

**М. А. Коваленко<sup>1</sup>, О. О. Мазур<sup>2</sup>**  
(ИММС НАН Беларуси, Гомель<sup>1</sup>; ГГУ имени Ф. Скорины, Гомель<sup>2</sup>)  
Науч. рук. **В. А. Гольдаде**, д-р техн. наук, профессор

## **ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИТОВ ПОЛИПРОПИЛЕН–ПОЛИФЕНИЛЕНСУЛЬФИД**

В настоящее время большое внимание уделяется исследованию электрических свойств полимерных композитов, в которых в качестве наполнителей используются материалы различной природы – проводящие (металлы, углерод) [1, 2], диэлектрические (оксид графена) [3], карбонизированные древесные волокна [4], углеродные нанотрубки [5, 6] и другие наноструктурированные наполнители [7]. Введение наполнителей, а также использование смесей полимеров позволяет регулировать механические, электрические, оптические свойства полимера, получая материалы с заданными характеристиками.

Целью настоящей работы является исследование электрических свойств образцов из композитов на основе смесей полипропилена и полифениленсульфида.

В работе использованы полипропилен (ПП) марки 4445S (Россия) и полифениленсульфид (ПФС) марки NHU-PPS (Китай). Смешение полимеров осуществляли в двухшнековом экструдере марки SuPlast 25/2 (Китай). Экструдированный полимерный прут охлаждали и дробили, а полимерные гранулы использовали для изготовления образцов. Образцы в виде пленок толщиной 150–170 мкм получали методом горячего прессования. Исследовали образцы из композитов на основе ПП, содержащих ПФС в следующих концентрациях, масс. %: 0 (без наполнителя); 10; 20; 35.

Для определения температурной зависимости электропроводности материалов образцы переводили в электретное состояние, подвергая обработке в поле коронного разряда при потенциале коронирующего электрода (иглы) -6,5 кВ (рисунок 1). Величину начальной электретной разности потенциалов  $U_0$  регулировали с помощью сетки, помещенной в воздушный зазор между иглой и образцом. Заряжение проводили при комнатной температуре в течение 2 минут. При равенстве потенциалов поверхности образца и сетки перенос ионов из области разряда прекращается, что позволяет определить значение  $U_0$ .

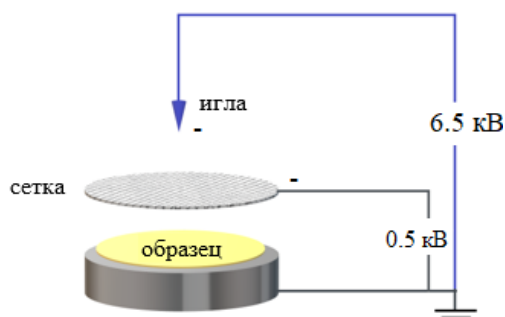


Рисунок 1 – Схема зарядки образцов в коронном разряде

Полярность и величину эффективной поверхностной плотности заряда (ЭППЗ) определяли с помощью измерителя параметров электростатического поля ИПЭП-1 (Беларусь).

Предполагая, что релаксация приповерхностного гомозаряда происходит за счет собственной проводимости диэлектрика, можно рассчитать температурную зависимость удельной электропроводности материала по формуле

$$\gamma(T) = \frac{-\varepsilon \varepsilon_0 \beta}{U_{\gamma}(T)} \cdot \frac{dU_{\gamma}}{dT}, \quad (1)$$

где  $\beta$  – скорость нагрева, К/с;

$\varepsilon_0$  – электрическая постоянная;

$\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость композита.

Диэлектрическая проницаемость композиционных материалов была рассчитана по формуле Лихтенеккера [8]:

$$\lg \varepsilon = \theta_1 \cdot \lg \varepsilon_1 + \theta_2 \cdot \lg \varepsilon_2, \quad (2)$$

где  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  – диэлектрические проницаемости компонентов,

$\theta_1$  и  $\theta_2$  – объемные концентрации первого и второго компонентов.

Результаты расчета с учетом плотностей ПП и ПФС приведены в таблице 1. Видно, что с увеличением концентрации ПФС наблюдается небольшой рост диэлектрической проницаемости композита (у чистого ПФС диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon = 3,9$ ).

Таблица 1 – Диэлектрическая проницаемость ПП и композитов

| Материал      | Чистый ПП | ПП + 10 % ПФС | ПП + 20 % ПФС | ПП + 35 % ПФС |
|---------------|-----------|---------------|---------------|---------------|
| $\varepsilon$ | 2,20      | 2,25          | 2,30          | 2,39          |

Из соотношения 1 получены зависимости удельной электропроводности диэлектрических материалов от температуры (рисунок 2 (а)).

Обращает на себя внимание различие в температурных зависимостях электропроводности чистого ПП (1) и композитов ПП+ПФС. У ПП электропроводность плавно уменьшается с ростом температуры, а у композитов на графиках  $\lg \gamma$  от обратной температуры наблюдается излом при температуре примерно 110÷115 оС. Такой вид графиков можно объяснить с точки зрения механизма ионной проводимости диэлектриков. Ионная проводимость диэлектрика часто реализуется по двум механизмам [9]: при низких температурах она обусловлена примесями, а при высоких – связана с перемещением основных ионов вещества. Зависимость  $\gamma(T)$  в этом случае имеет вид:

$$\gamma = A_1 \exp\left(-\frac{E_1}{kT}\right) + A_2 \exp\left(-\frac{E_2}{kT}\right), \quad (3)$$

где  $A_1$  и  $A_2$  – коэффициенты, не зависящие от температуры  $T$ ;  $E_1$  и  $E_2$  – энергии активации двух механизмов проводимости, причем  $\lg \varphi_1 = E_1$  и  $\lg \varphi_2 = E_2$ .

График функции (3) в логарифмических координатах состоит из двух отрезков с разными наклонами к оси температур. На рисунок 2 (б) график кривой 3 аппроксимирован двумя пересекающимися отрезками с разными наклонами к оси температур. Высокотемпературный участок кривой (соответствует второму слагаемому уравнения 2) характеризует собственную проводимость диэлектрика. График в низкотемпературной области имеет более слабый наклон ( $E_1 < E_2$ ), так как проводимость диэлектрика при этих температурах определяется в основном природой и концентрацией примесей (в данном случае – ПФС). Низкотемпературную проводимость можно характеризовать как «структурно чувствительную», или примесную.

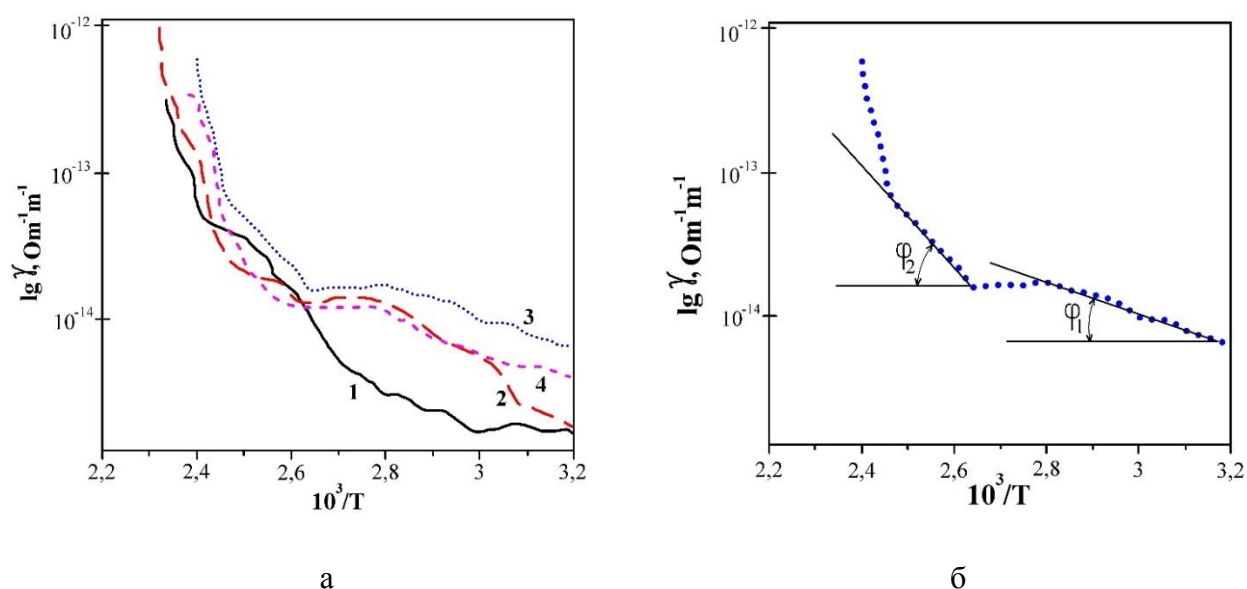


Рисунок 2 – Зависимость удельной электропроводности исследованных материалов от обратной температуры: а – 1 – ПП, 2 – ПП + 10 % ПФС, 3 – ПП + 20 % ПФС, 4 – ПП + 35 % ПФС; б – аппроксимация кривой 3 линейными отрезками

Таким образом, показано, что у ПП электропроводность плавно уменьшается с ростом температуры, а у композитов ПП/ПФС на графиках  $\lg \chi$  от обратной температуры наблюдается излом при температуре примерно  $110 \div 115$  оС. Высокотемпературный участок кривой соответствует собственной проводимости диэлектрика, а низкотемпературный участок характеризует «структурно чувствительную», или примесную проводимость.

## Литература

1. Mamunya, Ye. P., Davydenko V. P., Pissis P., Lebedev E.V. Electrical and thermal conductivity of polymers filled with metal powders // *European Polymer Journal*, 2002, vol. 38(9). – pp. 1887–1897. DOI: 10.1016/S0014-3057(02)00064-2
2. Mamunya, Y., Matzui L., Vovchenko L., Maruzhenko O., Oliynyk V., Pusz S., Kumanek B., Szeluga U. Influence of conductive nano-and microfiller distribution on electrical conductivity and EMI shielding properties of polymer/carbon composites // *Composites Science and Technology*. – 2019. – Т. 170. – С. 51–59.
3. Gudkov, M.V., Ryvkina, N.G., Gorenberg, A.Y., Melnikov, V.P. Electrically conductive nanocomposites with segregated structure based on poly (vinylidene fluoride-co-tetrafluoroethylene) and reduced graphene oxide // *Doklady Physical Chemistry*. - Pleiades Publishing, 2016. – Т. 466. – №. 1. – С. 1–3.
4. Woo Young Kim, Ji-un Jang, Hun Su Lee, Seong Yun Kim. Electrical conductivity of polymer composites based on carbonized wood flour via plasma post-treatment as an effective and economical filler // *Polymer composite*, 2021. – Vol. 42. – Iss. 9. – pp. 4814–4821. <https://doi.org/10.1002/pc.26191>.
5. Luo, X., Yang G., Schubert D.W. Electrically conductive polymer composite containing hybrid graphene nanoplatelets and carbon nanotubes: synergistic effect and tunable conductivity anisotropy // *Advanced Composites and Hybrid Materials*. – 2022. – Т. 5. – №. 1. – С. 250–262.
6. Yasser Zare, Kyong Yop Rhee. Calculation of the Electrical Conductivity of Polymer Nanocomposites Assuming the Interphase Layer Surrounding Carbon Nanotubes // *Polymers*, 2020, vol. 12(2), 404; <https://doi.org/10.3390/polym12020404>.

7. Farah Badrul, et al. Current advancement in electrically conductive polymer composites for electronic interconnect applications: A short review. // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng., 2019, vol. 701, 012039. DOI 10.1088/1757-899X/701/1/012039.

8. Эдвабник, В. Г. К теории обобщенной проводимости смесей // Современные проблемы науки и образования. / В. Г. Эдвабник. – 2015. – № 1–2. – URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=19855>.

9. [Борисова, М. Э. Физика диэлектриков / М. Э. Борисова, С. Н. Койков.](#) – Ленинград : ЛГУ, 1979. – 240 с.