H.J., Kim M.S., Ahn D., Yeo S.Y., Lee S. Electrical percolation threshold of carbon black in a polymer matrix and its application to antistatic fibre. *Scientific reports*. 2019; 9(1):1-12. https://doi.org/10.1038/s41598-019-42495-1

22. Ezquerra T.A., Connor M.T., Roy S., Kulescza M., Fernandes-Nascimento J., Baltá-Calleja F.J. Alternating-current electrical properties of graphite, carbon-black and carbon-fiber polymeric composites. *Composites science and technology*. 2001; 61(6):903-909. https://doi.org/10.1016/S0266-3538(00)00176-7

23. Zhang M., Zhang C., Du Z., Li H., Zou W. Preparation of antistatic polystyrene superfine powder with polystyrene modified carbon nanotubes as antistatic agent. *Composites Science and Technology*. 2017;138:1-7. https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2016.11.010

24. de Souza Vieira L., dos Anjos E.G.R., Verginio G.E.A., Oyama I.C., Braga N.F., da Silva T.F. Passador F.R. Carbon-based materials as antistatic agents for the production of antistatic packaging: a review. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2021;32(4):3929-3947. https://doi.org/10.1007/s10854-020-05178-6

25. Wang Q., Wang T., Wang J., Guo W., Qian Z., Wei T. Preparation of antistatic high-density polyethylene composites based on synergistic effect of graphene nanoplatelets and multi-walled carbon nanotubes. *Polymers for Advanced Technologies*. 2018; 29(1):407-416. https://doi.org/10.1002/pat.4129

26. Ying F., Cui Y., Xue G., Qian H., Li A., Wang X., Jiang, D. Preparation and properties of an antistatic UV-curable coating modified by multi-walled carbon nanotubes. *Polymer Bulletin*. 2016;73(10):2815-2830. https://doi.org/10.1007/s00289-016-1623-5

27. Imiołek P., Kasprowicz K., Laska J. Antistatic polyethylene free-standing films modified with expan ded graphite—technological aspects. Polimery. 2020;65(4):275-279. https://doi.org/10.14314/polimery.2020.4.3

28. Park G.H., Kim K.T., Ahn Y.T., Lee H.I., Jeong H.M. The effects of graphene on the properties of acrylic pressure-sensitive adhesive. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 2014;20(6):4108-4111. https://doi.org/10.1016/j.jiec.2014.01.008

29. Zhang Y., Li T.T., Shiu B.C., Sun F., Ren H.T., Zhang X.F., Lin J.H. Mass production and effect of polyurethane/graphene coating on the durability and versatile protection of ultralight nylon fabrics. *Polymer International*. 2021;70(3):308-316. https://doi.org/10.1002/pi.6135

30. Fan L., Tan Y., Amesimeku J., Yin Y., Wang C. A novel functional disperse dye doped with graphene oxide for improving antistatic properties of polyester fabric using one-bath dyeing method. *Textile Research Journal*. 2020;90(5-6):655-665. https://doi:10.1177/0040517519877464

31. Meng Z., Lu S., Zhang D., Liu Q., Chen X., Liu W., Ke Y. Grafting macromolecular chains on the surface of graphene oxide through crosslinker for antistatic and thermally stable polyethylene terephthalate nanocomposites. *RSC advances*. 2022;12(51):33329-33339. https://doi:10.1039/D2RA06725K

32. Li C., Liang T., Lu W., Tang C., Hu X., Cao M., Liang J. Improving the antistatic ability of polypropylene fibers by inner antistatic agent filled with carbon nanotubes. *Composites Science and Technology*. 2004; 64(13-14):2089-2096. https://doi:10.1016/j.compscitech.2004.03.010

33. Ma P.-C., Siddiqui N.A., Marom G., Kim J.-K. Dispersion and Functionalization of Carbon Nanotubes for Polymer-Based Nanocomposites: A Review. Compos. Part A. *Appl. Sci. Manuf*. 2010;41:1345-1367. https://doi:10.1016/j.compositesa.2010.07.003

34. Tanabi H., Erdal M. Effect of CNTs Dispersion on Electrical, Mechanical and Strain Sensing Properties of CNT/Epoxy Nanocomposites. Results Phys. 2019;12:486-503. https://doi.org/10.1016/j.rinp.2018.11.081

35. Tasis D., Tagmatarchis N., Bianco A., Prato M. Chemistry of Carbon Nanotubes. *Chem. Rev.* 2006; 106:1105-1136. https://doi:10.1021/cr050569o

36. Zhao X., Ye L. Structure and Mechanical Properties of Polyoxymethylene/Multi-Walled Carbon Nanotube Composites. Compos. Part B Eng. 2011; 42:926-933. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2011.01.002

37. Skákalová V., Kaiser A.B., Dettlaff-Weglikowska U., Hrnčariková K., Roth S. Effect of Chemical Treatment on Electrical Conductivity, Infrared Absorption, and Raman Spectra of Single-Walled Carbon Nanotubes. *J. Phys. Chem. B*. 2005; 109:7174–7181. https://doi: 10.1021/jp044741o

38. Yan W., Shi M., Dong C., Liu L., Gao C. Applications of tannic acid in membrane technologies: A review. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2020; 284:102267. https://doi:10.1016/j.cis.2020.102267

39. Liu L., Yu P., Wu M., Wu Q., Liu J., Yang J., Zhang J. Poly (tannin urethane)-stabilized multiwalled carbon nanotube aqueous dispersion for antistatic coating. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2021; 60(33):12353-12361. https://doi.org/10.1021/acs.iecr.1c02880

40. Wang Z., Liu C., Liu Z., Xiang H., Li Z., Gong Q. π-π Interaction enhancement on the ultrafast third-order optical nonlinearity of carbon nanotubes/polymer composites. *Chem. Phys. Lett*. 2005; 407:35–39. https://doi:10.1016/j.cplett.2005.03.038

41. Pilch-Pitera B., Czachor D., Kowalczyk K., Pavlova E., Wojturski J., Florczak Ł., Byczyński Ł. Conductive polyurethane-based powder clear coatings modified with carbon nanotubes. *Prog. Org. Coat*. 2019; 137:105367. https://doi:10.1016/j.porgcoat.2019.105367

42. Yun S.S., Shin D.H., Jang K.S. Influence of Ionomer and Cyanuric Acid on Antistatic, Mechanical, Thermal, and Rheological Properties of Extruded Carbon Nanotube (CNT)/Polyoxymethylene (POM) Nanocomposites. *Polymers*. 2022;14(9):1849. https://doi.org/10.3390/polym14091849

43. Long H., Harley-Trochimczyk A., Pham T., Tang Z., Shi T., Zettl A., Maboudian R. High surface area MoS_2/graphene hybrid aerogel for ultrasensitive NO_2 detection. *Advanced Functional Materials*. 2016;26(28):5158-5165. https://doi.org/10.1002/adfm.201601562

44. Canal-Rodríguez M., Arenillas A., Rey-Raap N., Ramos-Fernández G., Martín-Gullón I., Menéndez J.A. Graphene-doped carbon xerogel combining high electrical conductivity and surface area for optimized aqueous supercapacitors. *Carbon*. 2017;118:291-298. https://doi.org/10.1016/j.carbon.2017.03.059

45. Wen S., Wang Z., Zheng X., Wang X. Improved mechanical strength of porous chitosan scaffold by graphene coatings. *Materials Letters*. 2017; 186:17-20. https://doi.org/10.1016/j.matlet.2016.09.040

46. Yilmaz Dogan H., Altin Y., Bedeloğlu A.Ç. Fabrication and properties of graphene oxide and reduced graphene oxide reinforced Poly (Vinyl alcohol) nanocomposite films for packaging applications. *Polymers and Polymer Composites*. 2022;30. https://doi.org/10.1177/09673911221113328

47. Vieira L.D.S., dos Anjos E.G.R., Verginio G.E.A., Oyama I.C., Braga N.F., da Silva T.F., Passador F.R. A review concerning the main factors that interfere in the electrical percolation threshold content of polymeric antistatic packaging with carbon fillers as antistatic agent. *Nano Select*. 2022;3(2):248-260. https://doi.org/10.1002/nano.202100073

48. Zhao Y., Yao W., Wang Y., Wang Q., Lou F., Guo W. High-performance antistatic acrylic coating by incorporation with modified graphene. *Journal of Materials Research*. 2019;34(4):510-518. https://doi.org/10.1557/jmr.2018.436

49. Lotya M., King P. J., Khan U., De S., Coleman J. N. High-concentration, surfactant-stabilized graphene dispersions. *ACS nano*. 2010;4(6):3155-3162. https://doi.org/10.1021/nn1005304

50. Mohamed A., Ardyani T., Bakar S. A., Brown P., Hollamby M., Sagisaka M., Eastoe, J. Graphene-philic surfactants for nanocomposites in latex technology. *Advances in colloid and interface science.* 2016; 230:54-69. https://doi.org/10.1016/j.cis.2016.01.003

51. Tang C., Long G., Hu X., Wong K. W., Lau W. M., Fan M., Hui D. Conductive polymer nanocomposites with hierarchical multi-scale structures via self-assembly of carbon-nanotubes on graphene on polymer-microspheres. *Nanoscale*. 2014;6(14):7877-7888. https://doi.org/10.1039/c3nr06056j

52. Zhang S., Zhang D., Li Z., Yang Y., Sun M., Kong Z., Dong W. Polydopamine functional reduced graphene oxide for enhanced mechanical and electrical properties of waterborne polyurethane nanocomposites. Journal of Coatings *Technology and Research*. 2018;15(6):1333-1341. https://doi.org/10.1007/s11998-018-0082-3

53. Luo X., Zhong J., Zhou Q., Du S., Yuan S., Liu Y. Cationic reduced graphene oxide as self-aligned nanofiller in the epoxy nanocomposite coating with excellent anticorrosive performance and its high antibacterial activity. *ACS applied materials & interfaces*. 2018; 10(21):18400-18415. https://doi.org/10.1021/acsami.8b01982

54. Mirmohseni A., Azizi M., Dorraji M.S.S. Cationic graphene oxide nanosheets intercalated with polyaniline nanofibers: A promising candidate for simultaneous anticorrosion, antistatic, and antibacterial applications. *Progress in Organic Coatings*. 2020; 139:105419. https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2019.105419

55. Mirmohseni A., Azizi M., Dorraji M.S.S. Facile synthesis of copper/reduced single layer graphene oxide as a multifunctional nanohybrid for simultaneous enhancement of antibacterial and antistatic properties of waterborne polyurethane coating. *Progress in Organic Coatings*. 2019;131:322-332. https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2019.02.031

56. Abdel-Halim E.S., Abdel-Mohdy F.A., Al-Deyab S.S., El-Newehy M.H. Chitosan and monochlorotriazinyl-β-cyclodextrin finishes improve antistatic properties of cotton/polyester blend and polyester fabrics. Carbohydrate Polymers. 2010;82(1):202-208. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.04.077

57. Li K., Fina A., Marrè D., Carosio F., Monticelli O. Graphite oxide nanocoatings as a sustaibale route to extend the applicability of biopolymer-based film. *Applied Surface Science*. 2020;522:146471. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.146471

58. Gao W., Dang Z.C., Liu F.S., Wang S., Zhang D.W., Yan M. X. Preparation of antistatic epoxy resin coatings based on double comb-like quaternary ammonium salt polymers. *RSC advances*. 2020;10(71):43523-43532. https://doi.org/10.1039/d0ra07479a

59. Bao L., Lei J., Wang J. Preparation and characterization of a novel antistatic poly (vinyl chloride)/quaternary ammonium based ion-conductive acrylate copolymer composites. *Journal of Electrostatics.* 2013; 71(6):987-993. https://doi.org/10.1016/j.elstat.2013.09.001

60. Yang W., Cao Y., Ju H., Wang Y., Jiang Y., Geng T. Amide Gemini surfactants linked by rigid spacer group 1, 4-dibromo-2-butene: Surface properties, aggregate and application properties. *Journal of Molecular Liquids.* 2021;326: 115339. https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.115339

61. Fan Y., Shen J., Xu H. Synthesis and dilute aqueous solution properties of cationic antistatic surfactant functionalized with hydroxyl and ether groups. Tenside Surfactants Detergents. 2022. https://doi.org/10.1007/s00396-014-3233-9

62. Si J., Tang P. Influence of antistatic agent encapsulated into functionalized mesoporous silica on antistatic properties of polystyrene. *International Journal of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials.* 2018;67(12):745-753. https://doi.org/10.1080/00914037.2017.1376201

63. Kuo Y.C., Lee C.H., Rajesh R. Iron oxide-entrapped solid lipid nanoparticles and poly (lactide-co-glycolide) nanoparticles with surfactant stabilization for antistatic application. *Journal of Materials Research and Technology.* 2019; 8(1):887-895. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2018.04.022

64. El-Dessouky H.M., Lawrence C.A. Nanoparticles dispersion in processing functionalized PP/TiO2 nanocomposites: distribution and properties. *Journal of Nanoparticle Research.* 2011;13(3):1115-1124. https://doi.org/10.1007/s11051-010-0100-6

65. Wang Y., Zhang C., Du Z., Li H., Zou W. Synthesis of silver nanoparticles decorated MWCNTs and their application in antistatic polyetherimide matrix nanocomposite. *Synthetic metals*. 2013; 182:49-55. https://doi.org/10.1016/j.synthmet.2013.09.006

66. Li R., Si J., Tang P. Enhancement of electrostatic charge dissipation properties of polymers by a sustained-release effect of mesoporous silica nanoparticles. *Polymers for Advanced Technologies*. 2016;27(5):615-622. https://doi.org/10.1002/pat.3728

67. Kumar A.P., Depan D., Tomer N.S., Singh R.P. Nanoscale particles for polymer degradation and stabilization — trends and future perspectives. *Progress in polymer science*. 2009; 34(6):479-515. https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2009.01.002

68. Chiu C.W., Lin C.A., Hong P.D. Melt-spinning and thermal stability behavior of TiO2 nanoparticle/polypropylene nanocomposite fibers. *Journal of Polymer Research*. 2011;18(3):367-372. https://doi.org/10.1007/s10965-010-9426-0

69. Hassan M.M., Koyama K. Multifunctional acrylic fibers prepared via in-situ formed silver nanoparticles: Physicochemical, UV radiation protection, and antistatic properties. *Dyes and Pigments*. 2018;159:517-526. https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2018.07.013

70. Zhang J., Zuo J., Yuan W., Fu W., Zhang J., Wei C. Synthesis and characterization of silver nanoparticle-decorated coal gasification fine slag porous microbeads and their application in antistatic polypropylene composites. *Powder Technology*. 2022; 410:117891. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.117891

71. Wasim M., Khan M.R., Mushtaq M., Naeem A., Han M., Wei, Q. Surface modification of bacterial cellulose by copper and zinc oxide sputter coating for UV-resistance/antistatic/antibacterial characteristics. *Coatings*. 2020;10(4):364. https://doi.org/10.3390/coatings10040364

72. Thennakoon C.A., Rajapakshe R.B.S.D., Rajapakse R.M.G., Rajapakse S. Anti-stain and durable superhydrophobic/antistatic dual functionality surface for fabric materials based on F-ZnO/TiO_2 composite. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*. 2022;101(3):529-538. https://doi.org/10.1007/s10971-022-05734-y

73. Mikhailov M.M., Goronchko, V.A. Changes in the Electrical Conductivity of Polypropylene Modified with Nanoparticles of Oxide Compounds. *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. 2022; 16(3):343-346. https://doi.org/10.1134/S1027451022030284

74. Yousefi E., Dolati A., Najafkhani H. Preparation of robust antistatic waterborne polyurethane coating. *Progress in Organic Coatings*. 2020;139: 105450. https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2019.105450

75. Shang Q., Hao S., Wang W., Fu D., Ma T. Preparation and characterization of antistatic coatings with modified BaTiO3 powders as conductive fillers. *Journal of adhesion science and technology*. 2013;27(24):2642-2652. https://doi.org/10.1080/01694243.2013.798926

76. Amde M., Liu J.F., Pang L. Environmental application, fate, effects, and concerns of ionic liquids: a review. *Environmental science & technology*. 2015;49(21):12611-12627. https://doi.org/10.1021/acs.est.5b03123

77. Coleman D., Gathergood N. Biodegradation studies of ionic liquids. Chemical Society Reviews. 2010;39(2):600-637. https://doi.org/10.1039/b817717c

78. Welton T. Ionic liquids in green chemistry. *Green Chemistry*. 2011;13(2):225-225. https://doi.org/10.1039/C0GC90047H

79. Sadjadi S. Magnetic (poly) ionic liquids: A promising platform for green chemistry. *Journal of Molecular Liquids*. 2021;323:114994. https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.114994

80. Kapitanov I.V., Jordan A., Karpichev Y., Spulak M., Perez L., Kellett A., Gathergood N. Synthesis, self-assembly, bacterial and fungal toxicity, and preliminary biodegradation studies of a series of L-phenylalanine-derived surface-active ionic liquids. *Green Chemistry*. 2019; 21(7):1777-1794. https://doi.org/10.1039/C9GC00030E

81. Chiappe C., Marra A., Mele A. Synthesis and applications of ionic liquids derived from natural sugars. *Carbohydrates in sustainable development II*. 2010; 295: 177-195. https://doi.org/10.1007/128_2010_47

82. Gomes J.M., Silva S.S., Reis R.L. Biocompatible ionic liquids: fundamental behaviours and applications. *Chemical Society Reviews*. 2019;48(15):4317-4335. https://doi.org/10.1039/C9CS00016J

83. Chen J., Xie F., Li X., Chen L. Ionic liquids for the preparation of biopolymer materials for drug/gene delivery: a review. *Green Chemistry*. 2018;20(18):4169-4200. https://doi.org/10.1039/C9CS00016J

84. Mudzakir A., Jafarian M. B., Widyaningsih M., Nandiyanto A.B.D., Ragadhita R. Fatty Acid Based Ionic Liquids: A New Antistatic Agent For Floor Coating. *Moroccan Journal of Chemistry*. 2022;10:591-605. https://doi.org/10.48317/IMIST.PRSM/morjchem-v10i3.33146

85. Tsurumaki A., Iwata T., Tokuda M., Minami H., Navarra M.A., Ohno H. Polymerized ionic liquids as durable antistatic agents for polyether-based polyurethanes. *Electrochimica Acta*. 2019; 308:115-120. https://doi.org/10.1016/j.electacta.2019.04.031

86. Tsurumaki A., Tajima S., Iwata T., Scrosati B., Ohno H. Evaluation of ionic liquids as novel antistatic agents for polymethacrylates. *Electrochimica Acta*. 2017; 248:556-561. https://doi.org/10.1016/j.electacta.2017.07.181

87. Seki Y. O. L. D. A. Ş., Yıldız N., İnce M., Şengül S., Sever K., Sarıkanat M., Dikici, T. U. N. C. A. Y. The investigation of antistatic effects of 1-ethyl-2, 3-dimethylimidazolium ethyl sulphate for acrylic-based polymer film. *Plastics, Rubber and Composites*. 2016; 45(8):362-367. https://doi.org/10.1080/14658011.2016.1201258

88. Ueno K., Fukai T., Nagatsuka T., Yasuda T., Watanabe M. *Solubility of poly (methyl methacrylate) in ionic liquids in relation to solvent parameters*. Langmuir. 2014; 30(11): 3228-3235. https://doi.org/10.1021/la404797g

89. Kosiński S., Gonsior M., Krzyżanowski P., Rykowska I. New Hybrid Polyurea-Polyurethane Elastomers with Antistatic Properties and an Influence of Various Additives on Their Physicochemical Properties. *Molecules*. 2021;26(19):5778. https://doi:10.3390/molecules26195778

90. Stoppa A., Zech O., Kunz W., Buchner R. The Conductivity of Imidazolium-Based Ionic Liquids from (−35 to 195) °C. A. Variation of Cation's Alkyl Chain. *Journal of Chemical Engineering Data*. 2010; 55(5):1768–1773. https://doi.org/10.1021/je900789j

91. Rahman, M.B.A., Jumbri K., Basri M., Abdulmalek E., Sirat K., Salleh A.B. Synthesis and Physico-Chemical Properties of New Tetraethylammonium-Based Amino Acid Chiral Ionic Liquids. *Molecules*. 2010;15:2388–2397. https://doi.org/10.3390/molecules15042388

92. Liang X., Deng Y., Li S., Wu J., Zhang H., Zhang Z. Waterborne polyurethane-acrylate-polyaniline: Interfacial hydrogen bonding for enhancing the antistatic, damping, and mechanical properties. *Polymers for Advanced Technologies*. 2022; 33(9): 2667-2681. https://doi.org/10.1002/pat.5722

93. Zhu A., Wang H., Sun S., Zhang C. The synthesis and antistatic, anticorrosive properties of polyaniline composite coating. *Progress in Organic Coatings*. 2018;122:270-279. https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2018.06.004

94. Gao X., Chu F. *Fabrication of High Conductivity Polyurethane/Polyaniline Composite Coating Based on In-Situ Polymerization. In Advances in Graphic Communication, Printing and Packaging*. Springer, Singapore. 2019; 958-963. https://doi.org/10.1007/978-981-13-3663-8_129

95. Cao Y., Wang L., Gao Y., Sun T.J., Zhou Y., Hu H.Q., Dong X. Morphology and electric conductivity controlling of in situ polymerized poly (decamethylene dodecanoamide)/polyaniline composites. *Journal of Applied Polymer Science*. 2018;136(6):47041. https://doi.org/10.1002/app.47041

96. Jose B., Sambhudevan S., Shankar B. Mechanical and Conducting Properties of Polyaniline Doped Natural Rubber Nanocomposites. Materials Today: Proceedings. 2019; 18:4901-4905. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.481

97. Mirmohseni A., Rastgar M., Olad A. PANI-chitosan-TiO_2 ternary nanocomposite and its effectiveness on antibacterial and antistatic behavior of epoxy coating. *Journal of Applied Polymer Science*. 2019;136(23):47629. https://doi.org/10.1002/app.47629

98. Mirmohseni A., Azizi M., Seyed Dorraji M.S.A promising ternary nanohybrid of Copper@ Zinc oxide intercalated with polyaniline for simultaneous antistatic and antibacterial applications. *Journal of Coatings Technology and Research*. 2019; 16(38):1411-1422. https://doi.org/10.1007/s11998-019-00223-4

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Юдаев Павел Александрович – ведущий инженер кафедры «Химическая технология пластических масс», Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва, Россия, yudaevpavel5@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-8562-4696

Тамбура Бакари – студент кафедры «Химическая технология пластических масс», Российский химико-технологический университет им Д.И. Менделеева, Москва, Россия, tamboura.bakary@yahoo.fr

Чистяков Евгений Михайлович – кандидат химических наук, доцент кафедры «Химическая технология пластических масс», Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва, Россия, ewgenijj@rambler.ru, https://orcid.org/0000-0001-6072-8982

ВКЛАД АВТОРОВ

Юдаев П.А. – написание исходного текста; итоговые выводы.

Тамбура Б. – создание рисунков.

Чистяков Е.М. – развитие методологии; доработка текста; итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 28.01.2023; одобрена после рецензирования 03.03.2023; принята к публикации 06.03.2023