

В. Е. ГУЛЬ, В. М. ЩУКИН

**О КРИТЕРИИ РАЗРУШЕНИЯ ПОЛИМЕРОВ  
В ПРОЦЕССЕ ЦИКЛИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ**

(Представлено академиком Ю. Н. Работновым 5 II 1970)

В настоящее время, описывая разрушение полимеров в процессе циклических деформаций, используют критерий суммирования повреждений (критерий Бейли) (1)

$$\int_0^{\tau'} \frac{dt}{\tau[\sigma(t)]} = 1, \quad (1)$$

где  $\tau'$  — долговечность образца (с учетом времени отдыха)

$$\tau[\sigma(t)] = \tau_0 \exp\left[\frac{u_0 - \gamma\sigma(t)}{kT}\right].$$

Экспериментальные данные (2) показали, что долговечность, рассчитанная с помощью критерия Бейли, оказывается существенно больше, чем это следует из эксперимента. Расхождение пытались отнести за счет того, что в процессе циклической деформации в результате потерь на внутреннее трение температура образца повышается. Вследствие этого  $\tau[\sigma(t)]$  уменьшается за счет возрастания температуры и за счет изменения структурно чувствительного коэффициента  $\gamma$  в процессе испытания образца. Проведенные систематические исследования (3-6), в которых было учтено изменение  $T$  и  $\gamma$ , не позволили предсказать разрушение полимеров при циклических деформациях путем использования критерия Бейли. Было показано, что расхождение значений долговечности при статическом и циклическом нагружении для неориентированных полимеров лучше объясняется при оценке прочности числом циклов, а не временем пребывания под нагрузкой (7).

Целью настоящей работы является попытка описания процесса утомления полимера при циклических деформациях и оценка прочности полимерного материала в этих условиях, не основанная на использовании критерия Бейли. Это вызывается тем, что при циклических деформациях полимеров, помимо чисто физических, развиваются также химические процессы (8-10). Кроме того, неоднократно сообщалось, что критерий Бейли не всегда применим к случаю разрушения полимерных материалов (4, 11).

Предлагаемое рассмотрение основано на учете изменения механических свойств полимерного материала вследствие циклического нагружения. Это изменение оценивается изменением значения разрушающего напряжения, причем

$$\sigma_p^1 \gg \sigma_p^2 \gg \sigma_p^3 \gg \dots \gg \sigma_p^i \gg \dots$$

где 1, 2, ...,  $i$  — порядковый номер цикла.

Разрушение образца произойдет в том случае, когда

$$\sigma_p^i \leq \sigma_{\max},$$

где  $\sigma_{\max}$  — максимальное действующее напряжение за цикл.

Температурная и скоростная зависимости разрушающего напряжения имеют вид <sup>(12)</sup>:

$$\sigma_p = k_1 v \exp \left[ \frac{u_0 - \alpha \beta \sigma_p}{kT} \right], \quad (2)$$

где  $v$  — скорость разрастания наиболее опасного дефекта.

Согласно (2), значения  $\sigma_p$  для каждого цикла нагружения имеют вид

$$\sigma_p^1 = k_1 v \exp \left[ \frac{u_0 - \alpha \beta \sigma_p^1}{kT} \right] \quad \text{1-й цикл,} \quad (3a)$$

$$\sigma_p^2 = k_1 v \exp \left[ \frac{u_0 - \alpha \beta \sigma_p^2 - \Delta u_1}{kT} \right] \quad \text{2-й цикл,} \quad (3б)$$

$$\dots \dots \dots$$

$$\sigma_p^i = k_1 v \exp \left[ \frac{u_0 - \alpha \beta \sigma_p^i - \Delta u_{i-1}}{kT} \right] \quad \text{i-й цикл,} \quad (3в)$$

где

$$\Delta u_{i-1} = (i-1) \Delta u; \quad \Delta u = A \lim_{i \rightarrow \infty} \int_0^{t_0} \sigma_i(e) de.$$

Выражения 3а — 3в справедливы при условии, что эксперимент проводится при постоянной температуре, скорости нагружения, размерах и форме образца. Предполагается, что разрастание дефекта будет сопровождаться изменением коэффициента перенапряжений и объема элементарного акта разрыва, протекающими с равными скоростями.

Для того чтобы рассчитать число циклов, необходимое для уменьшения прочности ( $\sigma_p$ ), до значения  $\sigma_p = \sigma_{\max}$  (критерий разрушения), рассмотрим соотношение разрушающих напряжений циклов, следующих друг за другом:

$$\frac{\sigma_p^i}{\sigma_p^{i+1}} = \exp \left[ \frac{\Delta u - \alpha \beta \Delta \sigma_i}{kT} \right]. \quad (4)$$

Если рассмотреть значения для всех циклов с начала испытания до разрушения образца, то получим

$$\frac{\sigma_p^1}{\sigma_p^2} \cdot \frac{\sigma_p^2}{\sigma_p^3} \dots \frac{\sigma_p^N}{\sigma_p^{N+1}} = \frac{\sigma_p^1}{\sigma_{\max}}. \quad (5)$$

Если подставить (4) в (5), то получим окончательно

$$N = \frac{1}{\Delta u} \{ \alpha \beta (\sigma_p^1 - \sigma_{\max}) + kT (\ln \sigma_p^1 - \ln \sigma_{\max}) \}. \quad (6)$$

Выражение (6) связывает число циклов до разрушения  $N$  с величиной гистерезисных потерь  $\Delta u$ , с исходной прочностью материала  $\sigma_p^1$ , максимальным напряжением за цикл  $\sigma_{\max}$ , температурой и произведением  $\alpha \beta$ , которое при оговоренных выше условиях может быть определено из температурной зависимости прочности материала при скорости деформации, равной средней скорости деформации в процессе циклического нагружения. Оценка сопротивления утомлению числом циклов, а не временем эксплуатации, основана на том, что за каждый цикл механические потери ослабляют образец, в то время как простое нагружение сопровождается развитием чисто физического изменения материала, не связанного с потерями на внутреннее трение.

## ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> L. Baily, *Glass. Ind.*, 20, № 1, 21; № 2, 59; № 3, 95; № 4, 143 (1939). <sup>2</sup> В. В. Регель, А. М. Лексовский, *Высокомолек. соед.*, 7, 6, 1045 (1965). <sup>3</sup> С. Б. Ратнер, *Пласт. массы*, 12, 66 (1967). <sup>4</sup> Б. И. Паншин, Г. М. Бартнев, *Пласт. массы*, 11, 47 (1960). <sup>5</sup> К. В. Панферов, *Высокомолек. соед.*, 7, 10, 1731 (1965). <sup>6</sup> О. Ф. Киреевко, А. М. Лексовский, В. Р. Регель, *Мех. полимеров*, 3, 483 (1968). <sup>7</sup> И. Н. Иванова, *Кандидатская диссертация*, Ленингр. политехнич. инст. им. М. И. Калинина, 1968. <sup>8</sup> А. С. Кузьминский, *ДАН*, 71, № 2 (1950). <sup>9</sup> В. Е. Гуль, Д. Л. Федюкин, Б. А. Догадкин, *Колл. журн.*, 15, 1, 11 (1953); В. Е. Гуль, Б. А. Догадкин, Г. А. Луцейкии, *Колл. журн.*, 25, 4, 412 (1963). <sup>10</sup> Г. Л. Слонимский, *Сборн. Старение и утомление каучуков и резины, повышение их стойкости*, 1965. <sup>11</sup> А. В. Стинкас, С. Б. Ратнер, *Пласт. массы*, 12, 56 (1962). <sup>12</sup> В. Е. Гуль, *Мех. полимеров*, 3, 474 (1968); *Intern. Symp. on Macromol. Chemistry, Preprints of Sci. Papers*, A10, Toronto, 1968.