

УДК 541.64:539.3

**РАСПРОСТРАНЕНИЕ ТРЕЩИНЫ В СТЕКЛООБРАЗНЫХ
ПОЛИМЕРНЫХ ПЛЕНКАХ**

*Берлин А.Л. Ал., Гринева Н.С., Алексанян Г.Г.,
Сафонов Г.П.*

Изучены геометрические размеры зоны пластичности, возникающей при испытании образцов с искусственным боковым надрезом на пленках полиарилата на основе дифенилолпропана и эквимольной смеси изофталевой и терефталевой кислот. Результаты сопоставлены с исследованием тех же пленок на образцах без надреза. Получены критерии разрушения при стабильном росте трещины.

Хорошо известно, что во многих случаях при приложении внешней нагрузки к образцу с искусственным надрезом на продолжении надреза возникает зона пластической деформации. Причем это явление характерно не только для полимеров, но и для других материалов, например, для металлов.

В случае одноосного растяжения образцов существует два предельных состояния — плосконапряженное (для тонких пленок) и плоскодеформационное (для толстых образцов). Был проведен анализ явлений, происходящих при одноосном растяжении образцов стеклообразного полимера с постоянной скоростью движения зажимов для плосконапряженного состояния.

В качестве объекта исследования выбран аморфный стеклообразный полиарилат (ПАР) на основе дифенилолпропана и эквимольной смеси изофталевой и терефталевой кислот в виде промышленных пленок, которые получены поливом из раствора хлористого метилена на твердую поверхность при 333 К; $M_n=20\,000$, $M_w=157\,000$, $T_c=463$ К, толщину пленки варьировали от 20 до 100 мкм.

Работы, посвященные экспериментальному изучению формы и размеров зоны пластичности на тонких образцах, т. е. в условиях плосконапряженного состояния, немногочисленны [1–3]. На примерах образцов с надрезом для ПВХ и поликарбоната в них представлены результаты по исследованию длины зоны пластичности, в той или иной степени соглашающиеся с моделью Дагдейла — Баренблатта, которая описывает процесс предварительного деформирования образцов, но не предсказывает процесс разрушения. Кроме того, в работах [2, 3] показано, что для отожженных пленок поликарбоната зона пластичности носит диффузный характер — ее границы размыты, а для отожженных образцов они резко очерчены. Однако объяснения этому явлению авторы не нашли.

Процессы пластического деформирования и разрушения изучали на образцах с надрезом и без него. Образцы представляли собой полоску шириной 15 мм, с длиной рабочей части 20 мм; по середине одной из кромок в направлении, перпендикулярном направлению растяжения, лезвием бритвы наносили надрез, величину которого варьировали от 1 до 3 мм; образцы без надрезов представляли собой лопатки с длиной рабочей части 20 мм и шириной 5 мм.

Для исследованного полиарилата наблюдали характерную особенность: исходные пленки ПАР деформировались макрооднородно по всей рабочей части образца вплоть до разрушения, и на диаграммах напряжение — деформация ($\sigma-\varepsilon$) не появлялся пик текучести; отожженные пленки ПАР (температура отжига 423 К в течение 30 мин) деформировались макро-

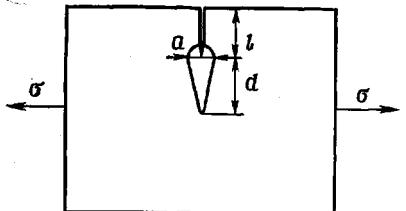


Рис. 1. Схематическое изображение зоны пластической деформации, возникающей вдоль надреза при приложении одноосного растягивающего напряжения: l — длина надреза; d — длина зоны пластической деформации; a — максимальная ширина зоны пластической деформации при определенном значении приложенного напряжения

однородно по полосам сдвига с образованием шейки, и на диаграмме $\sigma - \epsilon$ возникал пик текучести. Это явление подробно описано в работе [4].

Особенность изученных пленок ПАР проявилась и на образцах с искусственным концентратором напряжения. На отожженных пленках при приложении нагрузки вдоль надреза возникала хорошо видимая в поляризованном свете зона пластической деформации с резко очерченными границами (рис. 1). Для исходных пленок ПАР зона пластичности не была видна, хотя перенапряжения у вершины трещины были обнаружены.

Испытания образцов проводили в режиме переменной нагрузки, но постоянной скорости движения зажимов. За изменением размеров надреза и зоны пластической деформации во время опыта следили с помощью поляризационного микроскопа МБС-2.

Для исследованных образцов длина d зоны пластичности изменялась в зависимости от величины искусственного надреза и приложенного напряжения согласно уравнению типа Дагдейла — Баренблатта (рис. 2)

$$d \sim \frac{\alpha^2 \sigma^2 l}{\sigma_b^2} \quad (1)$$

Но форма зоны пластичности при этом сильно отличалась от теоретической тем, что размеры ширины зоны значительно превышали толщину образца. Как показали исследования, именно размер зоны пластичности, который совпадает с направлением приложения внешней нагрузки (ее ширина) влияет как на процесс предварительного деформирования материала, так и на процесс разрушения.

Исследуя ширину зоны пластичности (a) в процессе нагружения образца, приходим к выводу, что она в какой-то мере аналогична параметру, присутствующему в теоретических расчетах Дагдейла, а именно, величине раскрытия трещины ($2v_0$).

По Дагдейлу $2v_0 = \frac{k_1^2}{E\sigma_b}$, где k_1 — коэффициент интенсивности напряжения.

На основании дальнейших исследований показано [5], что $k_1 = \alpha \sigma \sqrt{\pi l}$, α — геометрический фактор; $\alpha = \frac{1,11 + 5(l/2b)^4}{1-l/2b}$ l — длина надреза; $2b$ —

ширина испытуемого образца и σ — приложенное напряжение.

Для ширины зоны пластичности можно записать следующее уравнение:

$$a \sim \frac{\alpha^2 \sigma^2 l}{E\sigma_b} \quad (2)$$

Результаты эксперимента подтвердили справедливость этого предположения (рис. 2, б). Причем, данные для пленок различной толщины располагаются в этих координатах на одной прямой.

В процессе нагружения величина ширины зоны пластической деформации изменяется. Сопоставив данные, полученные для пленок ПАР различной толщины, обнаружили, что в момент начала роста трещины величина a численно равна толщине исследованной пленки в диапазоне 20–100 мкм.

Для более полного анализа пластического деформирования и разрушения аморфных стеклообразных полимеров необходимо сопоставить

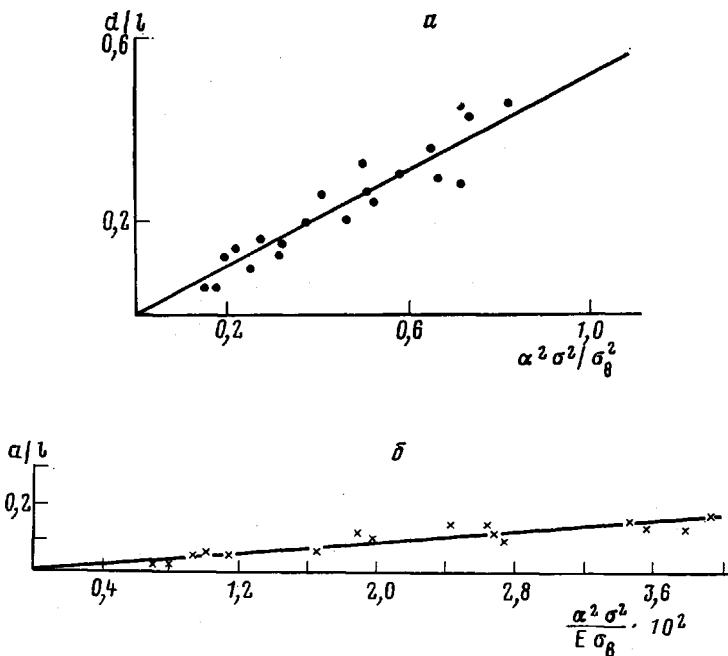


Рис. 2. Зависимость отношения длины (а) и ширины (б) зоны пластичности к величине надреза от квадрата приведенного напряжения для пленок ПАР толщиной 20–100 мкм

микроскопические параметры процесса разрушения и деформации (геометрические размеры зоны пластической деформации) с макроскопическими (с работой пластической деформации (A) и эффективной поверхностной энергией разрушения (γ)).

Работу пластической деформации A определяли из опытов на одноосное растяжение (с постоянной скоростью движения зажимов) ненадрезанных образцов и определяли как площадь под кривой $\sigma - \epsilon$ (за вычетом упругой части).

Расчет $\gamma_{\text{эф}}$ проводили, пользуясь соотношением, выведенным в работе [5], в которой задача Гриффитса решена с учетом геометрических размеров образца

$$\gamma_{\text{эф}} = \frac{\alpha^2 \pi \sigma_{\text{тр}}^2 l}{E}, \quad (3)$$

где $\sigma_{\text{тр}}$ — напряжение, при котором начинается рост трещины; E — модуль Юнга, определяемый на ненадрезанных образцах; l — длина надреза; α — геометрический фактор.

Наблюдая за развитием пластической деформации и надреза в поляризационный микроскоп (скорость движения зажимов $3 \cdot 10^{-2}$ мин $^{-1}$), обнаружили, что сначала появляется зона пластической деформации, а затем через какое-то время при иной нагрузке начинает расти искусственный боковой надрез. При этом начало роста надреза никак не отражается на диаграмме $\sigma - \epsilon$. Как показал эксперимент, $\gamma_{\text{эф}}$ зависит от толщины испытываемой пленки ПАР в интервале от 20 до 100 мкм, но практически не зависит от того, образуется ли перед надрезом видимая зона пластической деформации (в случае отожженной пленки) или нет (в исходной пленке).

Анализ процесса разрушения с учетом микроскопических и макроскопических параметров приводит к заключению, что при продвижении трещин в надрезанном образце толщиной δ на величину dx затрачивается энергия, равная $\gamma dx \delta$. Полную работу пластической деформации (основные затраты энергии идут именно на нее) на этом участке разрушенного

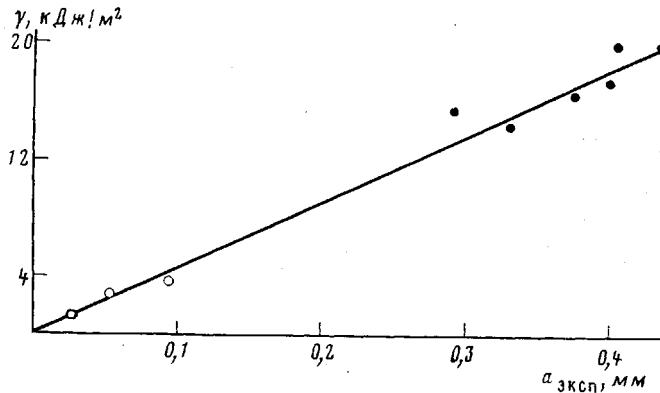


Рис. 3. Зависимость поверхностной энергии разрушения от ширины зоны пластичности

полимера, можно выразить формулой $Aad\delta x$, где A — работа пластической деформации на единицу объема, a — максимальная ширина зоны пластичности в данный момент времени. Приравнивая эти соотношения, получаем

$$\gamma = Aa \quad (4)$$

Исходя из этого соотношения и принимая во внимание уравнение (3), можно записать критерий разрушения в виде

$$k_1^* = \alpha \sigma^* \sqrt{\pi l} = \sqrt{E \gamma} = \sqrt{EAa},$$

$$\sigma^* = \sqrt{\frac{EAa}{\alpha^2 \pi l}}, \quad (5)$$

где a — ширина зоны пластичности в соответствующий момент нагружения. Индекс * означает критическое значение величин.

В соответствии с уравнением (4) наблюдается пропорциональная связь между эффективной поверхностной энергией разрушения и экспериментально определяемой шириной зоны пластичности a , что и подтверждается опытами (рис. 3).

Таким образом, стабильность роста трещины и возрастание нагрузки в процессе этого роста определяется в данном случае увеличением размеров зоны пластичности и работы пластической деформации.

Следует отметить, что коэффициентом пропорциональности в уравнении (4) является работа пластической деформации, рассчитанная из опытов на ненадрезанных образцах. Значение ширины зоны пластичности в момент начала роста трещины, определенное как экспериментально, так и расчетным путем по соотношению $a_{\text{тр}}^{\text{расч}} = \gamma_{\text{эфф}}/A$, практически совпадают и равны толщине образца. Поэтому в качестве критерия начала роста трещины можно пользоваться выражением

$$\sigma_{\text{тр}} = \sqrt{\frac{EA\delta}{\alpha^2 \pi l}} \quad (6)$$

где δ — толщина образца.

ЛИТЕРАТУРА

1. Narisawa I., Ishikawa M., Ogawa H. J. Polymer Sci. Polymer Phys. Ed., 1977, v. 15, № 12, p. 2227.
2. Donald A. M., Kramer E. J. J. Mater. Sci., 1981, v. 16, № 11, p. 2977.
3. Donald A. M., Kramer E. J. J. Mater. Sci., 1981, v. 16, № 11, p. 2967.
4. Берлин А.Л., Маневич Л.И., Гринева Н.С., Александян Г.Г., Сафонов Г.П. Докл. АН СССР, 1983, т. 268, № 6, с. 1426.
5. Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения. М.: Наука, 1974, с. 640.

Институт химической физики
АН СССР

Поступила в редакцию
25.XI.1983

SPREADING OF CRACKS IN GLASSY POLYMER FILMS

Berlin Al. Al., Grineva N. S., Aleksanyan G. G.,
Safonov G. P.

Summary

The geometrical dimensions of plasticity zone appearing during testing of samples having the artificial side nick on the films of polyarylate on the basis of diphenylolpropane and equimolar mixture of isophthalic and terephthalic acids have been studied. The results were compared with results of the study of the same films without any nick. The criteria of fracture during stable growth of cracks were obtained.