

Т.Г. Ляшук, Б.Б. Колупаев

ВЛИЯНИЕ ВЗРЫВА ПРОВОДНИКА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО КАБЕЛЯ НА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛИМЕРНОГО ИЗОЛЯТОРА

*Ровенский государственный гуманитарный университет,
ул. Остафова, 31, г. Ровно, 33000, Украина, nightquesttg@rambler.ru*

Введение

Большинство высокомолекулярных соединений представляют собой диэлектрики, которые широко используются в качестве изоляционных материалов при производстве электрических кабелей [1]. В процессе эксплуатации возможен пробой одного или нескольких проводников, и в результате взрыва часть металла в виде высокодисперсного ингредиента внедряется в слой диэлектрика, изменяя его электрофизические свойства. При этом, в случае ухудшения диэлектрических свойств изолятора, возникает угроза электрического разрушения целостности всего кабеля. Однако влияние высокодисперсного металла в виде наночастиц, внедренных в полимер, на его диэлектрические свойства не исследовано. Цель работы – исследовать влияние высокодисперсного металла, возникающего при взрыве проводника, на электрофизические свойства линейного полимера, используемого в качестве изолятора при изготовлении многожильных электрических кабелей.

Установлено [2], что для разрушения проводника путем его нагревания и испарения, необходимо следующее условие:

$$\frac{1}{2}CV_0^2 \geq W_r + \int I^2 R_0 dt, \quad (1)$$

где C – емкость аккумулирующего конденсатора; V_0 – начальное напряжение на конденсаторной батарее; W_r – энергия, необходимая для испарения проводника; I – сила тока; R_0 – эффективное сопротивление разрядного контура.

При этом распределение энергии между наиболее вероятным участком повреждения проводника E_1 и сопротивлением внешней цепи R_e имеет вид [3]:

$$\frac{1}{2}CV_0^2 = E_1 + R_e S, \quad (2)$$

где S – величина, отражающая распределение энергии во внешней цепи.

Следовательно, величина запасенной энергии в цепи зависит от ее параметров, величина которых определяет неустойчивость как один из видов неустойчивости системы (ψ). Показано [4], что в случае

$$t \ll \psi \quad (3)$$

где t – время испарения проводника, ψ – временная постоянная неустойчивости, энергия взрыва проводника уже не зависит от его длины. Однако установлено [5], что время до взрыва проводника, линейно зависящее от его поперечного сечения, и состояние границы раздела диэлектрик – металл определяется характеристиками изолятора:

$$\left(\frac{2E}{\pi \rho_0 r_0^4} \right)^{1/2} t = \xi + \rho_g \frac{\xi^3}{3\rho_0}, \quad (4)$$

где r_0 – начальный радиус проводника; ρ_g и ρ_0 – плотности соответственно окружающей среды и проводника, E – энергия единицы длины цилиндрического проводника; ξ – относительное увеличение его радиуса.

Исследования [6] показали, что взрыв проводника многостадийен, на одной из стадий происходит его разрушение с образованием наночастиц металла. В результате нелинейных эффектов, которые сопровождают такое разрушение твердого тела, наночастицы металла внедряются в слой диэлектрика, находящийся между последующими проводниками, изменяя его электрофизические свойства. При этом исходный полимер, выступающий в роли изолятора, преобразуется в полимерный композиционный материал (ПКМ) с новыми диэлектрическими свойствами. В качестве наполнителя исходного полимера выступают наночастицы металла, размер которых составляет величину [7]:

$$d_0 = \frac{\sqrt{3}h}{\sqrt{2mk}} \theta_D^{-1/2} = C\theta_D^{-1/2}, \quad (5)$$

где k, h – постоянные Больцмана и Планка соответственно, m – масса электрона, θ_D – характеристическая (дебаевская) температура.

Установлено [8], что диэлектрические свойства ПКМ зависят от типа и содержания ингредиентов в определенной полимерной матрице, их топологии, состояния граничного слоя и других факторов. Так, согласно [9], следует, что

$$\varepsilon_c = \varepsilon_f \varphi_f + \varepsilon_m (1 - \varphi_f), \quad (6)$$

$$\frac{1}{\varepsilon_c} = \frac{\varphi_f}{\varepsilon_f} + \frac{1 - \varphi_f}{\varepsilon_m}, \quad (7)$$

$$\varepsilon_c = \varepsilon_f^{\varphi_f} \varepsilon_m^{(1-\varphi_f)}, \quad (8)$$

$$1 - \varphi_f = \frac{\varepsilon_m - \varepsilon_c}{\varepsilon_f - \varepsilon_m} \left(\frac{\varepsilon_m}{\varepsilon_c} \right)^{1/3}, \quad (9)$$

$$\varepsilon_c = \varepsilon_m \frac{\varepsilon_f + 2\varepsilon_m + 2v_f (\varepsilon_f - \varepsilon_m)}{\varepsilon_f + 2\varepsilon_m - v_f (\varepsilon_f - \varepsilon_m)}, \quad (10)$$

$$\varepsilon_c = \varepsilon_m \frac{\varepsilon_f + 2\varepsilon_m + 2(1-P)(\varepsilon_f - \varepsilon_m)}{\varepsilon_f + 2\varepsilon_m - P(\varepsilon_f - \varepsilon_m)} + v_f P c^2 \varepsilon_f, \quad (11)$$

$$\varepsilon_c = \varepsilon_m \left[1 - \frac{a^2 \pi}{4} + \frac{a \pi p}{2} \left(1 - \frac{p}{a} \ln \left(1 + \frac{p}{a} \right) \right) \right], \quad (12)$$

$$\varepsilon_c = \varepsilon_m v_m^0 + \varepsilon_f v_f^0, \quad (13)$$

где $\varepsilon_c, \varepsilon_f, \varepsilon_m$ – диэлектрическая проницаемость системы, наполнителя и матрицы соответственно, φ_f – объемное содержание наполнителя, P – вероятность образования проводящего канала,

$$a = \left(\frac{6v_f}{\pi} \right)^{1/3}, \quad p = \frac{\varepsilon_f}{\varepsilon_m - \varepsilon_f}, \quad \varepsilon_f^0 \varphi_f^0 = \varepsilon_{f1}(\varphi_f) + \varepsilon_{f2}(\varphi_f), \quad \varepsilon_{f2} = \frac{\pi \varepsilon_{f1}}{3\varphi_f \sqrt[3]{\frac{6\pi p_f (1-\mu^2)}{E}}}, \quad \varepsilon_f^0$$

– комплексная диэлектрическая проницаемость наночастиц наполнителя, φ_f^0, φ_m^0 – эквивалентное и соответственно объемное содержание наполнителя, ε_{f1} – диэлектрическая проницаемость наночастиц наполнителя,

ε_{f2} – диэлектрическая проницаемость контактных поверхностей наночастиц, E – модуль упругости материала наполнителя, μ – коэффициент Пуассона, p_f – давление между частицами.

В случае металлонаполненных полимерных систем для расчета величины ε_c также широко используют соотношения [10]:

$$\varepsilon_c = \varepsilon_m + 3v_f \varepsilon_m, \quad (14)$$

$$\varepsilon_c = \frac{\varepsilon_m}{(1 - v_f)^3}, \quad (15)$$

$$\varepsilon_c = \frac{\varepsilon_m}{1 - 3v_f}. \quad (16)$$

Особый интерес представляют ПКМ, имеющие критическое ($\Phi_{кр}$) содержание наполнителя, при котором весь полимер в объеме переходит в состояние граничного слоя. Оценим величину $\Phi_{кр}$ исходя из соотношения между радиусом инерции макромолекулярного клубка $\langle R_q \rangle$ и диаметром частицы наполнителя d [11]:

$$\frac{\langle R_q \rangle}{d} = \left(\frac{\Phi_m}{\Phi_{кр}} \right)^{1/3} - 1, \quad (17)$$

где Φ_m – предельное содержание дисперсной фазы в системе (0,63 при статистической упаковке равновеликих сфер).

При $\Phi_m \geq \Phi_{кр}$ в ПКМ должны наблюдаться существенные изменения свойств, поскольку наступает упорядочение системы частиц наполнителя внутренним полем полимерной матрицы.

Используя полученные соотношения, проанализируем экспериментальные результаты исследования диэлектрических свойств композита.

Экспериментальная часть

В качестве исходного полимера для проведения исследований был выбран поливинилхлорид (ПВХ) марки ПВХ - С - 63 - 59М с $M - 1,4 \cdot 10^5$ и $T_d = 354K$ (Каустик, Башкортостан).

Наночастицы меди вводили в ПВХ с помощью взрыва проводника [12], который закорачивали на батарею конденсаторов емкостью 50 мкФ при напряжении 10 кВ. Преимущественный размер частиц наполнителя, определенный согласно соотношению (5), составляет 13 нм. Содержание наполнителя в ПВХ варьировали в диапазоне (0 ÷ 0,1) об. %.

Диэлектрические свойства ПВХ–систем $\varepsilon', \varepsilon'', \text{tg}\delta$ исследовали с помощью моста Р 5083 на частоте 100 кГц в температурном интервале (293 ÷ 393)К при скорости нагрева образца 3 К/мин.

В качестве эталона выбран плавленный кварц ($\varepsilon_{кв} = 3,8$; $\text{tg}\delta_{кв} = 2 \cdot 10^{-4}$) [9]. Погрешность измерений не превышала 1%.

Результаты и их обсуждение

Результаты, представленные на рис. 1, показывают, что по мере повышения содержания наполнителя величина $\varepsilon', \varepsilon''$ и $\text{tg}\delta$ ПВХ–систем нелинейно изменяется.

Характерной особенностью зависимости $\varepsilon'', \text{tg}\delta(\Phi)$ при $T = 293K$ является наличие ярко выраженного минимума этих величин при $\Phi = 0,06$ об. % наночастиц меди, а также интенсивное возрастание ε' в этом диапазоне ингредиента.

Согласно соотношению (17) оценим величину критического содержания наполнителя в ПВХ – системе. Исходя из условия [11], что $\frac{\langle R_q^2 \rangle}{M} = 10^{-16} \text{ м}^2$, следует – $\Phi_{кр} = 0,06$ об. %. Таким образом,

при $\varphi \geq 0,06$ об.% происходит формирование топологии фазы частиц высокодисперсного металла в полимерной матрице, что находит свое проявление в зависимости $\varepsilon''(\text{tg}\delta) = f(\varphi)|_T$.

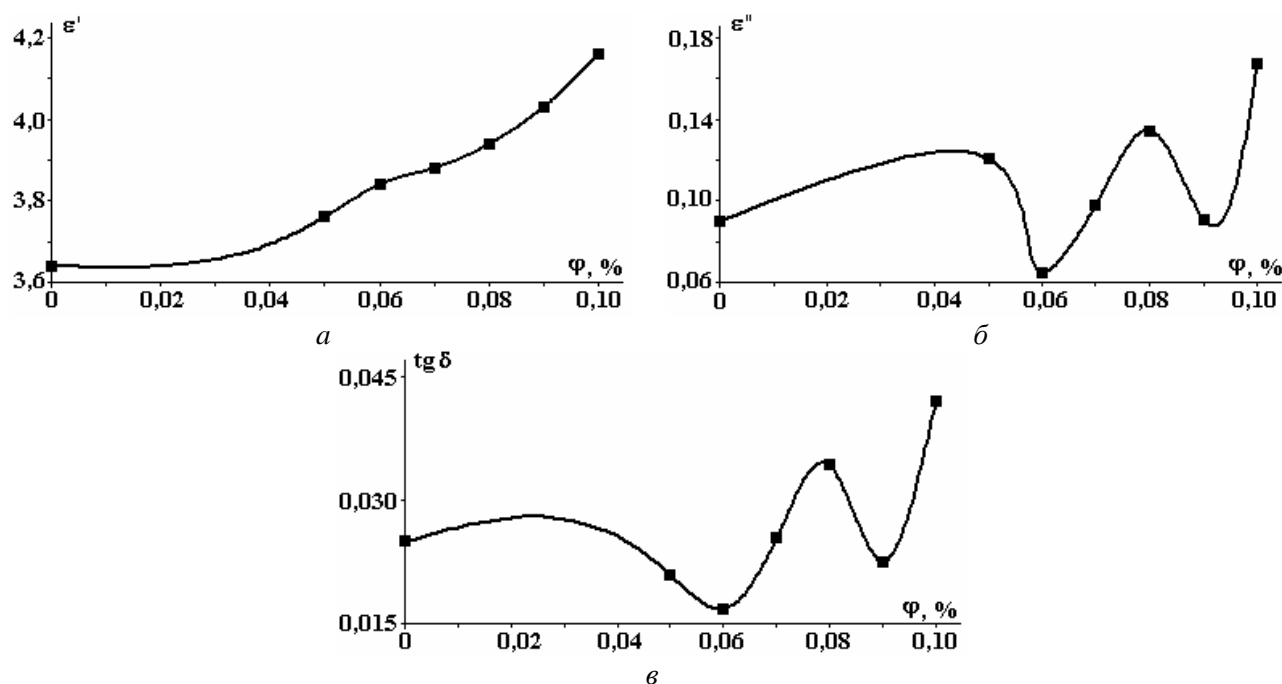


Рис. 1. Концентрационные зависимости величин диэлектрических характеристик ПКМ (ПВХ + Си) при $T=293\text{K}$: а – $\varepsilon'(\varphi)$; б – $\varepsilon''(\varphi)$; в – $\text{tg}\delta(\varphi)$

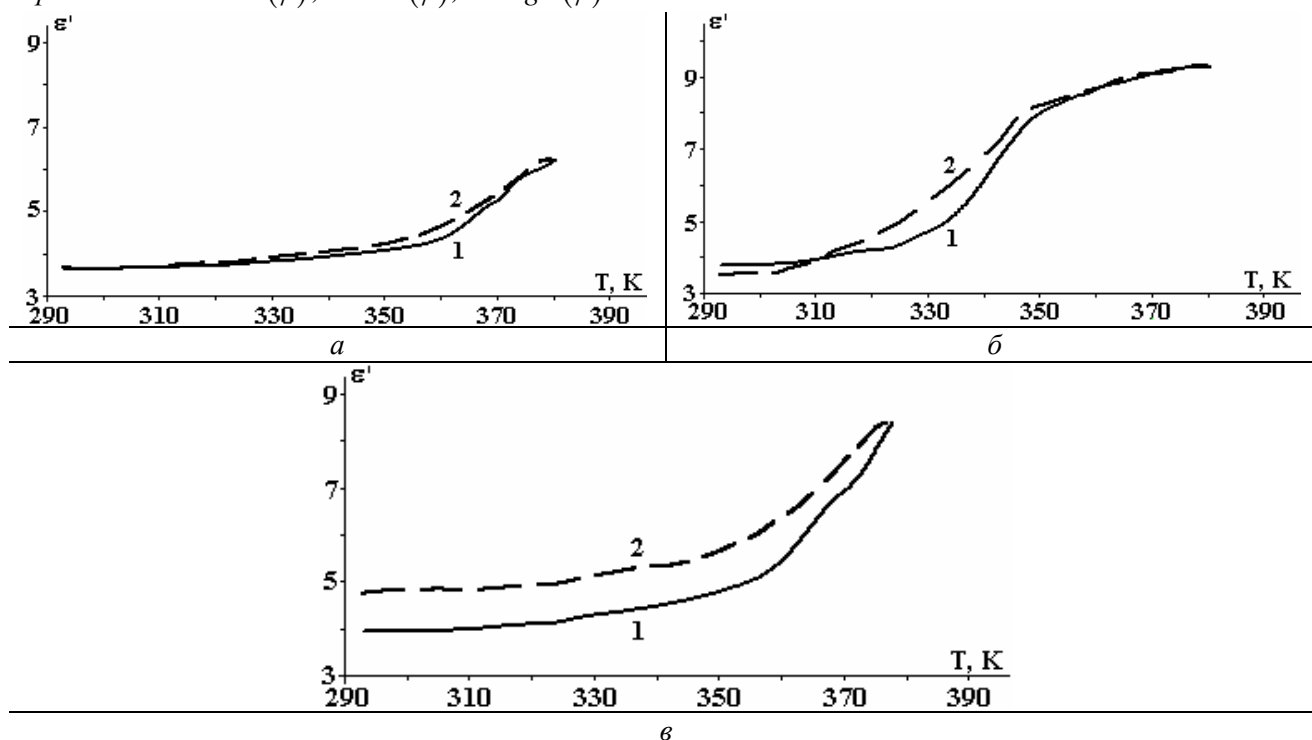


Рис. 2. Температурная зависимость величины ε' ПВХ-систем (1 – нагрев, 2 – охлаждение): а – ПВХ; б – ПВХ + Си(0,05 об.%); в – ПВХ + Си(0,08 об.%)

При дальнейшем нагревании–охлаждении (рис. 2) исследуемых систем при $(0 \leq \varphi \leq 0,1)$ об.% Си площадь петли гистерезиса достигает максимального значения при $\varphi = 0,06$ об.% наполнителя. Характерно, что при $(0,07 \leq \varphi \leq 0,09)$ об.% Си имеет место инверсия данного свойства с последующим

выравниванием для системы ПВХ +0,1 об.% Си. Это указывает на различную степень участия структурных элементов ПВХ в релаксационных процессах системы. Так, при $290 \text{ K} \leq T \leq 350 \text{ K}$ вклад локальной составляющей в диссипацию энергии, по сравнению с сегментальной подвижностью при $350 \text{ K} \leq T \leq 380 \text{ K}$, для всех ПВХ-систем незначителен.

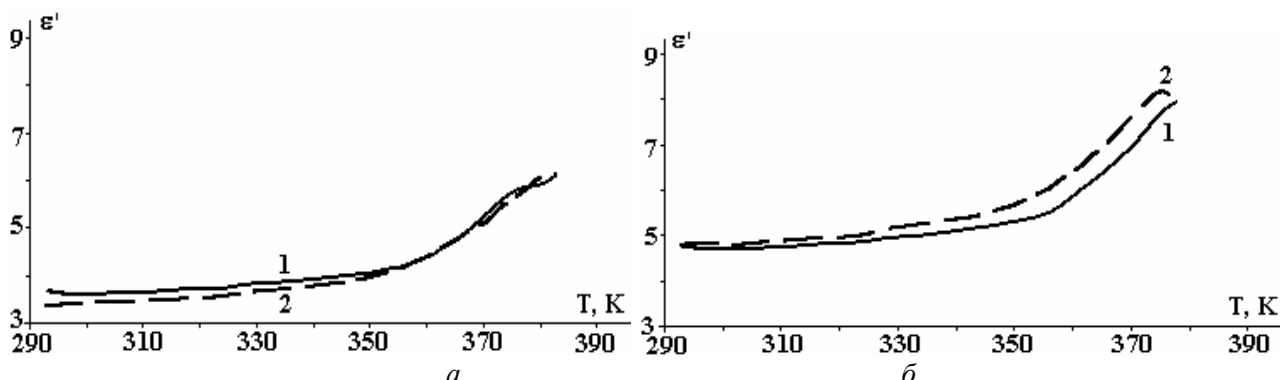


Рис. 3. Температурная зависимость величины ϵ' ПВХ-систем (1 – нагрев, 2 – охлаждение): а – ПВХ; б – ПВХ + Си(0,08 об.%)

Повторный нагрев–охлаждение (рис. 3 и таблица) ПКМ значительно уменьшает гистерезисные потери энергии электрического поля, что характерно для систем с более равновесной структурой [11].

Диссипация энергии ПКМ при процессе нагрев-охлаждение (1) и повторном процессе нагрев-охлаждение (2)

$\varphi_{об}, \%$	ϵ'		ϵ''		$tg \delta$	
	$\frac{E_{нагр. \text{ №1}}}{E_{охл. \text{ №1}}}$	$\frac{E_{нагр. \text{ №2}}}{E_{охл. \text{ №2}}}$	$\frac{E_{нагр. \text{ №1}}}{E_{охл. \text{ №1}}}$	$\frac{E_{нагр. \text{ №2}}}{E_{охл. \text{ №2}}}$	$\frac{E_{нагр. \text{ №1}}}{E_{охл. \text{ №1}}}$	$\frac{E_{нагр. \text{ №2}}}{E_{охл. \text{ №2}}}$
0	0,92	1,11	0,76	0,87	0,83	0,90
0,06	1,36	0,70	0,70	0,83	0,97	0,85
0,07	1,04	1,05	0,71	0,90	0,77	0,91
0,08	0,48	0,89	1,63	0,77	1,82	0,82
0,09	1,53	0,80	0,88	0,68	0,77	0,76
0,10	0,76	1,00	0,74	0,93	0,84	0,93

Сравнение результатов экспериментальной зависимости $\epsilon = f(\varphi)|_T$ с теоретическими расчетами величин (6 ÷ 16) показывает (рис. 4), что они не согласуются между собой во всем диапазоне (0 ÷ 0,1) об.% содержания наполнителя.

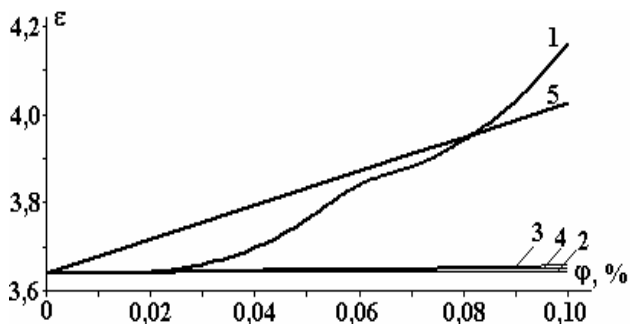


Рис. 4. Концентрационная зависимость диэлектрической проницаемости ПКМ (ПВХ + Си) при $T=293\text{K}$: 1 – эксперимент; 2 – расчет (7); 3 – расчет (8); 4 – расчет (10), (14), (16); 5 – расчет (13)

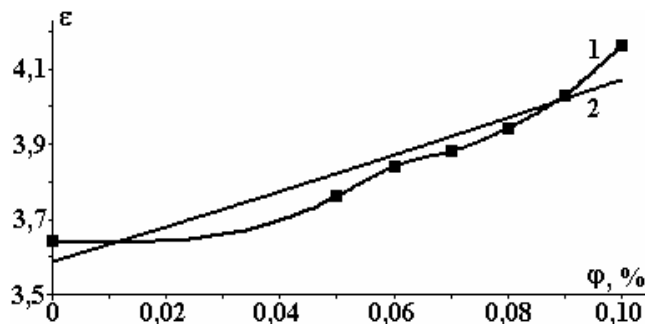


Рис. 5. Концентрационная зависимость диэлектрической проницаемости ПКМ (ПВХ + Си) при $T=293\text{K}$: 1 – эксперимент; 2 – интерполяция $\epsilon(\varphi) = 4,90\varphi + 3,57$; $\epsilon(\varphi) = 3,58 \cdot 3,54^\varphi$; $\epsilon(\varphi) = 3,58 \cdot \exp(1,26\varphi)$

Это обусловлено тем, что соотношения (6) – (9) учитывают двухкомпонентную модель; в (10) – допускают, что сферические частицы наполнителя окружены полимером, но между компонентами отсутствует взаимодействие. В то же время при получении соотношения (11) предполагают наличие проводящих каналов с вероятностью P , а в случае (12) – учтена сферическая форма частиц наполнителя. В соотношении (13) рассмотрен композит, когда наночастицы наполнителя контактируют между собой, и учтен вклад диэлектрической проницаемости наполнителя, а также наличие контактной поверхности наполнителя и технология получения образцов.

Так, величины ε согласно расчетным формулам (7), (8), (10), (14), (16) в области концентраций $(0 \div 0,03)$ об.% Cu (рис. 4, кривые 2, 3, 4) удовлетворительно согласуются с данными эксперимента. В то же время расчет величины ε ПВХ–систем, выполненный согласно соотношению (13), показал хорошее согласование с результатами эксперимента в области концентраций $(0,07 \div 0,09)$ об.% наполнителя (рис. 4, кривая 5).

Неудовлетворительное согласование результатов эксперимента с расчетными значениями $\varepsilon = f(\varphi) \Big|_T$ в области $(0,03 \div 0,07)$ об.% Cu и при $\varphi > 0,09$ об.% наполнителя, видимо, обусловлено значительными структурными изменениями ПКМ, а также действием высокоэнергетической составляющей процесса взрыва проводника [3].

Действительно, следуя [9], воспользуемся формулой Фрелиха для энтропии:

$$S = S_0 + \frac{dW}{dT}, \quad (18)$$

где W – диссипация энергии электрического поля, величина которой пропорциональна ε'' . Поскольку dW/dT меняет знак в случае нагрева–охлаждения ПВХ–систем при $\varphi \geq 0,08$ об.% Cu, следовательно, при $T \geq 360K$ для таких композитов при следующем их охлаждении имеет место переход типа беспорядок–порядок. Расчет методом Симпсона показал, что экспериментальную зависимость

$\varepsilon = f(\varphi) \Big|_T$ можно представить полиномом вида $\varepsilon(\varphi) = \sum_{i=0}^n a_i \varphi^i = 3,64 - 0,75\varphi + 59,71\varphi^2$ или путем компьютерной интерполяции, с помощью которой можно рассчитывать диэлектрические свойства композита в диапазоне $(0 \div 0,1)$ об.% содержания наполнителя (рис. 5).

Заключение

Получены убедительные доказательства того, что при электрическом взрыве проводника происходят необратимые изменения электрофизических свойств полимерного изолятора. При этом по мере увеличения содержания ультрадисперсного порошка меди в ПВХ в процессе его неоднократного „охлаждения–нагревания” наблюдается инверсионное изменение величины энтропии системы, указывающее на структурный переход беспорядок–порядок. Это достигается за счет локальной (при $290K \leq T \leq 350K$) и сегментальной ($T \geq 350K$) подвижности структурных элементов аморфного полимера.

ЛИТЕРАТУРА

1. Канель Г.И., Фортон В.Е., Разоренов С.В. Ударные волны в физике конденсированного состояния // УФН. 2007. Т. 177. № 8. С. 809–830.
2. Андриевский Р.А., Рагуля А.В. Наноструктурные материалы. М.: Академия, 2005.
3. Орешкин В.И. Перегревные неустойчивости при электрическом взрыве проводников // Письма в журналах технической физики. 2009. Т. 25. Вып. 1. С. 76–82.
4. Яворский Н.А. Электрический взрыв проводников – метод получения ультрадисперсных порошков: Автореф. дисс... канд. техн. наук: 05.14.12 / Томский политехнический институт им. С.М. Кирова. Томск, 1982. 24 с.
5. Тесакова М.В., Парфенюк В.И., Годлевский В.А. Влияние добавок ультрадисперсных (наноразмерных) медьсодержащих порошков на трибологические свойства промышленных смазок // Электронная обработка материалов. 2008. № 6. С. 56–62.
6. Кускова Н.И., Бакларь В.Ю., Гордиенко В.И., Хайнацкий С.А. О получении ультрадисперсных порошков металлов при электрическом взрыве проводников в жидкости. Часть I. Особенности взрыва проводников в жидкости // Электронная обработка материалов. 2008. № 1. С. 44–50.

7. Гусев А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии. М.: Физматлит, 2005.
8. Луцейкин Г.А. Моделирование свойств полимеров по их химическому составу. Моделирование электрических свойств // Пластические массы. 2008. № 4. С. 45–51.
9. Сажин Б.И. Электрические свойства полимеров. Третье изд. Л.: Химия. 1986. 224 с.
10. Помогайло А.Д., Розенберг А.С., Уфлянд И.Е. Наночастицы металлов в полимерах. М.: Химия, 2000.
11. Френкель С.Я., Цыгельный И.М., Колупаев Б.С. Молекулярная кибернетика. Львов, Свит. 1990. 186 с.
12. Котов Ю.А., Яворский Н.А. Исследование частиц, образующихся при электрическом взрыве проводников // Физика и химия обработки материалов. 1978. № 4. С. 24–29.

Поступила 24.03.10

Summary

A process of electric explosion of a conductor as a part of an electric cable is investigated. It is established that electrophysical properties polymeric dielectric nonlinear depend on the maintenance of ultradisperse metal filler. In the course of numerous heating – coolings of the insulator a streamlining of structure of a polymeric composite takes place.
