

УДК 541.64:539.3

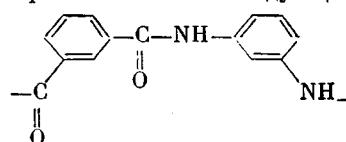
## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОЛЗУЧЕСТИ ФЕНИЛОНА

Вихаускас З. С., Банявичюс Р. Б., Марма А. И.,  
Аскадский А. А., Слонимский Г. Л.

Детально изучен процесс ползучести пленки фенилона в широком интервале температур, напряжений и деформаций. Определены области механической работоспособности этого полимера и особенности его вязкоупругого поведения. Отличительная особенность фенилона — слабая температурная зависимость параметров скорости процесса ползучести и протекание этого процесса по простому релаксационному механизму.

Фенилон (ФЛ) является одним из представителей ароматических теплостойких полимеров класса ПА. Из него, в частности, получают пленочные материалы, обладающие высокой прочностью и достаточной деформируемостью. Для ФЛ ранее были изучены механические свойства в условиях релаксации напряжения [1, 2]. Исследование ползучести ФЛ не проводилось.

ФЛ представляет собой ароматический ПА следующего строения:



Для испытаний использовали пленки ФЛ толщиной 40 мкм, которые при комнатной температуре в условиях одноосного растяжения имеют прочность 140 МПа и деформируются на 20%<sup>1</sup>.

В работе детально исследовали ползучесть ФЛ в широком интервале температур  $T$  и напряжений  $\sigma$ . Верхний предел по  $T$  ограничивался температурой размягчения пленки, а верхний предел по  $\sigma$  — максимальным  $\sigma$ , при котором не происходит разрушение пленки в условиях ползучести при заданной длительности эксперимента (70 мин). Естественно, что это максимальное  $\sigma$  зависело от  $T$ , снижаясь от 140 МПа при 20° до 30 МПа при 220°. Получение экспериментальных кривых ползучести и обработку данных осуществляли по методике, описанной в работе [1].

Кривые ползучести получали на приборе, обеспечивающем поддержание  $\sigma = \text{const}$  в течение всего опыта [3].

Кривые ползучести были определены при различных температурах в интервале 20–220°. Эти кривые закономерно смещаются с ростом  $\sigma$  в область больших деформаций; характерной особенностью всех кривых ползучести ФЛ является быстрый выход на участок установившейся ползучести после мгновенного задания  $\sigma$ . По кривым ползучести были построены изохронные зависимости деформации  $\varepsilon$  от  $\sigma$ , показанные в качестве примера для 20° на рис. 1. Эти зависимости имеют отчетливо выраженный изгиб, свидетельствующий о переходе при определенном напряжении от малой к большой скорости ползучести. Это напряжение будем называть критическим  $\sigma_{kp}$ ; величина  $\sigma_{kp}$  определяется по пересечению касательных к двум ветвям кривой  $\varepsilon-\sigma$ .

Опыт показывает, что величина  $\sigma_{kp}$  зависит от длительности процесса ползучести, поэтому температурные зависимости  $\sigma_{kp}$  для разных длительностей процесса несколько различаются (рис. 2). Пространство, расположенное под кривыми  $\sigma_{kp}-T$ , ограничивает совместно с осями координат область  $\sigma-T$ , в которой исследуемый

<sup>1</sup> Авторы благодарят Э. П. Донцову (НПО «Пластмассы») за предоставление ФЛ для испытаний.

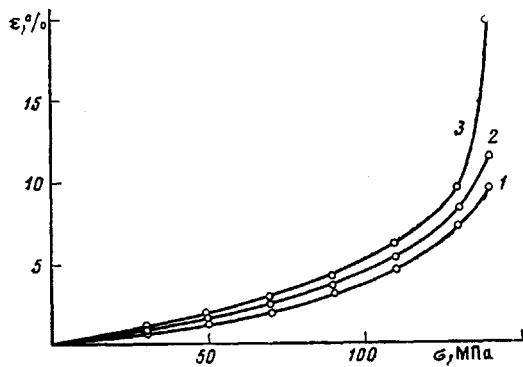


Рис. 1

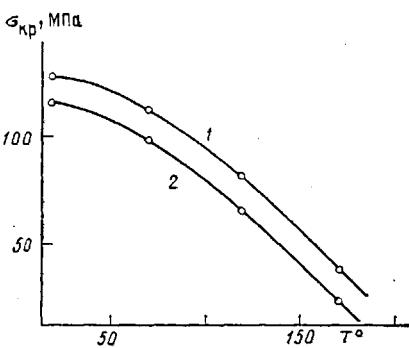


Рис. 2

Рис. 1. Изохронные зависимости деформации  $\epsilon$  от напряжения  $\sigma$  при  $20^\circ$  при длительности ползучести 2,5 (1), 20 (2) и 70 мин (3)

Рис. 2. Температурные зависимости критических напряжений  $\sigma_{kp}$  при длительности ползучести 2,5 (1) и 70 мин (2)

материал обладает малой скоростью ползучести, т. е. не обнаруживает механического размягчения. Экстраполяция температурных зависимостей  $\sigma_{kp}$  к  $\sigma_{kp}=0$  дает возможность определить температуру размягчения, зависящую от длительности релаксационного процесса  $t_p$  и составляющую  $200^\circ$  при  $t_p=70$  мин и  $220^\circ$  при  $t_p=2,5$  мин.

Для выявления областей линейного и нелинейного механического поведения были построены зависимости податливости от времени  $I(t)$  в логарифмических координатах (рис. 3). Видно, что интервал податливостей, охватываемый крайними кривыми, полученными при наиболее различающихся  $\sigma$ , достаточно большой и свидетельствует о нелинейности механического поведения. Однако в области сравнительно низких температур при  $\sigma$  от 30 до 70 МПа, зависимости  $I(t)$  практически совпадают, что позволяет сделать вывод о линейности механического поведения при действии сравнительно малых  $\sigma$ . В области высоких температур зависимости  $I(t)$  при тех же  $\sigma$  расходятся в большей степени. Так что для ФЛ с ростом  $T$  нелинейность механического поведения усиливается.

Для обобщения экспериментальных данных по ползучести и прогнозирования деформируемости пленки ФЛ был использован принцип температурно-временной аналогии. С этой целью кривые податливости в логарифмических координатах, полученные при  $\sigma=\text{const}$ , но различных  $T$ , сдвигались вдоль оси  $\lg t$  до получения обобщенной кривой. За температуру приведения была выбрана  $20^\circ$ . Принцип температурно-временной аналогии для ФЛ выполняется достаточно хорошо. Обобщенные кривые показаны на рис. 4. В интервале  $\sigma$  от 30 до 70 МПа они образуют достаточно узкий пучок, что свидетельствует о релаксационном поведении, близком к линейному. Расхождение кривых начинается в области больших значений  $\lg t/a_t$ , соответствующих высоким температурам. При  $\sigma=90$  и 110 МПа обобщенные кривые заметно расходятся во всем интервале  $\lg t/a_t$  (т. е. при всех  $T$ ).

Температурные зависимости фактора сдвига  $\lg a_t$  приведены на рис. 5. Как показали проведенные расчеты, они подчиняются выражению

$$\lg a_t = a(T - T_0)^{1.3} + b(T - T_0), \quad (1)$$

где коэффициенты  $a$  и  $b$  зависят от  $\sigma$ , а  $T_0$  — температура приведения. Зависимости  $a$  и  $b$  от  $\sigma$  аппроксимируются прямыми

$$a = c\sigma + d, \quad b = c'\sigma + d', \quad (2)$$

где  $c = 0,092 \cdot 10^{-3}$ ,  $d = -25,3 \cdot 10^{-3}$ ,  $c' = -0,509 \cdot 10^{-3}$  и  $d' = 0,1480$  ( $\sigma$  в МПа). Зная численные значения коэффициентов  $c$ ,  $d$ ,  $c'$  и  $d'$ , можно прогнозировать деформацию пленки в условиях действия постоянного  $\sigma$ .

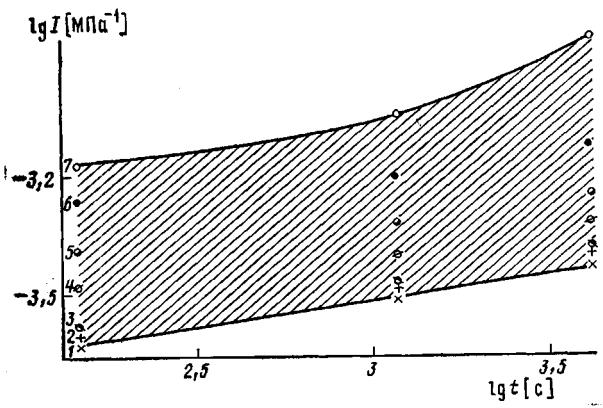


Рис. 3

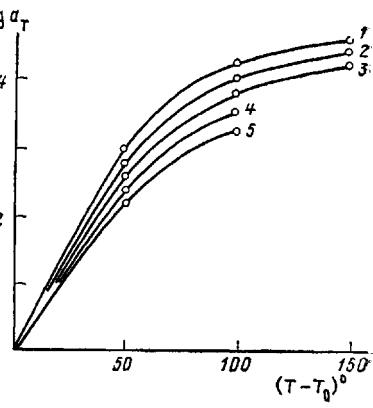


Рис. 5

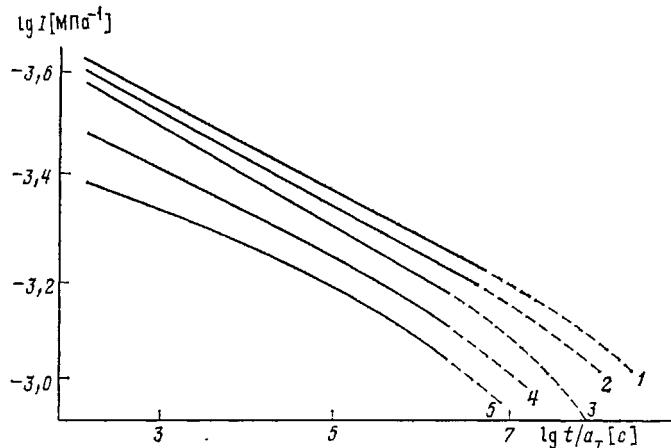


Рис. 4

Рис. 3. Зависимости податливости от времени при  $20^\circ$  и напряжениях 30 (1), 50 (2), 70 (3), 90 (4), 110 (5), 130 (6) и 140 МПа (7)

Рис. 4. Обобщенные кривые податливости при напряжениях 30 (1), 50 (2), 70 (3), 90 (4) и 110 МПа (5)

Рис. 5. Температурные зависимости фактора сдвига при напряжениях 30 (1), 50 (2), 70 (3), 90 (4) и 110 МПа (5)

Из рассмотрения исходных кривых ползучести ФЛ следует, что быстро достигается участок установившейся ползучести. Для выяснения характера деформации (т. е. является ли она обратимой или необратимой) на участке установившейся ползучести были проведены эксперименты по разделению  $\epsilon$  на составляющие. После ползучести в течение некоторого времени образец разгружался, и фиксировалось уменьшение деформации. Опыты показали, что при заданной  $T=20^\circ$  и одной и той же длительности ползучести под нагрузкой и отдыха деформация исчезает не полностью, хотя процесс восстановления за 60 мин явно не заканчивается. При нагревании образца до  $200^\circ$  деформация полностью исчезает, и образец принимает исходные размеры. Следовательно,  $\epsilon$  даже на участке установившейся ползучести полностью обратима и не связана с вязким течением. При этом величина мгновенно-упругой деформации в период ползучести равна величине мгновенно-упругой деформации в процессе отдыха.

Участок кривой ползучести, предшествующий установившемуся процессу, при спектральном анализе, как показали проведенные расчеты, хорошо описывается одной экспоненциальной функцией с одним временем запаздывания  $\theta_1$ . Учитывая наличие двух участков вынужденно-эластической деформации (один – до выхода на участок установившейся ползучести, другой – на участок ползучести), можно записать

части, другой – участок установившейся ползучести) и участок мгновенно-упругой деформации, можно записать

$$\varepsilon = \varepsilon_y + \varepsilon_{0,1}(1 - e^{-t/\theta_1}) + \varepsilon_{0,2}(1 - e^{-t/\theta_2}), \quad (3)$$

где  $\varepsilon_y$  – мгновенно-упругая деформация;  $\theta_1$  и  $\theta_2$  – времена запаздывания. Это уравнение соответствует модели, в которой последовательно соединены упругий элемент и два элемента Кельвина – Фойгта. Поскольку на третьем участке ползучести проходит с постоянной скоростью, это соответствует условию  $t \ll \theta_2$ . Тогда из выражения (3) следует

$$\varepsilon = \varepsilon_y + \varepsilon_{0,1}(1 - e^{-t/\theta_1}) + \varepsilon_2 \frac{t}{\theta_2} \quad (4)$$

или

$$\varepsilon = \varepsilon_y + \varepsilon_{0,1}(1 - e^{-t/\theta_1}) + \frac{\sigma t}{E_2 \theta_2} \quad (5)$$

Температурная зависимость времени запаздывания  $\theta_1$  в координатах  $\lg \theta_1 - 1/T$  представляет собой прямую. Температурный коэффициент времени запаздывания на этом участке ползучести составляет  $\sim 4,2 \text{ кДж/моль}$ , что является аномально низкой величиной.

По наклону прямых на участке установившейся ползучести были рассчитаны коэффициенты  $\eta = E_2 \theta_2$ , температурные зависимости которых при сравнительно низких температурах представляют собой прямые; при более высоких температурах наблюдается отклонение от прямых в сторону уменьшения  $\eta$ . Вычисленные по наклону начальных линейных участков значения температурных коэффициентов  $\eta$  возрастают от 4 до 20 кДж/моль при увеличении  $\sigma$  от 30 до 130 МПа. Такие значения также являются аномально низкими и свидетельствуют о слабой температурной зависимости скорости ползучести.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Слонимский Г. Л., Аскадский А. А. // Механика полимеров. 1965. № 1. С. 36.
2. Аскадский А. А., Тодадзе Т. В. // Механика композит. матер. 1980. № 4. С. 713.
3. Регель В. Р., Бережкова Г. В., Дубов Г. А. // Завод. лаб. 1959. Т. 25. № 1. С. 101.

Каунасский политехнический  
институт им. Антанаса Снечкуса

Поступила в редакцию  
17.IV.1987

Институт элементоорганических соединений  
им. А. Н. Несмиянова АН СССР

#### STUDY OF THE CREEP PROCESS FOR PHENYLONE

Vikhauskas Z. S. Banyavichyus R. B., Marma A. I.,  
Askadskii A. A., Slonimskii G. L.

#### Summary

The creep process for the phenylone film has been studied in details in the wide range of temperatures, stresses and strains. The regions of mechanical serviceability of this polymer and features of its viscoelastic behaviour have been determined. Phenylone is characterized by the weak temperature dependence of parameters of the creep process rate and by the simple relaxational mechanism of this process.