

Электропроводящие нанокompозиты на основе полиэтилена высокой плотности и различных типов углеродсодержащих наполнителей

Electrically conductive nanocomposites based on high density polyethylene and different types of carbon-containing fillers

Х.В. АЛЛАХВЕРДИЕВА, Н.Т. КАХРАМАНОВ, Э.В. ДАДАШЕВА

Kh.V. ALLAHVERDYEVA, N.T. KAKHRAMANOV, E.V. DADASHEVA

Институт полимерных материалов Министерства науки и образования Азербайджана, Баку
Institute of Polymeric Materials of the Ministry of Science and Education of Azerbaijan, Baku
najaf1946@rambler.ru

В статье приводятся результаты системного анализа электропроводности нанокompозитов на основе полиэтилена высокой плотности и таких углеродных наполнителей, как технический углерод и графит. Используется 13 углеродных наполнителей наноразмерного уровня. В задачу исследования входило из числа используемых нанонаполнителей различного типа выбрать наиболее эффективные. Эффективность наночастиц оценивалась не только по данным электропроводности, но и по изменению основных физико-механических показателей. Исследовали такие свойства, как электропроводность, разрушающее напряжение, относительное удлинение и показатель текучести расплава. Показано, что сравнительно лучшими нанонаполнителями являются технический углерод марки Printex XE 2B и графит марки ГС-2.

Ключевые слова: электропроводность, разрушающее напряжение, относительное удлинение, показатель текучести расплава, истираемость, межсферолитная область, нанокompозиты, технический углерод, графит

The article presents the results of a systematic analysis of the electrical conductivity of nanocomposites based on high density polyethylene and carbon fillers such as carbon black and graphite. 13 nanoscale carbon fillers are used. The aim of the study was to select the most effective nanofillers from among the various types used. The efficiency of nanoparticles was evaluated not only by electrical conductivity data, but also by changes in the main physical and mechanical parameters. Such characteristics as electrical conductivity, breaking stress, elongation and melt flow index were studied. It is shown that the best nanofillers are Printex XE 2B carbon black and GS-2 graphite.

Keywords: electrical conductivity, breaking stress, relative elongation, melt flow rate, abrasion, interspherulite region, nanocomposites, carbon black, graphite

DOI: 10.35164/0554-2901-2023-5-6-53-56

По мере того, как в различных областях техники и технологии продолжается интенсивный рост промышленного производства, значительное внимание стало уделяться использованию новых типов полимерных композитных материалов, обладающих высокими эксплуатационными характеристиками [1–3]. Потребность в конструкционных изделиях на основе полимерных композитов обусловлена сочетанием в них уникальных качественных особенностей, которые обеспечивают не только высокое качество изделий, но и способствуют существенному повышению производительности промышленных агрегатов с использованием метода литья под давлением и экструзии [4–7]. Разработка технологии получения наночастиц в качестве наполнителей пластмасс открыла еще более перспективные возможности серьезного улучшения свойств нанокompозитов [8–11]. В данной статье основное внимание уделяется разработке высококристаллического полиэтилена высокой плотности (ПЭВП) и исследованию электропроводящих полимерных нанокompозитов на его основе с использованием различных типов углеродсодержащих наполнителей: техуглерода и графита. Несмотря на большое число работ в этой области, отсутствие системного подхода к исследованию влияния углеродных наполнителей на закономерность изменения электропроводности и свойств нанокompозитов до сегодняшнего дня не позволяет разработать новые научные подходы для интерпретации механизма цепочечной проводимости [12–14]. Многие авторы объясняют это обстоятельство тем, что исследования в этой области носят в ряде случаев противоречивый характер, не позволяющий в совокупности выработать единую

цельную теорию по оценке электропроводности композитных материалов [15–18].

Поэтому целью данной работы являлось на базе современных тенденций в исследовании электропроводящих нанокompозитов провести систематизацию исследований с использованием ряда наполнителей на основе технического углерода и графита.

Экспериментальная часть

В качестве полимерной матрицы использовали полиэтилен высокой плотности (ПЭВП) марки PETILEN YY I668 (UV) (PETKIM) – разрушающее напряжение 31,3 МПа, прочность на изгиб 34,4 МПа, относительное удлинение 435%, плотность 965 кг/м³, теплостойкость по Вика 139°C, температура плавления 145°C, кристалличность 82%, показатель текучести расплава 5,6 г/10 мин.

Компатибилизатор (ПЭМА) – функционализированный малеиновым ангидридом ПЭВП Exxelcor PE1040 (ExxonMobil Chemical), предназначенный для улучшения совместимости технического углерода со всеми типами полиэтилена.

Использовали следующие марки техуглерода:

Printex XE 2B (Orion Engineered Carbons) – высокоструктурированная аморфная газовая сажа с частицами размером 18–20 нм. Предназначен для улучшения электропроводности полимеров. Эта высокопроводящая сажа идеально подходит для термопластичных полимеров, покрытий, клеев и герметиков, натуральных и синтетических эластомеров. Удельная поверхность равна 800–1000 м²/г, плотность – 0,3–0,35 г/см³. В таблице 1 приводится химический состав Printex XE 2B.

Таблица 1. Химический состав технического углерода марки Printex XE 2B.

V	S	Ni	Fe	Ca	P	Si	Zn	K	Mo	Cu	Co	Cr	C
0,88	0,53	0,45	0,37	0,05	0,05	0,02	0,0068	0,0039	0,0038	0,0035	0,0003	0,002	97,55

N550 – среднедисперсный среднеусиливающий техуглерод (FEF – Fast Extrusion Furnace), размер частиц: 39–55 нм. Обеспечивает высокую экструзионную способность, сравнительно высокое сопротивление раздиру.

П-803 ГОСТ-7885-86 – печной, малоактивный ТУ, получаемый при термоокислительном разложении жидкого углеводородного сырья, с низким показателем дисперсности и средним показателем структурности; с размером наночастиц 90–110 нм. Способствует повышению предела прочности при растяжении и сопротивляемости истиранию резин.

Ацетиленовая сажа – это разновидность ТУ с размером частиц 30–40 нм. Его получают в процессе термического разложения ацетилена. Этот тип ТУ имеет высокую степень очистки, а также является чрезвычайно проводящим материалом. Следовательно, это очень важно при производстве сухих элементов, электрических кабелей, изделий из силикона и т.д.

Печная сажа марки Т-900, ГОСТ-7885-86 – высокодисперсный углеродистый материал, который образуется при неполном сгорании или термическом разложении углеводородов, содержащихся в природных или промышленных газах, а также в жидких продуктах нефтяного или каменноугольного происхождения. Размер частиц 250–300 нм.

К-354 (ГОСТ-25699) – каналный, активный ТУ, получаемый в диффузионном пламени при термоокислительном разложении природного или попутного газа и осаждении на охлаждающих лотках – «каналах». Характеризуется высоким показателем дисперсности и низким показателем структурности. Применение: 1. Усиливающий наполнитель для производства шин, резиновых смесей, особо прочных промышленных резинотехнических и асбестотехнических изделий. Сообщает резиновым смесям устойчивость к преждевременной вулканизации. Придает вулканизатам и изделиям высокие прочностные характеристики при воздействии статических и динамических нагрузок.

2. Компонент, придающий специальные свойства пластмассам и полимерам: электропроводность, замедление старения, способность поглощать УФ-излучение, излучение радаров.

П-234 – печная сажа (ГОСТ-7885-86) – это печной, активный ТУ. Это высокодисперсное углеродистое вещество, вырабатываемое при частичном сгорании или термическом разложении углеводородов, находящихся в промышленных, природных газах, жидких нефтепродуктах, каменном угле. Применяется в шинной и резинотехнической промышленности при производстве шин, резинотехнических изделий высокого качества, формовой техники, а также используется при ремонте протекторов. Готовые изделия обладают высокой жесткостью и стойкостью к истиранию.

П-514 (ГОСТ-7885-86) – печной, среднеактивный ТУ, получаемый при термоокислительном разложении жидкого углеводородного сырья со средним показателем дисперсности и средним показателем структурности. Среднедисперсный усиливающий наполнитель и пигмент. Около 70% всего выпускаемого техуглерода используется в производстве шин, 20% – в производстве резинотехнических изделий. Остальное количество находит применение в качестве чёрного пигмента; замедлителя старения пластмасс; компонента, придающего пластмассам специальные свойства: электропроводные, антистатические, способность поглощать ультрафиолетовое излучение, излучение радаров.

П-324 (печная сажа) (ГОСТ-7885-86) – это высокодисперсный, усиливающий технический углерод. Способствует повышению предела прочности при растяжении и сопротивляемости истиранию резин. Технический углерод (сажа) представляет собой высокодисперсное углеродистое вещество, вырабатываемое при частичном сгорании или термическом разложении углеводородов, находящихся в промышленных, природных газах, жидких нефтепродуктах, каменном угле. Применяется в шинной и резинотехнической промышленности при производстве боковин и брекерных шин, тяжелых шин, резинотехнических изделий, конвейерных лент.

Графит имеет слоистую, плоскую структуру. Отдельные слои графита называются графеном. Каждый слой кристаллической решетки графита может по-разному располагаться по отношению

друг к другу, образуя поли типы. Атомы углерода, расположенные в одной плоскости слоя, связаны между собой ковалентной связью. В этом случае его электропроводность близка к металлической. В перпендикулярном направлении электропроводность в сотни раз меньше.

Использовали следующие марки графита:

ГОСТ4404-78 – естественный минерал, кристаллический, для производства карандашных стержней марки ГК-1 и ГК-2.

ГОСТ-895-73 – кристаллический, марки ГС-2 и ГС-3, для изготовления электропроводящей резины. Размер наночастиц составлял 25–30 нм.

Размер частиц технического углерода и графита определяли на лазерном дифракционном анализаторе модели Mastersizer-3000 (Malvern). В основе метода лежит измерение угловой зависимости интенсивности рассеянного света при прохождении лазерного луча через диспергированный образец. Диапазон определения размера частиц 0,01–3000 мкм.

Электропроводность композитов определяли в соответствии с ГОСТ 20214–74 «Пластмассы электропроводящие». Прессование полимерных образцов для испытания проводили при температуре 160°C в течение 4–6 мин до получения пленки толщиной 150 мкм. Измерение объемного электрического сопротивления (для дальнейшего расчета удельного объемного сопротивления ρ и удельной объемной электропроводности σ) на постоянном токе осуществляли с помощью тераомметра Е6-13А (ОПФ МЕТРО-ТЕКС). Толщину образцов измеряли оптическим измерителем ИЗВ-2. Обработка экспериментальных данных осуществлялась с помощью программы Microsoft Excel 2016.

Разрушающее напряжение при растяжении, предел текучести при растяжении и относительное удлинение полимерных композитов определяли в соответствии с ГОСТ 11262-80. Скорость растяжения образцов на разрывной машине составляет 50 мм/мин.

Показатель текучести расплава (ПТР) полимерных материалов определяли на капиллярном реометре марки MELT FLOW TESTER, CEAST MF50 (INSTRON, Италия) при температуре 190°C и нагрузке 5,0 кг. Относительная ошибка эксперимента составляет в среднем 5%. Использование этого метода анализа позволяло контролировать текучесть расплава нанокомпозитов после введения наполнителя.

Приготовление полимерной смеси. С целью модификации свойств полиолефинов в их состав на горячих вальцах при температуре 170°C вводили вначале до 2,0 мас.% компатибилизатора ПЭМА, а затем в расплавленную полимерную смесь по частям добавляли наполнитель. Фрикция вальцов составляла 1,29. Для оценки разрушающего напряжения прессовали пластинки толщиной 2 мм, вырубали образцы лопаток для проведения испытания.

Результаты и их обсуждение

С целью подбора наиболее эффективных электропроводящих наполнителей в данном разделе нами была предпринята попытка на примере ПЭВП и ряда образцов ТУ и графита оценить их влияние на электропроводность и некоторые физико-механические свойства полимерных композитов. Этот полимер является одним из наиболее используемых в мире высококристаллических полимеров класса полиолефинов. Поэтому в данном разделе ПЭВП будет использован в качестве полимерной матрицы для апробации и выбора наиболее эффективных наполнителей, способствующих улучшению электропроводности нанокомпозитов. Следует при этом иметь в виду, что ПЭВП, ТУ и графит характеризуются недостаточной хорошей совместимостью, в связи с чем возникала необходимость в использовании маленисодержащих полимерных компатибилизаторов типа ПЭМАК. В связи с этим в качестве объекта исследования были отобраны 9 образцов ТУ: Printex ХЕ 2В, ацетиленовая сажа, N-550, П-514, П-324, П-803, К-354, П-234 и Т-900. Результаты исследования приведены на рис.1. Анализируя на этом рисунке кривые зависимости электропроводности от содержания различных типов ТУ в составе ПЭВП, можно установить, что закономерность изменения электропроводности рассматриваемых нанокомпозитов заметно отличаются. Основное отличие выражается в том, что тип ТУ влияет на концентрационный фактор и максимальную электропроводность ком-

позитов. Из представленных компонентов наибольшую эффективность проявляют образцы ТУ марки Printex ХЕ 2В (кривая 1) и ацетиленовая сажа (кривая 2). Преимущество этих образцов проявляется в том, что максимальная электропроводность достигается при относительно низких концентрациях ТУ. Так, например, если для первого образца максимальное значение электропроводности достигается при 5–7% масс.ТУ., то для второго – при 12–14% масс.ТУ, третьего – 15–17% масс. ТУ, четвертого – 23% масс. ТУ, пятого – 21% масс. ТУ, шестого при 22% масс. ТУ, седьмого – при 32% масс. ТУ, восьмого – при 31% масс., девятого – при 33% масс. Полученные данные имеют принципиально важное значение, так как позволяют утверждать, что различие во влиянии ТУ на электропроводность обусловлено многими причинами. Главные из них – это дисперсность и степень развитости поверхности наночастиц ТУ или удельная поверхность [19]. В ходе проведенных исследований становится очевидным, что все эти факторы положительно влияют на формирование электропроводящих цепочек из наночастиц. Есть основание полагать, что в процессе охлаждения расплава нанокompозита процесс кристаллизации макроцепей ПЭВП и рост кристаллических образований сопровождается вытеснением наночастиц в межсферолитную аморфную область. В этом случае концентрация наночастиц в межсферолитной области возрастает настолько, что становится намного выше ее среднего содержания по всему объему полимерной матрицы [17]. Концентрирование наночастиц в узком межсферолитном пространстве становится одной из главных причин формирования цепочечной туннельной или электронной проводимости нанокompозитов [3, 20]. Если последовательно оценить эффективность каждого из ТУ, то можно установить, что используемые наночастицы ТУ в первую очередь различаются по своим размерам. Так, например, по приведенной нумерации размеры наночастиц ТУ изменяются в следующей последовательности: 1 – 18–20 нм, 2 – 30–40 нм, 3 – 40–60 нм, 4 – 120–140 нм, 5 – 130–150 нм, 6 – 130–150 нм, 7 – 160–180 нм, 8 – 160–170 нм, 9 – 250–300 нм. Из сопоставительного анализа полученных данных и кривых на рис. 1 можно заметить существование определенной закономерности в их изменении. Самое низкое значение электропроводности приходится на образец №9, где в качестве наполнителя использовали ТУ марки Т-900. Размер частиц этого образца ТУ примерно в 10 раз превосходит размер частиц первого образца. Именно благодаря этому электропроводность композита (образец №9) существенно улучшается только при высоком содержании ТУ, равном 32–33% масс. Как видно из этих кривых, по мере увеличения размера частиц максимальная электропроводность достигается при сравнительно высоком содержании ТУ. Однако попытка сохранения электропроводности на высоком уровне при таком большом содержании ТУ приведет к существенному ухудшению комплекса физико-механических характеристик нанокompозитов на основе ПЭВП. Подтверждением сказанному являются результаты исследования, приведенные в таблице 2. В этой таблице представлены результаты исследования электропроводности и основных физико-механических свойств вышеотмеченных саженанополненных композитов на основе ПЭВП. Из сопоставительного анализа данных этой таблицы можно установить, что наилучшими физико-механическими свойствами обладают образцы 1 и 2, так как максимальный эффект по электропроводности достигается при сравнительно низких концентрациях ТУ. Ухудшение свойств в образцах 3–9 связано с тем, что для достижения максимально допустимого значения электропроводности необходимо использовать сравнительно большее количество ТУ. Чем больше содержание ТУ в составе композита, тем хуже становятся разрушающее напряжение, относительное удлинение и ПТР [17, 21]. В тех образцах, в которых содержание ТУ в составе ПЭВП свыше 15% масс., композиты становятся хрупкими, относительное удлинение и ПТР приравниваются к нулю. Таким образом, образцы 3–9 со сравнительно высокими значениями электропроводности становятся практически непригодными для переработки методами литья под давлением и экструзии. Поэтому весьма проблематичным становится получение на их основе электропроводящих материалов. Это обстоятельство имеет большое значение, по-

скольку позволяет утверждать, что при выборе оптимального состава электропроводящего композита необходимо добиваться того, чтобы максимальный эффект был достигнут при минимально допустимом содержании ТУ. В данном случае такой эффект достигается у первого образца ПЭВП при 7,0% масс. содержания Printex ХЕ2В. Исходя из вышеизложенного, в данной работе основным электропроводящим компонентом для ПЭВП нами был выбран ТУ марки Printex ХЕ2В. Такая высокая эффективность действия Printex ХЕ2В на электропроводность объясняется высокой удельной поверхностью – 800–1000 м²/г, размером наночастиц 18–20 нм и плотностью 300–350 кг/м³. Кроме того, установлено, что этот ТУ характеризуется сравнительно высоким содержанием кислорода 8,0–10%, который находится в его составе в виде функциональных групп. Таким образом, высокая удельная поверхность и содержание кислородных групп может быть основной причиной столь высокой электропроводящей способности нанокompозитов.

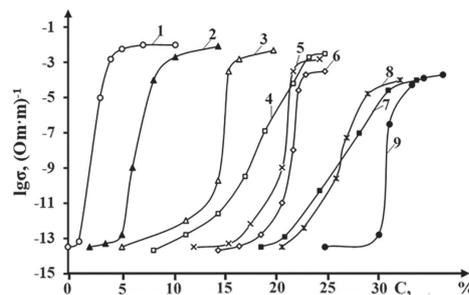


Рис. 1. Влияние содержания различных марок ТУ на электропроводность композитов на основе ПЭВП: 1 – Printex ХЕ 2В; 2 – ацетиленовая сажа; 3 – N-550; 4 – П-514; 5 – П-324; 6 – П-803; 7 – К-354; 8 – П-234; 9 – Т-900.

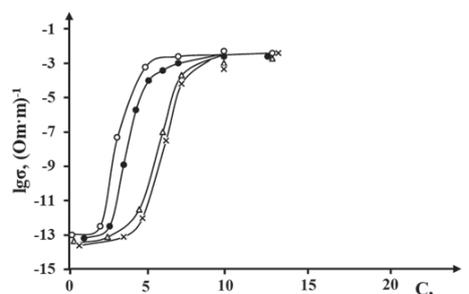


Рис. 2. Влияние содержания различных марок графита на электропроводность нанокompозитов на основе ПЭВП: ○ – ГС-2; ● – ГС-3; % × – ГК-2; Δ – ГК-1.

Аналогичным образом провели исследования с графитонаполненными нанокompозитами ПЭВП. В качестве объекта исследования использовали графиты различных марок: кристаллические ГС-2 и ГС-3, а также карандашный ГК-1 и ГК-2. Размер наночастиц ГС-2 и ГС-3 составлял 25–45 нм, а ГК-1 и ГК-2 – в пределах 30–55 нм. На рис. 2 приводятся электропроводящие свойства нанокompозитов ПЭВП с вышеперечисленными марками графита. Как видно из этого рисунка, сравнительно высокие значения по электропроводности достигаются при использовании графита марки ГС-2 и ГС-3. У этих образцов максимальное значение электропроводности достигается при 5,0–7,0% масс. содержания графита ГС-2 и ГС-3. При этом наилучшие значения по электропроводности достигаются у образцов ПЭВП, содержащих графит марки ГС-2. Графит проводит электричество, потому что он состоит из слабо связанных π-электронов со слабым ван-дер-ваальсовым взаимодействием на каждом слое. Таким образом, эти π-электроны легко освобождаются для движения и несут большое количество зарядов вдоль структуры решетки для проведения электричества.

Наряду с этим были исследованы физико-механические свойства нанокompозитов с 7,0% масс. содержанием различных марок графита в составе ПЭВП. Результаты исследования сведены в таблицу 3. Из этой таблицы можно установить, что в графитонаполненных нанокompозитах физико-механические свойства практически не различаются. Основная разница проявляется только в значениях по электропроводности.

Анализируя данные, приведенные в этой таблице, можно заметить, что самую высокую электропроводность имеют нанокompозиты, содержащие графит марки ГС-2. В отличие от нанокompозитов ПЭВП+ТУ, введение графита всех марок приводит к увеличению ПТР нанокompозитов. Из таблицы 3 видно, что введение графита способствует также некоторому улучшению антифрикционных характеристик нанокompозитов. Такое заметное возрастание текучести расплава и снижение истираемости обусловлено

Таблица 2. Физико-механические свойства различных саженополненных композитных материалов при максимальном значении электропроводности.

№№	Содержание различных марок ТУ в составе ПЭВП, % масс.	Разрушающее напряжение, МПа	Относительное удлинение, %	Электропроводность, (Ом·м) ⁻¹	ПТР, г/10мин.
1	93 ПЭВП* + 7,0 PrintexХЕ2В	33,0	50	7,5·10 ⁻²	2,2
2	88 ПЭВП* + 12 ацетилен.сажа	31,8	30	4,6·10 ⁻²	1,3
3	85 ПЭВП* + 15 N550	25,4	20	0,2·10 ⁻²	0,2
4	77 ПЭВП* + 23 П-514	22,6	–	5,6·10 ⁻³	–
5	79 ПЭВП* + 21 П-324	19,7	–	4,7·10 ⁻³	–
6	78 ПЭВП* + 22 П-803	20,1	–	4,6·10 ⁻³	–
7	68 ПЭВП* + 32 К-354	17,8	–	1,8·10 ⁻³	–
8	69 ПЭВП + 31 П-234	17,3	–	8,5·10 ⁻⁴	–
9	68 ПЭВП + 32 Т-900	17,9	–	4,7·10 ⁻³	–

Таблица 3. Физико-механические свойства нанокомпозитов ПЭВП с различными марками графита.

№№	Состав ПЭВП с различными марками графита в, %масс.	Разрушающее напряжение, МПа	Относительное удлинение, %	Электропроводность, (Ом·м) ⁻¹	ПТР, г/10минут	Истираемость в первом цикле, мг
1	ПЭВП*	31,3	435	1,6·10 ⁻¹³	5,6	139
2	93ПЭВП* + 7,0 ГС-2	31,5	40	4,5·10 ⁻²	6,2	92
3	93ПЭВП* + 7,0 ГС-3	30,8	35	8,6·10 ⁻³	6,1	91
4	93ПЭВП* + 7,0 ГК-1	31,0	40	5,2·10 ⁻⁴	6,0	88
5	93ПЭВП* + 7,0 ГК-2	31,2	40	5,3·10 ⁻⁵	5,9	90

тем, что графит имеет слоистую структуру, выполняя своеобразную роль смазки в нанокомпозитах. Другими словами, графит выполняет в нанокомпозитах три основные функции: обеспечивает электропроводность, антифрикционные характеристики, и сохраняет текучесть расплава на вполне достаточном уровне для переработки в изделие. Поэтому для систематизации исследований в направлении получения и изучения электропроводящих нанокомпозитов нами в качестве наполнителя был выбран графит марки ГС-2.

Таким образом, на основании вышеизложенного можно констатировать, что в результате использования большого числа углеродсодержащих наполнителей представлялась возможность разработать высокоэффективные электропроводящие нанокомпозиты на основе ПЭВП, Printex ХЕ 2В и графита марки ГС-2. Показана принципиальная возможность улучшения качественных характеристик нанокомпозитов при минимально допустимом содержании вышеуказанных наполнителей.

Литература

- Берлин А.А., Вольфсон С.А., Ошман В.Г. Принципы создания композиционных материалов. М.: Химия, 1990, 240 с.
- Д. Нвабумбы, Т. Кю. Композиты на основе полиолефинов. СПб: ИЛ «Научные основы и технологии» 2014, 744 с.
- Kakhrmanov N.T., Allahverdiyeva Kh.V., Mustafayeva F.A. Structure and Properties of Conducting Composites Based on Polyolefins and Carbon Black. // Russian Journal of Applied Chemistry, 2022, Vol. 95, No.8, pp. 1146–1152.
- Kakhrmanov N.T., Allahverdiyeva Kh.V., Martynova G.S., Mustafayeva F.A., Gahramanli Y.N. New Approaches for the Interpretation of the Structure and Phase Transitions in Nanocomposites Based on Modified Polyolefins and Technical Carbon. // J.Chem.Soc.Pak., vol. 45, No.2, 2023, p. 119–127.
- Алоев В.З., Жирикова З.М., Тарчокова М.А. Эффективность использования наноуполнителей разных типов в полимерных композитах. //Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2020, т. 63, вып.4, с.81–85.
- Liang J. X., Yang Q. Mechanical properties of carbon black-filled high-density polyethylene antistatic composites // J. Reinf. Plast. Compos. 2008. V. 28. N3. P. 295–304. <https://doi.org/10.1177/0731684407081376>.
- Allahverdiyeva Kh.V., Martynova G.S., Mustafayeva F.A., Gahramanli Y.N. Structural features and mechanism of crystallization of nanocomposites based on maleinated high density polyethylene and carbon black. // Heliyon, 2023(9), e14829.
- Kim J., Lee J., You J., Park M.-S., Hossain M. S. A., Yamauchi Y., Kim J. H. Conductive polymers for next-generation energy storage systems: recent progress and new functions // Mater. Horiz. 2016. V. 3. N6. P. 517–535. <https://doi.org/10.1039/C6MH00165C>.
- Shi Y., Peng L., Ding Y., Zhao Y., Yu G. Nanostructured conductive polymers for advanced energy storage // Chem. Soc. Rev. 2015. V. 44. P. 6684–6696. <https://doi.org/10.1039/C5CS00362H>.
- Wang X., Zhao J., Chen M., Ma L., Zhao X., Dang Z.-M., Wang Z. Improved self-healing of polyethylene/carbon black nanocomposites by their shape memory effect // J. Phys. Chem. B. 2013. V. 117. P. 1467–1474. <https://doi.org/10.1021/jp3098796>.
- Cheng X., Bao C., Wang X., Zhang F., Dong W. Soft surface electrode based on PDMS-CB conductive polymer for electrocardiogram recordings // Appl. Phys. A. 2019. V. 125. ID 876. <https://doi.org/10.1007/s00339-019-3124-5>.
- Gómez I. J., Sulleiro M. V., Mantione D., Alegret N. Carbon nanomaterials embedded in conductive polymers: A state of the art // Polymers. 2021. V. 13. N 5. ID 745. <https://doi.org/10.3390/polym13050745>.
- Paszkievicz S., Szymczyk A., Zubkiewicz A., Subocz J., Stanik R., Szczepaniak J. Enhanced functional properties of low-density polyethylene nanocomposites containing hybrid fillers of multi-walled carbon nanotubes and nano carbon black // Polymers. 2020. V. 12. N 6. ID 1356. <https://doi.org/10.3390/polym12061356>.
- Zaccone M., Frache A., Torre L., Armentano I., Monti M.. Effect of filler morphology on the electrical and thermal conductivity of PP/carbon-based nanocomposites // J. Compos. Sci. 2021. V. 5. N 8. ID 196; <https://doi.org/10.3390/jcs5080196>.
- Zhang Q., Wang J., Zhang B.-Y., Guo B.-H., Yu J., Guo Z.-X. Improved electrical conductivity of polymer/carbon black composites by simultaneous dispersion and interaction-induced network assembly // Compos. Sci. Technol. 2019. V. 179. P. 106–114. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2019.05.008>.
- Yang J., Liang J. A modified model of electrical conduction for carbon black-polymer composites // Polym. Int. 2010. V. 60. P. 738–742. <https://doi.org/10.1002/pi.3002>.
- Аллахвердиева Х.В. Физико-механические свойства нанокомпозитов на основе технического углерода и полиолефинов // Материаловедение. 2022. №6. С. 42–48. <https://doi.org/10.31044/1684-579X-2022-0-6-42-48>.
- Gao J. Fabrication of conductive polymer composites and their applications in sensors // Polymer Nanocomposite Materials. 2021. P. 21–52. <https://doi.org/10.1002/9783527826490.ch2>.
- Калистратова Л.Ф., Егорова В.А. Упорядочение аморфной фазы как одна из характеристик надмолекулярной структуры аморфно-кристаллического полимера // Материаловедение. 2019. №1. С. 3–5. [Kalistratova L. F., Egorova V. A. Ordering of the amorphous phase as one of the characteristics of supramolecular structure of amorphous-crystalline polymer // Inorg. Mater. Appl. Res. 2019. V. 10. P. 933–938. <https://doi.org/10.1134/S2075113319040208>].
- Njuguna J., Pielichowski K., Desai S. Nanofiller-reinforced polymer nanocomposites // Polym. Adv. Technol. 2008. V. 19. N 8. P. 947–959. <https://doi.org/10.1002/pat.1074>.
- Kryszewski M. On the influence of interfacial effects on the properties of filled polymers and blends // Acta Polym. 2003. V. 39. N1–2. P. 37–41. <https://doi.org/10.1002/actp.1988.010390108>.