

## СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МНОГОФАЗНЫЕ КОМПОЗИТЫ НА ОСНОВЕ ПОЛИЛАКТИДА

С.М. Лебедев, О.С. Гефле

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия*

Разработаны и исследованы сегнетоэлектрические многофазные композиты на основе полилактида (ПЛА), наполненные титанатом бария ( $\text{BaTiO}_3$ ; ТБ) и небольшим количеством углеродных нанотрубок (УНТ). Обнаружено аномальное увеличение показателя текучести расплава двухфазных композитов ПЛА/ТБ по сравнению с исходным ПЛА примерно на 55% при низком содержании наполнителя. Диэлектрическая проницаемость двухфазного композита ПЛА/ТБ при содержании наполнителя 40 мас.% в низкочастотном диапазоне увеличивается примерно в 2 раза по сравнению с диэлектрической проницаемостью исходного ПЛА, тогда как для трехфазного композита ПЛА/ТБ/УНТ она увеличивается более чем в 40 раз при том же содержании наполнителя и небольшом количестве углеродных нанотрубок (0.05 мас.%). В этом случае значение тангенса угла диэлектрических потерь для этих композитов составляет примерно 0.04 и 0.6 соответственно. СЭМ-изображения сколов поверхностей образцов демонстрируют квазиравномерное распределение наполнителей по объему композита.

**Ключевые слова:** полилактид, титанат бария, углеродные нанотрубки, сегнетоэлектрические полимерные композиты.

### Введение

Сегнетоэлектрические и пьезоэлектрические полимерные материалы находят широкое применение в системах контроля распределения электрического напряжения в электрической изоляции [1, 2], устройствах накопления энергии [3, 4], преобразователях и датчиках в интеллектуальных системах [5, 6], поглощающих материалах в микроволновом диапазоне [7, 8], тканевой инженерии для регенерации костной ткани [9–13] и др. До недавнего времени в качестве наполнителя в таких композитах в большинстве случаев применялся цирконат титанат свинца (ЦТС). Это обусловлено тем, что ЦТС обладает очень высокой диэлектрической проницаемостью и отличными сегнетоэлектрическими и пьезоэлектрическими свойствами. Однако свинец и его соединения очень токсичны. Поэтому строгие требования по защите окружающей среды диктуют необходимость разработки бессвинцовых сегнетоэлектрических и пьезоэлектрических полимерных материалов. Жесткие требования предъявляются и к полимерным матрицам, на основе которых изготавливаются эти композиты, поскольку загрязнение окружающей среды полимерными отходами также является очень важной экологической проблемой.

В 1945 г. Вул и Гольдман [14, 15] открыли сегнетоэлектричество в титанате бария ( $\text{BaTiO}_3$ ; ТБ). В отличие от других сегнетоэлектриков, его свойства при температуре Кюри изменяются не плавно, а скачкообразно.  $\text{BaTiO}_3$  обладает высокой диэлектрической проницаемостью и относительно высоким пьезоэлектричеством, кроме того, он не токсичен, в отличие от ЦТС. За последние десятилетия было разработано большое количество сегнетоэлектрических и пьезоэлектрических полимерных композитов, наполненных бессвинцовыми наполнителями.

«Умные» сегнетоэлектрические и пьезоэлектрические импланты используются для преобразования механической нагрузки в электрическое поле (так называемый прямой пьезоэлектрический эффект) и наоборот (так называемый обратный пьезоэлектрический эффект) в биомедицине. Последний эффект лежит в основе метода электростимуляции роста тканей внешним электрическим полем. Ясуда и Фукада [16, 17] впервые исследовали пьезоэлектричество в костной ткани в 1950-х годах. Позже Бассетт [18] показал, что механическая нагрузка, приложенная к кости, может генерировать электрическое поле, которое ускоряет рост новой костной ткани.

Биоразлагаемые импланты, изготовленные только из биополимеров (обычно это полилактид (ПЛА), поликапролактон и др.) непригодны в качестве материалов для электростимуляции роста костной ткани, поскольку эти полимеры являются изоляционными материалами. Чтобы увеличить проводимость полимерных имплантов, многие авторы исследовали двухфазные композиты полимер/углеродные нанотрубки (полимер/УНТ) для электростимуляции роста костной ткани *in vitro* [19] и *in vivo* [20], которые позволяют увеличить электрическую проводимость на несколько порядков.

Уважаемые читатели!

Доступ к полнотекстовой версии журнала  
**«Известия высших учебных заведений. Физика»**  
осуществляется на платформе  
Научной электронной библиотеки eLIBRARY.RU  
на платной основе:

<https://elibrary.ru/contents.asp?titleid=7725>