EDN: OHTBBJ
УДК 621.315.61 *2.2.6*

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАНОДИОКСИДА КРЕМНИЯ НА МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ, ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ИЗОТАКТИЧЕСКОГО ПОЛИПРОПИЛЕНА

К.А. Аскеров[1], А.А. Сафарзаде[1], Х.С. Ибрагимова[2]

[1]Национальная Авиационная Академия Азербайджанской Республики, Азербайджан, AZ1045, г. Баку, Мардакянский проспект, 30

[2]Институт физики Министерства науки и образования Азербайджанской Республики, Азербайджан, AZ1073, г. Баку, пр. Г. Джавида, 131

Аннотация. В работе показано, что добавление наночастиц SiO_2 в полимерную матрицу изотактического полипропилена позволяет значительно улучшить её термофизические и диэлектрические характеристики. Оптимальной концентрацией наполнителя является 3–5 об.%, при которой достигается максимальное увеличение кристалличности, снижение диэлектрических потерь и ограничение подвижности макромолекул полимера. Результаты работы могут быть использованы для создания композитов с улучшенными электроизоляционными и термостойкими свойствами.

Ключевые слова: изотактический полипропилен, диоксид кремния, наночастицы, диэлектрические потери.

Введение

Изотактический полипропилен (iPP) широко используется благодаря высокой термостойкости, химической инертности, низкой плотности и хорошим механическим свойствам. Однако его ограниченные диэлектрические и термофизические характеристики препятствуют применению в высокотехнологичных сферах, таких как электроника и изоляционные материалы. Одним из эффективных способов модификации свойств iPP является введение нанонаполнителей, в частности диоксида кремния (SiO_2). Благодаря высокой удельной поверхности и химической активности, наночастицы SiO_2 способны влиять на морфологию, термостабильность и диэлектрические характеристики полимерной матрицы. Тем не менее, влияние концентрации и дисперсности SiO_2 на свойства iPP до конца не изучено. Цель данной работы — исследовать, как содержание и распределение наночастиц SiO_2 влияют на диэлектрические, термофизические характеристики и морфологию iPP, что важно для создания новых электроизоляционных материалов.

Материалы и методы

В качестве полимерной матрицы использовался изотактический полипропилен (iPP) с плотностью 0.92 г/см³ и молекулярной массой 300,000–700,000 г/моль. В качестве наполнителя применялись наночастицы диоксида кремния (SiO_2) размером 20–25 нм и плотностью 2.6 г/см³ (Sigma-Aldrich, США). Подготовка нанокомпозитов проводилась методом растворной дисперсии с последующим горячим прессованием при температуре плавления iPP под давлением 15 МПа в течение 4 минут. Образцы охлаждали в ледяной

воде с обеспечением скорости охлаждения около 20 °C/мин. Толщина плёнок составляла 80–90 мкм при диаметре 4 см. Диэлектрические свойства исследовались с использованием прибора Precision LCR Meter 1920 в диапазоне частот от 20 Гц до 1 МГц и температур от 18 °C до 70 °C. Образцы покрывались серебряной фольгой для создания плоского конденсатора. Рассчитывались действительная (ε′) и мнимая (ε″) части диэлектрической проницаемости, тангенс угла потерь (tgδ) и проводимость (σ).Морфология исследовалась с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ, JEOL JSM-7600F) и атомно-силовой микроскопии (АСМ, Integra Prima). Термофизические параметры определялись методом ДСК (204 F1, Netzsch.) Рассчитывались кристалличность (Xc), удельная теплоёмкость (Cp) и энтропия (ΔS**)**.

Результаты и обсуждение

СЭМ-изображения нанокомпозита с 5 об.% SiO_2 показали равномерное распределение сферических частиц в матрице iPP. Расстояние между частицами находилось в пределах 20–80 нм и зависело от концентрации наполнителя. Элементный анализ методом ЭДАХ подтвердил наличие кремния и кислорода, что свидетельствует об успешном включении наночастиц в полимерную матрицу. АСМ-анализ продемонстрировал увеличение доли твёрдых и упорядоченных участков при повышении концентрации SiO_2. Особенно ярко выражен эффект при 3–5% наполнителя: наблюдалось увеличение фазового контраста, указывающее на рост кристалличности и жесткости композита. При этом её частотная зависимость была незначительной, что связано с отсутствием дипольных и межфазных поляризаций из-за неполярной природы iPP и SiO_2. Мнимая часть ε″ демонстрировала снижение на низких частотах, что объясняется релаксационными потерями. tgδ снижался с увеличением частоты, поскольку более медленные механизмы поляризации (ориентационные, межфазные) не успевали следовать за переменным полем. Однако электропроводность σ возрастала при повышении частоты, что связано с активацией переноса заряда через ловушки на границах фаз (эффект Максвелла–Вагнера).

Данные ДСК показали, что при концентрации SiO_2 до 5% происходит рост энтальпии плавления ΔH и кристалличности Xc, что связано с функцией наночастиц как центров кристаллизации. Однако при 7–10% наблюдается снижение ΔH и Xc из-за агрегации частиц и препятствия росту кристаллитов. Параллельно снижалась удельная теплоёмкость Cp, что указывает на ограничение подвижности макромолекул в более жёсткой и упорядоченной структуре. Энтропия ΔS также уменьшалась, отражая рост упорядоченности композита.

Заключение

Добавление наночастиц SiO_2 в полимерную матрицу iPP позволяет значительно улучшить её термофизические и диэлектрические характеристики. Оптимальной концентрацией наполнителя является 3–5 об.%, при которой достигается максимальное увеличение кристалличности, снижение диэлектрических потерь и ограничение подвижности макромолекул. При более высоких концентрациях наблюдается агрегация частиц, приводящая к ухудшению упорядоченности структуры и снижению положительного эффекта. Таким образом, введение небольшого количества нанодиоксида кремния обеспечивает эффективную модификацию структуры iPP и может быть использовано для создания композитов с улучшенными электроизоляционными и термостойкими свойствами.

MICROWAVE PHOTONIC FBG INTERROGATION BY THE FIXED ARRAY OF ADDRESSED COMB AND ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS

K.A. Asgarov[1], A.A. Safarzade[1], H.S.Ibrahimova[2]

[1]National Aviation Academy of the Republic of Azerbaijan
30, Mardakan Avenue, Baku, AZ1045, Azerbaijan

[2] Institute of Physics, Ministry of Science and Education of the Republic of Azerbaijan,
131, G. Javadi Avenue, Baku, AZ1073, Azerbaijan

Absrtact. The paper shows that the addition of SiO_2 nanoparticles to the polymer matrix of isotactic polypropylene significantly improves its thermophysical and dielectric properties. The optimal filler concentration is 3–5 vol%, which maximizes the increase in crystallinity, reduces dielectric losses, and limits the mobility of the polymer macromolecules. The results of this work can be used to create composites with improved electrical insulation and heat resistance properties.

Keywords: isotactic polypropylene, silicon dioxide, nanoparticles, dielectric losses.

Материалы представлены на Международной научно-практической конференции «Современные подходы и практические инициативы в инженерных науках» (г. Казань, 2-3 октября 2025 года).

Статья представлена в редакцию 15 августа 2025 г.