

Заключение

1. Исследованы температурно-частотные зависимости комплексной диэлектрической проницаемости полимерных 0-3 композитов и смесей.
2. Метод диэлектрической спектроскопии является хорошим инструментом для неразрушающе-

го контроля состояния полимерных диэлектриков в электрическом поле и оценки областей их применения.

3. Эффекты сильного поля в полимерных 0-3 композитах (нелинейное изменение ε' и $\tan\delta$) необходимо учитывать при разработке новых КПМ с заданными свойствами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chan H.L., Chen Y.W., Choy C.L. Thermal hysteresis in the permittivity and polarization of lead zirconate titanate/vinylidenefluoride-trifluoroethylene 0-3 composites // IEEE Trans Dielect. Electr. Insul. – 1996. – V. 3. – P. 800–805.
2. Gefle O.S., Lebedev S.M., Uschakov V.Y. The mechanism of the barrier effect in solid dielectrics // J. Phys. D: Appl. Phys. – 1997. – V. 30. – P. 3267–3273.
3. Lebedev S.M., Gefle O.S., Pokholkov Y.P. The barrier effect in dielectrics. The role of interfaces in the breakdown of inhomogeneous dielectrics // IEEE Trans. Dielect. Electr. Insul. – 2005. – V. 12. – P. 537–555.
4. Gefle O.S., Lebedev S.M., Uschakov V.Y. Tree-inception in PMMA with a barrier // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2004. – V. 37. – P. 2318–2322.
5. Сажин Б.И. Электрические свойства полимеров. – Л.: Химия, 1977. – 192 с.
6. Serdyuk Y.V., Podoltsev A.D., Gubanski S.M. Numerical simulation and experimental study of frequency-dependent dielectric properties of composite material with stochastic structure // IEEE Trans Dielect. Electr. Insul. – 2004. – V. 11. – P. 379–392.
7. Bruggeman D.A.G. Berechnung verschiedener physikalischer Konstanten von heterogenen Substanzen // Ann. Phys. Lpz. – 1935. – Bd. 24. – S. 636–679.
8. Тареев Б.М. Физика диэлектрических материалов. – М.: Энергоиздат, 1982. – 320 с.
9. Gefle O.S., Lebedev S.M., Chichikin V.I., Pokholkov Yu.P. Filled 0-3 composites for HV cables // Proc. 16th Nordic Insulation Symp. – 14–16 June 1999. – Copenhagen, Denmark, 1999. – P. 305–311.

УДК 537.521.7:621.315.6

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ РАЗРУШЕНИЯ ПММА В РЕЗКОНЕОДНОРОДНОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ ПО ТЕПЛОВЫМ ЭФФЕКТАМ

О.С. Гейфле, В.А. Волохин, С.М. Лебедев, Ю.П. Похолков*, Е.И. Черкашина*

НИИ высоких напряжений Томского политехнического университета

E-mail: polymer@hvd.tsk.ru

*Томский политехнический университет

Представлена феноменологическая модель прогнозирования начальной стадии разрушения полярных диэлектриков в резконеоднородном электрическом поле по тепловым эффектам. Оценены характеристики дендритообразования полиметилметакрилата при воздействии переменного напряжения промышленной частоты 50 Гц. Получено удовлетворительное согласие между результатами расчета и эксперимента.

Введение

Известно, что процесс разрушения твердых диэлектриков в резконеоднородном электрическом поле имеет дискретный во времени характер и включает додендритную (инкубационную) стадию, стадию развития разрушения и предпробивную стадию [1–5]. Предпробивная стадия завершается формированием канала высокой проводимости, замыкающего электроды, в результате чего происходит пробой диэлектрика. В [5–8] показано, что этот процесс сопровождается скачкообразным изменением перепада температуры на поверхности диэлектрика, который можно контролировать дистанционно, с помощью тепловизионных систем. На инкубационной стадии старения перепад температуры остается постоянным вплоть до зарождения дендрита. В полимерных диэлектриках зарождению дендрита предшествует появление так назы-

ваемой “области вырождения”, которая связывается с формированием микрополостей под действием различных факторов, таких как:

- эрозия материала под действием частичных разрядов [9–12];
- разрушение молекул полимера в результате их взаимодействия с инжектированными носителями заряда [13, 14];
- образование субмикротрещин под действием пондеромоторных сил [4, 15, 16];
- разрыв связей в молекулах полимера в результате нарушения термофлуктуационного равновесия [16–18].

Процесс формирования субмикротрещин, микрополостей и каналов неполного пробоя должен сопровождаться некоторым начальным уровнем частичных разрядов, вызывающих нагрев диэлектри-

ка за счет ионизационных потерь. В полярных полимерных диэлектриках возникают дополнительные потери энергии, обусловленные дипольно-релаксационной и миграционной поляризацией, последняя из которых нелинейно зависит от напряженности поля. По этой причине локальный перепад температуры на поверхности полярных диэлектрических материалов появляется раньше, чем зарождается дендрит [5, 7]. Это дает основание для разработки метода индивидуальной диагностики начальной стадии разрушения полимерных диэлектриков по тепловым эффектам, тем более, что в настоящее время существуют тепловизионные системы с температурным разрешением менее $0,1^\circ\text{C}$ [18].

В данной работе предложена феноменологическая модель для прогнозирования характеристик дендритообразования полиметилметакрилата (ПММА), который является полярным диэлектриком с аморфной структурой и используется в высоковольтной технике для изготовления опорных и проходных изоляторов и других изоляционных деталей.

Феноменологическая модель прогнозирования начальной стадии разрушения ПММА

Как уже отмечалось ранее, локальный перепад температуры на поверхности полярных диэлектриков для случая резконеоднородного внешнего поля появляется до зарождения дендрита, при этом мощность источника тепловыделения в области локального усиления поля может быть определена как [7]

$$P = \frac{4\pi\lambda\Delta T h}{1 - \operatorname{erf} x}, \quad \text{Вт}, \quad (1)$$

где λ , [Вт/м·град] – коэффициент теплопроводности материала; ΔT , $^\circ\text{C}$ – перепад температуры на поверхности диэлектрика; h , [м] – глубина залегания источника тепловыделения относительно поверхности диэлектрика, контролируемой тепловизором (рис. 1); $x=0,5/\sqrt{\text{Fo}}$; $\text{Fo}=a\tau/h^2$ – число Фурье; a , $[\text{м}^2/\text{с}]$ – коэффициент температуропроводности материала; τ , [с] – время от момента приложения напряжения к образцу до момента появления локального перепада температуры ΔT на поверхности диэлектрика; $\operatorname{erf} x$ – интеграл ошибок.

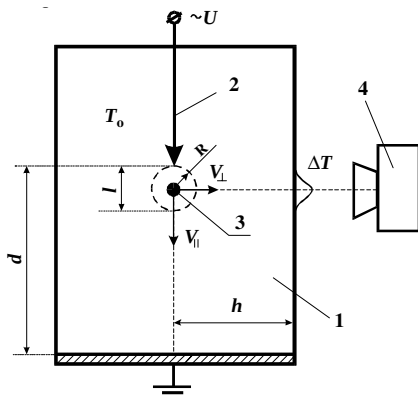


Рис. 1. Образец ПММА с точечным источником тепла: 1) образец; 2) электрод-острие; 3) точечный источник тепла радиусом R ; 4) тепловизор; U – переменное напряжение

Так как перепад температуры на инкубационной стадии старения диэлектрика остается постоянным вплоть до зарождения дендрита, то величина тока I , протекающего через диэлектрик, является постоянной величиной, т.е.:

$$I = P/U, \quad \text{А}, \quad (2)$$

где U , [В] – разность потенциалов между острием и плоским электродом.

Соответственно, линейная плотность мощности

$$P_l = E_l I, \quad \text{Вт/м}, \quad (3)$$

где E_l , [В/м] – напряженность поля на локальном участке диэлектрика, подвергающегося интенсивному старению на додендритной стадии.

С другой стороны

$$P_l = 4\pi\lambda T = 4\pi\lambda(T_0 + \Delta T), \quad (4)$$

где T_0 , $^\circ\text{C}$ – начальная температура образца, равная температуре окружающей среды.

Из (1–4) получаем:

$$E_l = \frac{U(1 - \operatorname{erf} x)T}{\Delta T h} = E_m(1 - \operatorname{erf} x), \quad \text{В/м}, \quad (5)$$

где $E_m = UT/\Delta Th$ – максимальная напряженность поля на локальном участке диэлектрика, ограниченного длиной $l = \Delta Th/T$.

Из (5) следует, что величина E_l является функцией U , l , T , ΔT и $\operatorname{erf} x$. Параметр x в интеграле ошибок определяется числом Фурье, имеющим смысл безразмерного времени и зависящим от температуропроводности материала, времени распространения тепла от источника тепловыделения до поверхности образца, контролируемой тепловизором, и глубины залегания источника тепла. Поэтому отношение E_m к E_l в (5) имеет физический смысл кинетического коэффициента неравномерности распределения поля k_l на локальном участке диэлектрика, подвергающегося старению на додендритной стадии, т.е.

$$k_l = 1/(1 - \operatorname{erf} x).$$

Перераспределение поля вблизи острия на додендритной стадии старения диэлектрика может происходить за счет различных факторов: накопления объемного заряда (ОЗ) вследствие инжекции носителей заряда из электрода или экстракции из диэлектрика [4, 13, 14], поляризации [16], нелинейного повышения проводимости в области локального усиления поля [19]. Кроме того, нами было установлено, что перераспределение поля может происходить за счет изменения показателя преломления вблизи острия под действием внутренних механических напряжений (рис. 2).

Перераспределение поля приводит к тому, что старение диэлектрика на локальном участке диэлектрика происходит при $E_l < E_m$, где E_m – максимальная напряженность электростатического поля на острие, которая для системы электродов “гиперболоид вращения – плоскость” определяется по формуле [20]:

$$E_m = 2U/r \ln(4d/r),$$

где r – радиус закругления острия; d – межэлектродное расстояние.

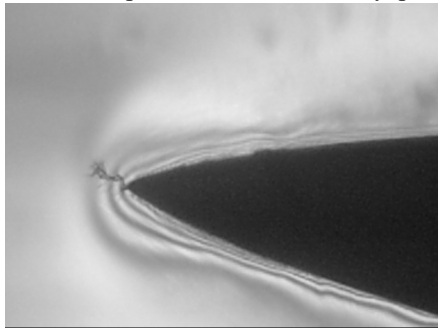


Рис. 2. Оптическая картина зарождения разрушения в ПММА при наличии внутренних механических напряжений: $U=25$ кВ; $r=5$ мкм; $d=15$ мм; $h=5$ мм

Для зарождения дендрита необходимо время, в течение которого на некотором расстоянии от острия должно произойти накопление критической плотности ОЗ. Это время должно зависеть от эффективной подвижности носителей заряда μ , которая является функцией E_l и скорости распространения теплового потока. Для случая резконеоднородного внешнего поля значение эффективной подвижности может быть определено по формуле:

$$\mu = \frac{h}{\tau E_l}, \text{ м}^2/\text{В}\cdot\text{с}. \quad (6)$$

Приведем (6) к безразмерному виду, введя коэффициент

$$\varkappa = (\mu/a)U, \quad (7)$$

Так как $E_l = U/l$, то с учетом (7) получаем

$$\varkappa = \frac{hl}{\tau a} \frac{U}{U_l} = (V_{\perp}/V_{\parallel})k_U,$$

где $V_{\perp} = h/\tau$ и $V_{\parallel} = a/l$, [м/с] – скорости распространения теплового потока в направлении, перпендикулярном и параллельном оси промежутка, соответственно (рис. 1); k_U – коэффициент, учитывающий неравномерность распределения разности потенциалов вдоль оси промежутка.

Если перенос носителей заряда происходит со скоростью распространения теплового потока, то коэффициент $\varkappa$ должен характеризовать преимущественное направление переноса заряда в процессе формирования каналов неполного пробоя. При преобладании $V_{\parallel}$ каналы неполного пробоя ориентируются вдоль оси промежутка (рис. 3, а), а $V_{\perp}$ – в перпендикулярном направлении (рис. 3, б).

В [21] было установлено, что время до зарождения дендритов обратно пропорционально величине локального коэффициента неоднородности поля. С учетом этого, и изложенных выше предположений, время появления “области вырождения” τ_e , характеризующее начало процесса разрушения диэлектрика, можно определить как

$$\tau_e = \tau/(k\varkappa) = [a\tau(1 - \operatorname{erf} x)]/(\mu U), \text{ с}.$$

Интервал времени, на котором начальный этап процесса разрушения завершается скачкообразным прорастанием дендрита

$$\Delta\tau = (\tau/\varkappa) - \tau_e = \tau \operatorname{erf} x/\varkappa, \text{ с}, \quad (8)$$



а)



б)

Рис. 3. Оптические картины начальной стадии зарождения дендритов в ПММА при преобладании: а) $V_{\parallel}$ и б) $V_{\perp}$. $U=25$ кВ; $r=5$ мкм; $d=15$ мм; $h=5$ мм

при этом время зарождения дендрита

$$\tau_s = \tau_e + \Delta\tau = \tau/\varkappa, \text{ с}, \quad (9)$$

Из (8) и (9) следует, что чем меньше $\operatorname{erf} x$ и больше $\varkappa$, тем меньше разница между τ_e и τ_s .

Для проверки модели были проведены исследования температурно-временных параметров процесса зарождения дендритов в ПММА в системе электродов острие-плоскость (методика эксперимента подробно описана в [8]) при воздействии переменного напряжения промышленной частоты 50 Гц при следующих экспериментальных условиях: $U=15...25$ кВ; $r=5...20$ мкм; $d=5...20$ мм; $h=2,8...5$ мм; $T_0=20,0...24,3$ °С. Результаты эксперимента и расчета характеристик дендритообразования представлены на рис. 4, а и б, из которых видно, что чем больше $k_{\perp} = 1/(1 - \operatorname{erf} x)$, уровень воздействующего напряжения U и эффективная подвижность теплового потока μ , тем меньше τ_e и τ_s . В диапазоне изменения максимальной напряженности электрического поля на острие от $2,8 \cdot 10^8$ до $1,6 \cdot 10^9$ В/м зависимости $\lg \tau_e = f(\eta)$, где $\eta = (1 - \operatorname{erf} x)/\varkappa = [(1 - \operatorname{erf} x)a]/(\mu U)$, и $\lg \tau_s = f(1/\varkappa)$ имеют различный угол наклона при $\eta \geq 3,8$ и $1/\varkappa \geq 15$, или $\varkappa \geq 0,0667$. Изменение угла наклона зависимости $\lg \tau_s = f(1/\varkappa)$ происходит при $U \geq 17,5$ кВ ($E_{\text{кр}} > 5 \cdot 10^8$ В/м), что при $\varkappa \geq 0,0667$ соответствует значению эффективной подвижности теплового потока $\mu \geq 3,96 \cdot 10^{-13}$ м²/В·с (рис. 4, б). Тогда при $\eta \geq 3,8$ (рис. 4, а) критическое значение локального коэффициента неоднородности поля $k_{\perp} \approx 4$, так как $(1 - \operatorname{erf} x)_{\text{кр}} \approx 0,25$. Это означает, что при $U > 17,5$ кВ, $k_{\perp} > 4$ и $\mu > 3,96 \cdot 10^{-13}$ м²/В·с интервал времени между появлением “области вырождения” и зарождением дендрита уменьшается, причем $\tau_e \rightarrow 0$ при

Таблица. Характеристики процесса дендритообразования ПММА на переменном напряжении промышленной частоты ($a=1,04 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$; $\lambda=0,18 \text{ Вт/м} \cdot \text{град}$)

Эксперимент			Расчет						Условия эксперимента
$\frac{\tau}{\Delta T} \text{ } ^\circ\text{C}$	$\tau_a, \text{ с}$	$\tau_s, \text{ с}$	$P, 10^{-3} \text{ Вт}$	$E, 10^8 \text{ В/м}$	$\mu, 10^{-13}, \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$	$1-\text{erf } x$	$\tau_a, \text{ с}$	$\tau_s, \text{ с}$	
$\frac{134}{0,20}$	900	2612	6,6	1,04	3,588	0,3436	890	2589	$U=15 \text{ кВ}$; $r=20 \text{ мкм}$; $d=5 \dots 10 \text{ мм}$; $h=5 \text{ мм}$; $E_m=(2,8 \dots 3,1) \cdot 10^8 \text{ В/м}$; $T_o=20 \text{ } ^\circ\text{C}$
$\frac{66}{0,12}$	105	540	7,7	0,89	8,5	0,1772	95	538	
$\frac{76}{0,13}$	159	800	7,0	0,97	6,786	0,2087	162	777	
$\frac{180}{0,20}$	2400	6320	5,5	1,25	2,215	0,4139	2332	5634	
$\frac{240}{0,20}$	5940	10560	4,7	1,45	1,433	0,4795	5567	11611	
$\frac{22}{0,20}$	16	120	8,4	1,63	8,376	0,1615	18	109	$U=25 \text{ кВ}$; $r=5 \text{ мкм}$; $d=10 \dots 20 \text{ мм}$; $h=3 \dots 3,8 \text{ мм}$; $E_m=(1,4 \dots 1,6) \cdot 10^8 \text{ В/м}$; $T_o=24 \text{ } ^\circ\text{C}$
$\frac{38}{0,35}$	94	305	8,3	1,66	4,762	0,2859	95	332	
$\frac{43}{0,30}$	170	535	6,5	2,13	3,273	0,3158	173	547	
$\frac{50}{0,25}$	165	518	7,1	1,93	3,637	0,2778	159	572	
$\frac{55}{0,20}$	178	676	6,6	2,08	3,322	0,2613	180	689	

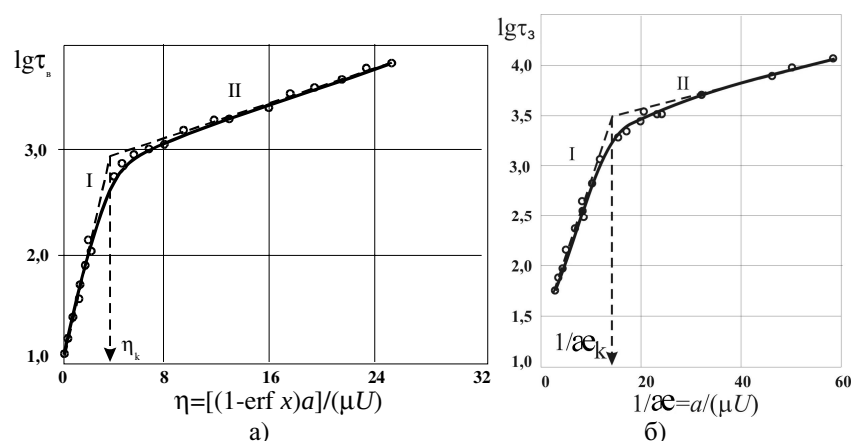


Рис. 4. Зависимости а) $\lg \tau_s = f(\eta)$ и б) $\lg \tau_s = f(1/ae)$ для ПММА при $E_m=(2,8 \dots 1,6) \cdot 10^8 \text{ В/м}$

$(1 - \text{erf } x) \rightarrow 0$. В этом предельном случае дендрит должен зарождаться непосредственно после приложения напряжения без инкубационной стадии старения. Этот случай возможен при больших уровнях перенапряжения, когда перераспределение электрического поля у острия не происходит и $k_f \rightarrow \infty$.

Для примера в таблице приведены результаты эксперимента и расчета характеристик дендритообразования ПММА при различных экспериментальных условиях.

Из таблицы видно, что расхождение между экспериментальными и расчетными значениями τ_a и τ_s не превышает 15 %, что находится в пределах погрешности определения параметров ΔT , h , τ и U .

Отметим, что погрешность расчета может быть уменьшена за счет применения тепловизионных систем с охлаждаемым приемником излучения с температурным разрешением менее $0,1 \text{ } ^\circ\text{C}$ и углом мгновенного визирования менее $1,3 \text{ мрад}$.

Заключение

1. Предложена феноменологическая модель прогнозирования характеристик дендритообразования ПММА по тепловым эффектам. Модель позволяет осуществлять индивидуальную диагностику начальной стадии разрушения полярных полимерных диэлектриков. Расхождение между экспериментальными и расчетными значениями временных характеристик дендритообразования не превышает 15 %.
2. Время формирования начальной стадии разрушения и время зарождения дендритов в ПММА зависят от локального коэффициента неоднородности поля, обусловленного временным перераспределением объемного заряда вблизи острия, эффективной подвижности теплового потока и разности потенциалов между электродами.
3. При больших уровнях перенапряжения и $k_f \rightarrow \infty$ зарождение дендрита должно происходить непосредственно после приложения напряжения без инкубационной стадии старения диэлектрика.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Вершинин Ю.Н. Электрический пробой твердых диэлектриков. – Новосибирск: Наука, 1968. – 210 с.
- Mosh W., Pilling J. Tschacher B. Kanaleinsatzzeit und Durchschlagzeit zur Beurteilung des Langzeitverhaltens von Feststoff // *Elektrie*. – 1972. – Н. 11. – С. 312–319.
- Shibuya Y., Zoledriowski S., Calderwood I.H. Void formation and electrical breakdown in plastic insulators // *IEEE Trans. Power Appar. and Syst.* – 1977. – V. PAS-96. – № 1. – P. 198–207.
- Ушаков В.Я. Электрическое старение и ресурс монолитной изоляции. М.: Энергоатомиздат, 1988. – 152 с.
- Гефле О.С. Разработка метода диагностики зарождения и развития разрушений в электрической изоляции по тепловым эффектам: Дис. ... канд. техн. наук. – Томск. 1984. – 234 с.
- Гефле О.С. Применение тепловизионного метода для диагностики состояния изоляции высоковольтных конструкций // *Электричество*. – 1986. – № 4. – С. 58–59.
- Гефле О.С. Оценка интегрального перепада температуры на начальной стадии разрушения полимерных диэлектриков в сильном электрическом поле // *Электричество*. – 1988. – № 6. – С. 84–88.
- Гефле О.С., Черкашина Е.И. Диагностика предпробивного состояния полимерных диэлектриков по тепловым эффектам // *Известия Томского политехнического университета*. – 2005. – Т. 308. – № 1. – С. 54–59.
- Nawata M., Kawamura H., Ieda M. Voltage and temperature dependences of treeing breakdown in organic solid insulations // *Elect. Eng. Jap.* – 1971. – V. 91. – P. 109–115.
- Кучинский Г.С. Частичные разряды в высоковольтных конструкциях. – Л.: Энергия: Ленинград. отд., 1979. – 224 с.
- Brakermann H. Zündvolumina inhomogen beanspruchter Feststoffisolationen // *Bull. Schweiz. Elektrotechn. Ver.* – 1977. – V. 68. – S. 595–599.
- Zoledriowski S., Sakata S., Shibuya Y., Calderwood I.H. Study of electrical treeing in epoxy resin using electro-optical methods // *3rd Intern. Symp. High Volt. Eng.* – Milan, Italy, 1979. – V. 1. – P. 1–4.
- Tanaka T., Greenwood A. Effect of charge injection and extraction on tree initiation in polyethylene // *IEEE Trans. Power Appar. and Syst.* – 1978. – V. 97. – № 5. – P. 1749–1757.
- Tanaka T. Space charge injected via interfaces and tree initiation in polymers // *IEEE Trans. on Dielectr. Electr. Insul.* – 2001. – V. 8. – № 5. – P. 713–743.
- Auckland D.W., McNicol A.A., Varlow B.R. Development of strain in solid dielectric due to vibrational electrostatic forces // *J. Phys. D: Appl. Phys.* – 1990. – № 23. – P. 1608–1613.
- Crine J-P. Relations between aging, space charge and polarization of polyethylene // *Intern. Conf. on Solid Dielectrics*. – July 5–7, 2004. – Toulouse, France, 2004. – P. 280–283.
- Дмитревский В.С. Расчет и конструирование электрической изоляции. – М.: Энергоиздат, 1981. – 392 с.
- Вавилов В.П. Тепловые методы неразрушающего контроля: Справочник. – М.: Машиностроение, 1991. – 240 с.
- Boggs S.A. Theory of a defect-tolerant dielectric system // *IEEE Trans. Electr. Insul.* – 1993. – V. 28. – P. 365–370.
- Mason J.H. Breakdown of solid dielectrics in divergent fields // *Proc. IEE.* – 1955. – V. 102C. – P. 254–263.
- Гефле О.С., Ушаков В.Я. Метод определения “кривых жизни” монолитной полимерной изоляции // *Электричество*. – 1985. – № 8. – С. 65–67.

УДК 621.315.6

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ИЗОЛЯЦИИ ИЗ ПОЛИКАРБОНАТНЫХ СМОЛ

С.М. Лебедев, В.А. Волохин, Б.В. Шмаков, П.А. Матин

НИИ высоких напряжений Томского политехнического университета

E-mail: polymer@hvd.tsk.ru

Представлены результаты, полученные при отработке технологии и изготовлении высоковольтной изоляции из поликарбонатных смол методом длительной выдержки в расплаве. Разработанная уникальная технология позволяет изготавливать монолитные крупногабаритные изделия и заготовки из поликарбонатов.

Введение

Лаборатория “Полимер” НИИ высоких напряжений традиционно в течение более 30 лет занимается разработкой технологий и изготовлением монолитной крупногабаритной полимерной изоляции для высоковольтного электрофизического и электротехнического оборудования. За эти годы была разработана технология изготовления [1–3] крупногабаритных изоляционных изделий из термопластов: полиэтилена низкой и высокой плотности (ПЭНП и ПЭВП), полипропилена (ПП) и его сополимеров, полистирола (ПС) и др. Основными преимуществами разработанной технологии являются:

- возможность изготовления цельнолитых изделий различной формы;
- отсутствие дефектов, трещин, газовых и усадочных раковин;
- низкие остаточные механические напряжения;
- возможность изготовления изделий различной формы с закладными металлическими деталями;
- возможность изготовления малых партий и единичных опытных изделий с низкими удельными затратами;
- отсутствие необходимости в дорогостоящих пресс-формах.