

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

УДК 541.64:539.3

## МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ТРЕЩИН «СЕРЕБРА»

Белый М. У., Двойненко М. М., Конончук Г. Л.

Предложен новый метод определения толщины трещин «серебра», основанный на измерении коэффициента отражения. При этом принимается, что показатель преломления тонкого слоя, содержащего микротрещины, меньше, чем основного материала. Метод проиллюстрирован на примере ПММА.

Под действием напряжений во многих стеклообразных и в некоторых кристаллических полимерах образуются трещины «серебра» [1]. По внешнему виду они напоминают известные очень тонкие трещины в неорганических материалах типа керамики. Однако в отличие от обычных (гриффитовых) трещин материал в направлении, нормальному к трещинам, представляет собой систему тяжей, деформированных под действием напряжений. Прочность полимерных материалов, по-видимому, зависит от размеров и структуры трещин [2]. Разрушение полимерных материалов происходит, как правило, на той их части, где уже имеются трещины серебра. Об этом свидетельствуют и данные фрактографии [2].

Размеры и структуру трещин серебра изучают электронно-микроскопическим [2, 3] и интерференционным [4, 5] методами, а также с помощью рассеяния рентгеновских лучей [6]. В настоящей работе предлагается новый подход к изучению образования и роста трещин серебра в стеклообразных полимерах и приводятся результаты применения метода к ПММА. Суть метода заключается в том, что трещины серебра можно представить в виде тонкой пленки, помещенной в основной материал. Так как показатель преломления пленки меньше показателя преломления основного материала, при прохождении света из основного материала через нее будет иметь место нарушенное полное внутреннее отражение (оптический туннельный эффект) [7]. Энергетический коэффициент отражения  $R$  от пленки зависит от угла падения и ее толщины и для поляризации света, лежащей в плоскости падения, может быть определен из соотношения [8]

$$R = \frac{\exp(2b) + \exp(-2b) + 2 \cos(\varphi_1 + \varphi_2)}{\exp(2b) + \exp(-2b) + 2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2)}, \quad (1)$$

где  $b = \frac{2\pi}{\lambda} h \sqrt{n_1^2 \sin^2 \theta - n_2^2}$ ,  $h$  – толщина пленки,  $\lambda$  – длина волны света в вакууме,  $n_1$  – показатель преломления основного материала,  $n_2$  – показатель преломления пленки,  $\theta$  – угол падения, а  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  определяются из уравнений

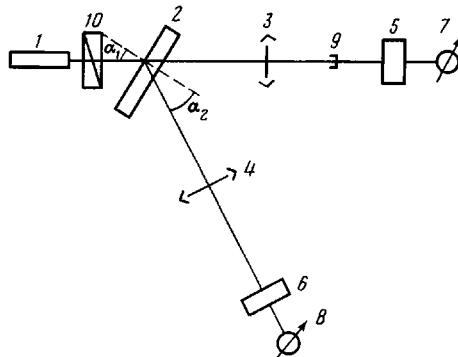
$$\exp(i\varphi_1) = \frac{n_1 \cos \theta - i \sqrt{n_1^2 \sin^2 \theta - n_2^2}}{n_1 \cos \theta + i \sqrt{n_1^2 \sin^2 \theta - n_2^2}} \quad (2)$$

$$\exp(i\varphi_2) = \frac{-n_1 \cos \theta + i \sqrt{n_1^2 \sin^2 \theta - n_2^2}}{n_1 \cos \theta + i \sqrt{n_1^2 \sin^2 \theta - n_2^2}} \quad (3)$$

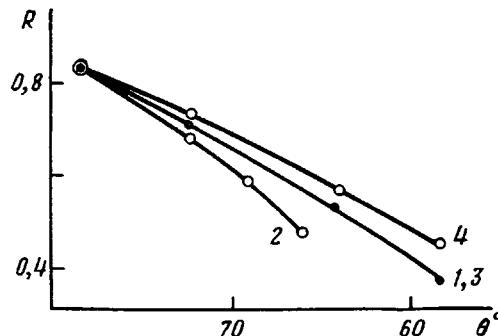
Пользуясь соотношениями (1)–(3), можно показать, что

$$R = \frac{\exp(2b) + \exp(-2b) - 2}{\exp(2b) + \exp(-2b) - 2 \cos \left\{ 2 \operatorname{arctg} \left( \frac{n^2 \cos 2\theta + 1}{2n \cos \theta \sqrt{n^2 \sin^2 \theta - 1}} \right) \right\}}, \quad (4)$$

где  $n = n_1/n_2$ . Пользуясь формулой (4), можно определить толщину пленки, причем наиболее благоприятным является случай  $h/\lambda < 1$ .



Выше представлена схема эксперимента. Параллельный пучок света от He – Cd лазера 1 падал на образец 2 из промышленного ПММА, который содержал трещины серебра, образованные под действием растягивающей нагрузки. Наблюдаются два пучка света, выходящих из образца: рассеянный в прямом направлении и отраженный от трещин. Углы  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  равны по определению. Рассеянный в обоих каналах свет собирается линзами 3 и 4 и проецируется на фотоприемники 5, 6. Интенсивность прошедшего и отраженного света измерялась индикаторами 7, 8. Свет прямого пучка, не рассеянный на трещинах, был отсечен диафрагмой 9, находящейся в фокальной плоскости линзы 3. Поляризация света устанавливалась с помощью поляриоида 10. Трещины образовывались на поверхности. Плоскости трещин серебра



Зависимость коэффициента отражения  $R$  от угла падения  $\theta$  на трещинах серебра: 1 – экспериментальная зависимость (значения изображены точками); 2–4 – теоретические зависимости при  $n_2=1,35$ ,  $h/\lambda=0,42$  (2);  $n_2=1,25$ ,  $h/\lambda=0,28$  (3);  $n_2=1$ ,  $h/\lambda=0,17$  (4)

перпендикулярны оси деформации. Параллельность плоскостей трещин проверяли измерением индикаторы рассеяния отраженного пучка: более чем в 90% случаев угол между плоскостями трещин серебра составляет  $<5^\circ$ .

В эксперименте измеряли интенсивность прошедшего и отраженного света, на их основе вычисляли коэффициент отражения от трещин серебра. Исследования проводили при различных углах падения  $\theta$  с целью однозначного определения параметров  $h$  и  $n_2$ . На рисунке представлены экспериментальная 1 и три теоретические 2–4 зависимости  $R$  от  $\theta$ . Теоретические зависимости найдены для случаев различных показателей преломления материала трещин серебра. Толщину трещин в теоретических зависимостях выбирали так, чтобы величина коэффициента отражения  $R$  совпадала с экспериментальным значением при  $\theta=78^\circ$ . Из рисунка видно, что теоретическая зависимость 3 хорошо аппроксимирует экспериментальный график. Коэффициент отражения был определен с точностью 10%. Анализ формулы (4) показывает, что показатель преломления материала трещин серебра может быть определен с точностью 2%. Следовательно, средняя толщина трещин в ПММА, определенная таким образом, равна  $0,13 \pm 0,01$  мкм. При измерениях следует иметь в виду, что средняя толщина трещин зависит от условий деформирования.

Таким образом, данный метод позволяет определить среднюю толщину трещины серебра оперативно и при меньших затратах, чем в других методах. Преимуществом метода является также простота при изучении механических характеристик в процессе деформации.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бессонов М. И. // Успехи физ. наук. 1964. Т. 83. № 1. С. 107.
2. Берри Дж. П. // Разрушение/Под ред. Ливовица Г. Т. 7. Ч. II. М., 1976. С. 7.
3. Michler G. H. // Colloid and Polymer Sci. 1985. V. 263. № 6. P. 462.

4. Бессонов М. И., Кувшинский Е. В. // Физика твердого тела. 1961. Т. 3. № 2. С. 607.
5. Döll W., Könczol L. // Polymer. 1983. V. 24. № 9. P. 1213.
6. Westrock Paul A. // J. Polymer Sci. Polymer Phys. Ed. 1983. V. 21. № 6. P. 969.
7. Харрик Н. Спектроскопия внутреннего отражения. М., 1970. 335 с.
8. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. 2-е изд. М., 1973. 719 с.

Киевский государственный  
университет им. Т. Г. Шевченко

Поступила в редакцию  
26.VI.1987

## THE METHOD OF THE STUDY OF «SILVER» CRACKS

Belyi M. U., Dvoinenko M. M., Kononchuk G. L.

### Summary

The new method of determination of the «silver» cracks thickness is proposed based on measuring of the reflection coefficient. The refraction index of the thin layer containing crazes is assumed to be lesser than that of the main material. The method has been applied to PMMA.

УДК 541.64

## ВОЛНОВОДНАЯ РЕФРАКТОМЕТРИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ ПЛАНАРНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ СТРУКТУР

Сухов В. М., Рудой В. М.

Исследована возможность использования метода волноводной рефрактометрии для определения показателей преломления и толщин отдельных слоев многослойной пленочной системы. Для симметричной трехслойной пленки получены дисперсионные соотношения, предложен и реализован численный алгоритм поиска оптимальных значений параметров каждого слоя. Работоспособность развитого подхода подтверждена экспериментально на тест-системе ПВХ – ПЭ – ПВХ.

Многие физико-химические процессы, протекающие в полимерах, в определенных условиях приводят к ступенчатому изменению состава и свойств по толщине образца. Такая ситуация может реализоваться, например, при галогенировании [1] и радиационном окислении [2] полимеров, при их модификации прививкой [3].

Количество неразрушающих экспериментальных методов, с помощью которых исследуется формирование подобных слоистых структур, весьма ограничено [1]. В случае пленочных образцов для этих целей в принципе может быть использована волноводная рефрактометрия [4, 5], позволяющая находить распределение (профиль) показателя преломления  $n$  по их сечению. Однако если восстановление из данных волноводной рефрактометрии плавно меняющегося профиля  $n$  – хорошо разработанная процедура [6, 7], то для ступенчатого профиля соответствующий математический аппарат не создан. Поэтому в настоящей работе были поставлены следующие задачи: получить для достаточно общего случая пятислойного симметричного волновода (свободной симметричной трехслойной пленки) дисперсионные соотношения, связывающие показатели преломления  $n_j$  и толщины  $d_j$  отдельных слоев с его волноводными характеристиками; выбрать и реализовать на ЭВМ численный метод их решения; экспериментально проверить работоспособность развитого подхода на модельной полимерной системе.

Из теории распространения электромагнитных волн в слоистой среде [8] следует, что каждый непоглощающий диэлектрический слой может быть описан характеристической матрицей вида

$$M_j = \begin{pmatrix} \cos \Phi_j & -\frac{i}{\gamma_j} \sin \Phi_j \\ -i\gamma_j \sin \Phi_j & \cos \Phi_j \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где  $\Phi_j = d_j \alpha_j$  – фазовая толщина слоя;  $\alpha_j = k \sqrt{n_j^2 - N^2}$ ;  $N$  – модовый показатель преломления;  $k = 2\pi/\lambda$  – модуль волнового вектора в вакууме;  $\lambda$  – длина волны электромагнитного излучения в вакууме;

$$\gamma_j = \begin{cases} \alpha_j & \text{для TE-поляризации (электрический вектор поляризованной} \\ & \text{электромагнитной волны перпендикулярен плоскости падения)} \\ \frac{\alpha_j}{n_j^2} & \text{для TM-поляризации (то же самое для магнитного вектора)} \end{cases}$$