

дели, проведено ее параметрическое исследование. Выяснено, что возникающие в ходе превращения напряжения и деформации играют существенную

роль в динамике процесса. Показано влияние условий нагружения на протекание химического превращения в пластине.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Болдырев В.В. Механохимия и механическая активация твердых веществ // Известия АН СССР. Сер. хим. — 1990. — № 10. — С. 2228–2245.
2. Болдырев В.В., Чупахин А.П., Сидельников А.А. Влияние возникающих при твердофазных превращениях механических напряжений на их кинетику. I. Общий подход // Известия СО АН СССР. Сер. хим. наук. — 1985. — Т. 17. — № 6. — С. 31–38.
3. Подлесов В.В., Радугин А.В., Столин А.М., Мержанов А.Г. Технологические основы СВС-экструзии // Инженерно-физический журнал. — 1992. — Т. 63. — № 5. — С. 525–537.
4. Овчаренко В.Е., Лапшин О.В., Боянгин Е.Н., Рамазанов И.С., Чудинов В.А. Высокотемпературный синтез интерметаллического соединения Ni_3Al под давлением // Известия вузов. Цветная металлургия. — 2007. — № 4. — С. 63–69.
5. Бутягин П.Ю. Проблемы и перспективы механохимии // Успехи химии. — 1994. — Т. 63. — № 12. — С. 1031–1043.
6. Эмануэль Н.М., Кнорре Д.Г. Курс химической кинетики. — М.: Высшая школа, 1984. — 463 с.
7. Князева А.Г. Зажигание конденсированного вещества горячей пластиной с учетом термонапряжений // Физика горения и взрыва. — 1992. — Т. 28. — № 1. — С. 13–18.
8. Теребушко О.И. Основы теории упругости и пластичности. — М.: Наука, 1984. — 319 с.
9. Боли Б., Уэйнер Дж. Теория температурных напряжений. — М.: Мир, 1964. — 517 с.
10. Роуч П.Дж. Вычислительная гидродинамика. — М.: Мир, 1980. — 616 с.
11. Самарский А.А. Введение в теорию разностных схем. — М.: Наука, 1971. — 552 с.
12. Физические величины: Справочник / А.П. Бабичев, Н.А. Бабушкина, А.М. Братковский и др.; под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. — М.: Энергоатомиздат, 1991. — 1232 с.
13. Лыков А.В. Теория теплопроводности. — М.: Высшая школа, 1967. — 599 с.
14. Браун М., Доллимор Д., Галвей А. Реакции твердых тел. — М.: Мир, 1983. — 359 с.

Поступила 20.10.2009 г.

УДК 621.3.048.1

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ТЕОРИИ СТАРЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ИЗОЛЯЦИИ ЖУРКОВА–ДМИТРЕВСКОГО

Б.С. Бояршинов, Г.И. Хожайнова*

Московский государственный гуманитарный университет

*Московский государственный открытый университет

E-mail: boyarshinov_b_s@mail.ru

Изложены результаты экспериментов по исследованию сроков службы эпоксидной изоляции при различных температурах и после ионизирующего облучения. Экспериментальные данные интерпретированы с позиций термофлуктуационной теории. С помощью метода максимума правдоподобия получены параметры модели разрушения изоляции, в том числе: объём и концентрация неоднородностей, период колебаний атомов в углеродной цепочке. Использование математической обработки в предположении справедливости термофлуктуационной теории Журкова–Дмитревского позволило приблизить экспериментальные вариационные ряды с точностью не хуже 4...10 %.

Ключевые слова:

Термофлуктуационная теория, теория старения, динамика старения, модель разрушения изоляции, эпоксидная изоляция.

Key words:

Thermo-fluctuation theory, ageing theory, dynamics of ageing, destruction of isolation model, epoxy isolation.

Настоящая работа посвящена экспериментальной проверке термофлуктуационной теории Журкова–Дмитревского [1, 2] на примере разрушения под нагрузкой образцов эпоксидной изоляции.

В рамках настоящей работы проведены 27 серий экспериментов с выборками образцов эпоксидной изоляции объёмом от 31 до 89 образцов. Объём нагруженной части образца составлял от 50 до 220 мм³ и в пределах серии поддерживался постоянным. Для исключения появления в эпоксид-

ной изоляции газовых включений перед отверждением эпоксидная изоляция выдерживалась 20 мин. при давлении 100 Па и температуре 353 К. Подвергнутые испытаниям образцы были выполнены из компаунда на основе эпоксидной диановой смолы ЭД-16. Электрические испытания проводились на образцах, имеющих форму блоков с залитыми электродами. Система электродов цилиндр-плоскость. Электроды были покрыты демпфирующим слоем из полупроводящей резины. Напряжённость

переменного электрического поля составляла 70...90 % от пробивного.

Эксперименты проводились при температурах от 77 до 353 К. Для достижения температуры 77 К образец погружался в жидкий азот и выдерживался до наступления температурного равновесия. Эксперименты при 173 К проводились с образцами, охлаждаемыми парами азота. Испытания при температурах выше 293 К проводили с использованием высокотемпературного термостата. В некоторых сериях образцы были подвергнуты облучению протонами с энергией 10 МэВ до доз $10^6 \dots 10^7$ Гр. В экспериментах фиксировалось время до разрушения образцов.

Полученные для каждой партии образцов вариационные ряды были подвергнуты математической обработке с помощью метода максимума правдоподобия. В процессе обработки определялись параметры термофлуктуационной модели Журкова–Дмитревского, при которых она наиболее точно описывает экспериментальные вариационные ряды.

Было использовано следующее математическое представление модели. Время до начала разрушения τ определяется выражением:

$$\tau = \tau_0 e^{\frac{D\varphi(x)}{2kT}},$$

где τ_0 – период собственных колебаний химической связи углерод–углерод в полимерной цепочке; D – энергия диссоциации этой связи; k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура.

Функция $\varphi(x)$ определяется следующими формулами:

$$\begin{aligned}\varphi(x) &= \sqrt{1 - \frac{2}{x}} - \frac{1}{x} \ln \left(x - 1 + x \sqrt{1 - \frac{2}{x}} \right); \\ x &= C \left[\frac{1}{g^*} + Z \left(1 - \frac{1}{g^*} \right) \right]; \\ C &= \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{AE}{De^{bT}} \right)^2 + \left(\frac{\gamma\sigma}{D} \right)^2}};\end{aligned}$$

где E – напряжённость электрического поля; σ – механическое напряжение; A , b , γ – зависящие от структуры коэффициенты; g^* – относительная электрическая проводимость неоднородности.

Величина Z зависит от y – соотношения размеров неоднородности в направлении приложенного к образцу внешнего поля и в направлении, перпендикулярном действию поля, следующим образом:

$$Z = \begin{cases} 1; & \text{если } y = 0; \\ \frac{1}{1 - y^2} + \frac{y \cdot \operatorname{arth} \left(\frac{\sqrt{y^2 - 1}}{y} \right)}{(y^2 - 1)\sqrt{y^2 - 1}}; & \text{если } y \in (0; 1) \cup (1; \infty); \\ \frac{1}{3}; & \text{если } y = 1. \end{cases}$$

Легко показать, что функция $Z(y)$ непрерывна со всеми своими производными при любых положительных значениях аргумента.

Величина y является случайной и имеет в теории Журкова–Дмитревского следующую функцию распределения:

$$F(y) = \left(1 - e^{-\frac{a_1}{y}} \right)^{\frac{a_2}{y}};$$

здесь $a_1 = \ln(0,65) - 5 \ln(\sqrt[3]{N_H V_H})$; $a_2 = N_H V_O / \eta$; V_H – объём неоднородности; V_O – объём образца; N_H – количество неоднородностей на единицу объёма образца; η – коэффициент неоднородности поля (электрического или поля механических напряжений).

В таких обозначениях логарифм времени до разрушения образца $\ln \tau = \ln \tau_0 + \frac{D\varphi(x)}{2kT}$ подчиняется следующей функции распределения:

$$F(\ln \tau) = 1 - F(y).$$

Следовательно, плотность распределения величины $\ln \tau$ имеет следующий вид;

$$p(\ln \tau) = - \frac{dF(y)}{dy} \frac{dy}{dz} \frac{dz}{dx} \frac{dx}{d(\ln \tau)}.$$

В экспериментах были получены вариационные ряды, т. е. последовательности времён до разрушения образцов: $\{\tau_i\}$, где i – номер образца в серии. Функция правдоподобия для серии образцов имела вид:

$$L(\tau_0; C; a_1; a_2; g^*) = \sum_{i=1}^n \ln [p(\ln \tau_i)].$$

Функция правдоподобия зависит от пяти коэффициентов, которые можно определить, найдя максимум функции правдоподобия в пятимерном гиперпространстве. Вычисления проводились на высокопроизводительном компьютере и требовали большого времени вычислений. Для реализации расчётов была специально разработана программа оптимизации градиентным методом. Полученные таким методом параметры позволяли описать динамику старения изоляции (вероятность её выхода из строя) с относительной погрешностью 4...10 %.

В процессе поиска максимума функции правдоподобия, в частности, варьировались показатели: период собственных колебаний углерод–углеродной связи в полимерной цепочке, и коэффициенты a_1 и a_2 . Из соотношения этих коэффициентов при известных значениях объёма образца V_O и коэффициента неоднородности поля η можно определить количество неоднородностей в единице объёма N_H и объём неоднородностей V_H :

$$\begin{aligned}N_H &= \frac{a_2 \eta}{V_O}; \\ V_H &= \frac{\sqrt[5]{0,65^3 e^{-0,6a_1}}}{N_H}.\end{aligned}$$

Для всех серий экспериментов период колебаний составил $(1 \pm 0,2) \cdot 10^{-13}$ с. Это соответствует периоду собственных колебаний химической связи между атомами углерода в полимерной цепочке.

Концентрация дефектов в необлучённых образцах при 296 К составила 10^{13} м^{-3} , а их размер составлял около 2 мкм. После облучения объём неоднородностей увеличивался в 4...5 раз. Это может быть объяснено накоплением продуктов радиолитического разложения в районе неоднородностей.

Динамика старения образцов эпоксидной изоляции при 77 К одинаково хорошо может быть объяснена двумя способами. Во-первых, изменение динамики старения можно объяснить появлением дополнительных механических напряжений действующих в районе неоднородностей (уменьшение коэффициента ν). Причём уровень этих ло-

кально действующих напряжений в два раза превышает предел прочности массивных образцов изоляции при нормальных условиях. Столь же успешно изменение динамики старения при азотной температуре объясняется появлением малоразмерных (5 нм) неоднородностей в количестве 10^{18} м^{-3} . При этом суммарный объём неоднородностей возрастал более чем в четыре раза. Оба варианта объяснения соответствуют появлению внутренних напряжений в охлаждённом образце.

Основным результатом нашей работы является корректное (с точки зрения математических методов обработки результатов измерений) доказательство справедливости термофлуктуационной теории Журкова–Дмитревского: экспериментальные вариационные ряды были приближены с точностью не хуже 4...10 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дмитриевский В.С. Расчёт и конструирование электрической изоляции. – М.: Энергоиздат, 1981. – 392 с.
2. Дмитриевский В.С. Единая теория разрушения материалов и конструкций // Становление и развитие научных исследова-

ний в высшей школе: Сб. трудов Междунар. научной конф., посвящённой 100-летию со дня рождения профессора А.А. Воробьёва. – Томск, 2008. – Т. 1. – С. 326–331.

Поступила 15.01.2010 г.

УДК 535-3:53.083

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК K₂Cr₂O₇-ЭКСИЛАМП БАРЬЕРНОГО РАЗРЯДА

Э.А. Соснин^{1,2}, С.М. Авдеев¹, М.В. Ерофеев¹, В.М. Цветков³, А.А. Пикулев³, В.Ф. Тарасенко^{1,2}

¹Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск

E-mail: badik@loi.hcei.tsc.ru

²Томский государственный университет

³Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, г. Саров

E-mail: pikulev@exptd.vniief.ru

Для верификации данных об энергетических характеристиках K₂Cr₂O₇-эксилламп барьерного разряда различными способами и в различных условиях возбуждения проведены измерения мощности и эффективности излучения. Показано, что величины эффективности излучения K₂Cr₂O₇-эксилламп в исследованных условиях не превышают 7 %.

Ключевые слова:

Барьерный разряд, K₂Cr₂O₇-эксиллампа, эффективность излучения.

Key words:

Dielectric barrier discharge, K₂Cr₂O₇-excilamp, radiation efficiency.

Среди эксилламп с точки зрения практического применения одной из наиболее привлекательных ламп является лампа барьерного разряда на молекуле K₂Cr₂O₇* [1]. Типичный спектр такой лампы представляет собой интенсивную полосу В–Х молекул K₂Cr₂O₇* с максимумом на $\lambda = 222$ нм и полушириной $\Delta\lambda_{1/2} \sim 1,7$ нм. В одной из первых обзорных работ (1991 г.), посвященных барьерному разряду, было указано, что во многих случаях эффективность излучения эксилламп на полосах В–Х эксиплексных молекул лежит в диапазоне от 5 до 10 %, но конкретные данные об условиях получения этих вели-

чин приведены не были [2]. Полученные разными авторами впоследствии величины эффективности η отличаются в несколько раз [3–10], а данные об условиях, в которых они были достигнуты, не всегда полны и почти отсутствуют сведения о методиках измерений (табл. 1). Или, напротив, подробно даётся методика измерений без описания условий получения эксиплексной люминесценции [10].

Поэтому к настоящему времени актуальной с практической точки зрения является задача достоверного определения величины эффективности излучения, задающей предельные возможности тех-