

УДК 621.372.41

А. В. Мачулянский, канд. техн. наук, Д. Д. Татарчук, канд. техн. наук, О. В. Теличкина,  
Т. Л. Волхова, канд. техн. наук

## Диэлектрические характеристики композиционных материалов на основе углерода

Исследованы зависимости комплексной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь в диапазоне температур  $T = 280 - 360$  К на частотах 10 ГГц и 30 ГГц при различных концентрациях дисперсной фазы углерода в полимерном композитном материале. Показано, что наименьшими значениями температурного коэффициента тангенса угла диэлектрических потерь (порядка  $10^{-5} \text{ K}^{-1}$ ) обладают полимерные композиты с содержанием углерода более 20%.

**Dependences of complex dielectric permittivity and tangent of dielectric losses angle are explored in the range of temperatures  $T = 280 - 360$  K at the frequencies of 10 GHz and 30 GHz at different concentrations of dispersion phase of carbon in polymeric composite material. It is shown that polymeric composites possesses the least values of temperature coefficient of tangent of dielectric losses angle (nearly  $10^{-5} \text{ K}^{-1}$ ) with maintenance of carbon more than 20%.**

**Ключевые слова:** полимерный композит, комплексная диэлектрическая проницаемость, тангенс угла диэлектрических потерь.

### Введение

Полимерные композиты на основе частиц углерода представляют интерес как перспективные структуры для создания материалов с регулируемыми в широких пределах диэлектрическими и электромагнитными параметрами. Такие материалы перспективны для разработки эффективных широкодиапазонных поглотителей электромагнитных волн с высокой температурной стабильностью [1 - 4].

До настоящего времени диэлектрические характеристики полимерных композитов на основе частиц углерода остаются малоисследованными в СВЧ – диапазоне при различных температурах и соотношениях компонентов композита [3,4]. Вместе с тем комплексные экспериментальные исследования вещества в ультрадисперсном состоянии позволяют изучить физические механизмы, определяющие свойства таких структур и синтезировать на их основе материалы с заданными стабильными параметрами.

В работе проведено исследование комплексной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь на частотах 10 ГГц и 30 ГГц в диапазоне температур  $T = (280 - 360)$  К при различных концентрациях дисперсной фазы углерода в полимерном композитном материале.

### Методика эксперимента

Композитные материалы были изготовлены методом электромеханического перемешивания дисперсного углерода с полимерным связующим при комнатной температуре. В качестве матрицы использовался полимер с комплексной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_{m1}^* \approx 2,73 - j0,19$ , дисперсная фаза представляла собой частицы углерода размером 0,06 - 0,1 мкм. Концентрация углерода в исследуемых образцах составляла от 10 до 70 % по массе.

Диэлектрические характеристики образцов цилиндрической формы определялись методом диэлектрического резонатора с Е-типом колебаний [5] на моде  $TE_{010}$  в диапазонах частот 8-12 ГГц и 25-32 ГГц. Для уменьшения погрешности измерений использовались эталонные образцы с известными диэлектрическими параметрами, что позволило обеспечить погрешность измерения для диэлектрической проницаемости менее 1,5%, а для тангенса угла диэлектрических потерь – менее 7,5%.

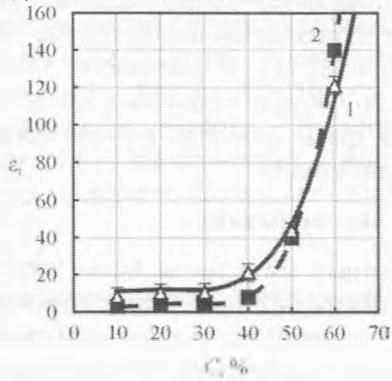
При исследовании температурных зависимостей диэлектрических параметров композитных материалов использовался термоэлектрический преобразователь ТР – 01, обеспечивающий погрешность не более 0,75%.

### Результаты эксперимента

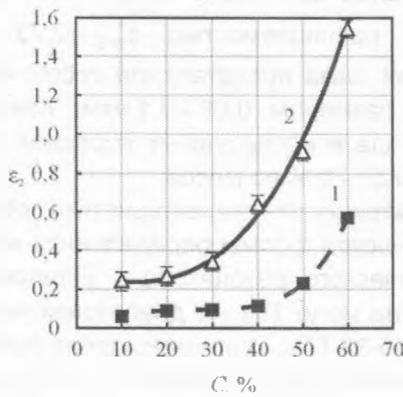
Результаты экспериментальных исследований комплексной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь в композите при различных концентрациях дисперсной фазы углерода на частотах 10 ГГц и 30 ГГц при комнатной температуре представлены на рис. 1 и рис. 2.

При увеличении содержания наночастиц углерода от 20 до 70 % по массе величина действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости возрастает в исследуемом диапазоне частот. Необходимо отметить, что величина дей-

ствительной части диэлектрической проницаемости композита не зависит от частоты в пределах погрешности измерений (рис.1,а) во всем рассмотренном диапазоне изменения концентрации частиц углерода. Это можно объяснить тем, что в данном диапазоне частот действительная часть диэлектрической проницаемости определяется в основном упругой дипольной поляризацией, дисперсия которой наблюдается на более высоких частотах [6].



а



б

Рис. 1. Зависимости действительной части (а) и мнимой части (б) диэлектрической проницаемости композита от концентрации дисперсной фазы углерода в полимерной матрице на частотах: 1 – 10 ГГц; 2 – 30 ГГц

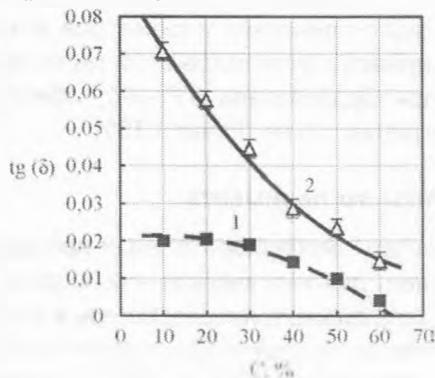
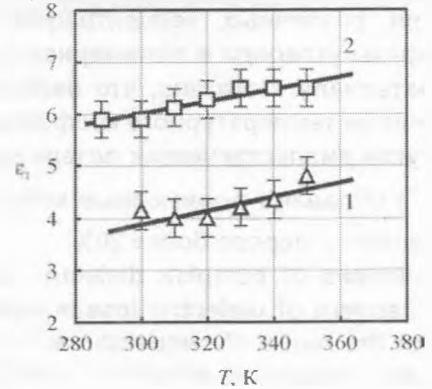


Рис. 2. Зависимости тангенса угла диэлектрических потерь композита от концентрации дисперсной фазы углерода в полимерной матрице на частотах: 1 – 10 ГГц; 2 – 30 ГГц

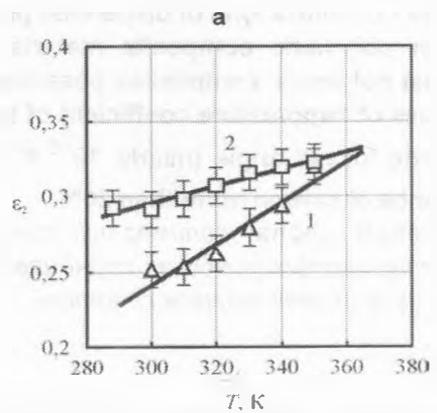
В тоже время, из рис.1,б и рис.2 видно, что на частоте 30 ГГц наблюдаются более высокие

значения  $\epsilon_2$  и  $\text{tg}(\delta)$ . Так, например, в диапазоне изменения содержания дисперсной фазы углерода от 20 до 60 % по массе на частоте 30 ГГц мнимая часть диэлектрической проницаемости составляет 0,21 – 1,52, а на частоте 10 ГГц соответственно 0,06 – 0,58.

На рис.3 и рис.4 представлены зависимости комплексной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь от температуры при разных уровнях содержания частиц углерода в полимерном композите.



а



б

Рис. 3. Зависимости действительной части (а) и мнимой части (б) диэлектрической проницаемости композита от температуры при разных концентрациях дисперсной фазы углерода в полимерной матрице: 1 – 24 %; 2 – 39 %

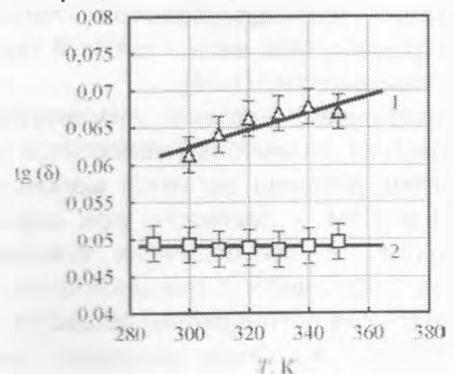


Рис. 4. Зависимости тангенса угла диэлектрических потерь композита от температуры при разных концентрациях дисперсной фазы углерода в полимерной матрице: 1 – 24 %; 2 – 39 %

Из анализа этих зависимостей следует, что температурный коэффициент действительной части диэлектрической проницаемости ( $TK\epsilon_1$ ) практически не зависит от содержания частиц углерода в пределах погрешности измерений в исследуемом интервале температур и соответствует значению  $TK\epsilon_1 \approx 0,012 \text{ K}^{-1}$

При этом, температурный коэффициент мнимой части диэлектрической проницаемости ( $TK\epsilon_2$ ) и температурный коэффициент тангенса угла диэлектрических потерь ( $TKtg(\delta)$ ) уменьшается с увеличением концентрации дисперсной фазы углерода. Так, у композитов с содержанием частиц углерода 24%  $TK\epsilon_2 \approx 0,001 \text{ K}^{-1}$ ,  $TKtg(\delta) \approx 0,0001 \text{ K}^{-1}$ , а для композитов с содержанием 39%  $TK\epsilon_2 \approx 0,0006 \text{ K}^{-1}$ ,  $TKtg(\delta) \approx 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ . Таким образом, наименьшими значениями  $TKtg(\delta)$  обладают полимерные композиты с содержанием дисперсной фазы углерода более 20 %.

### Выводы

1. Установлено, что в полимерном композите с ростом концентрации частиц углерода возрастают действительная и мнимая части диэлектрической проницаемости и уменьшается тангенс угла диэлектрических потерь.

2. В исследованном температурном интервале  $TK\epsilon_1$  композита составляет  $0,012 \text{ K}^{-1}$  и практически не зависит от содержания углерода.

3. Показано, что с увеличением содержания углерода в композите  $TKtg(\delta)$  уменьшается и

при содержании углерода более 20% составляет  $10^{-5} \text{ K}^{-1}$ . Это позволяет синтезировать полимерные композиты на основе углерода с термостабильными диэлектрическими характеристиками.

### Литература

1. *Н.Е. Казанцева, Н.Г. Рывкина, И.А. Чмутин* Перспективные материалы для поглотителей электромагнитных волн // Радиотехника и электроника, 2003, Т. 48, № 2, с. 173–184.
2. *В. Мордович, И. Аругунов, С. Заглядова, А. Караева* Нанокompозиты на основе полиолефинов и углеродных наночастиц и нановолокон // Наноиндустрия, 2009, № 1, с. 20 – 22.
3. *Kilbride B.E., Coleman J.N., Fraysse J., Fomet P., Cadek M., Drury A., Hutzer S., Roth S., Blau W.J.* Experimental observation of scaling laws for alternating and direct current conductivity in polymer-carbon nanotube composite thin films – J. Appl. Phys. 2002, №7, pp. 4024-4030.
4. *Ferrera M. et al.* Influence of the electrical field applied during thermal cycling on the conductivity of LLDPE/CNT composites – Physica E 37, 2007. – pp 66-71.
5. *Д.Д. Татарчук* Вимірювання НВЧ-параметрів матеріалів методом діелектричного резонатора Е-типу. // «Електроника і зв'язь», 2002, №14, с. 22-23.
6. *Поплавко Ю.М.* Фізичне матеріалознавство: Навч. посіб. / Ю.М. Поплавко, Л.П. Переверзева, С.О. Воронов, Ю.І. Якименко. - К.: НТУУ "КПІ", 2007. - Ч. 2: Діелектрики. - 392 с. ISBN 978-966-622-256-8.