

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КИНЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА МЕХАНИЧЕСКОГО РАЗМЯГЧЕНИЯ ПОЛИМЕРОВ

Академик А. А., Мигонене З. Б., Мигонис Р. Б.

Проанализированы различные методы экспериментального и расчетного определения кинетических параметров процесса механического размягчения полимеров. Наиболее оптимальна по длительности эксперимента и точности нахождения параметров комбинация двух способов, включающих измерение семейства кривых ползучести и растяжения (или сжатия).

Известно, что полимеры при механическом нагружении могут претерпевать либо хрупкое разрушение, либо механическое размягчение. При хрупком разрушении кинетической характеристикой процесса является долговечность, т. е. время, проходящее с момента нагружения до разрушения материала при постоянном напряжении. При механическом размягчении кинетической характеристикой процесса является долговечность формы τ_ϕ [1], т. е. время, проходящее с момента нагружения до быстрого развития деформации (размягчения) в условиях ползучести при постоянном напряжении.

В общем случае кривые ползучести полимеров, снятые при одноосном сжатии или растяжении, имеют вид, показанный на рис. 1, а. После быстрого начального развития деформации наблюдается участок установившейся ползучести, протяженность которого для данного материала зависит от температуры и приложенного напряжения. Далее наблюдается участок быстрого роста деформации ε . Время, проходящее с момента приложения нагрузки до быстрого роста деформации, названо долговечностью формы τ_ϕ [1, 2]. Величина τ_ϕ связана с температурой T и напряжением σ соотношением, предложенным в работах [1, 3, 4]

$$\tau_\phi = A \sigma^{-b} e^{U/RT}, \quad (1)$$

или в работах [5, 6]

$$\tau_\phi = \tau_{\phi 0} e^{\frac{U_0 - U}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_n} \right)},$$

где A или $\tau_{\phi 0}$, b , U или U_0 – параметры полимера; R – универсальная газовая постоянная; σ – напряжение, МПа; T – абсолютная температура.

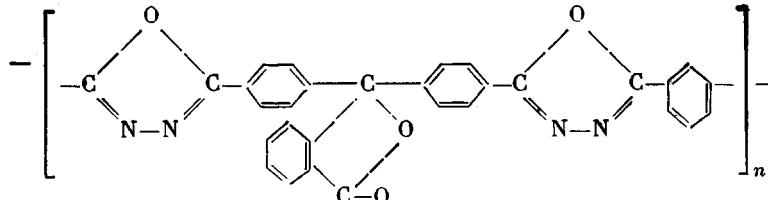
Проведем анализ способов определения параметров процесса размягчения полимеров с целью выявления оптимального по точности и трудоемкости. Будем пользоваться соотношением (1), которое хорошо описывает полученные нами экспериментальные данные.

Способ I определения параметров A , b и U в соотношении (1) заключается в прямом измерении долговечности формы τ_ϕ по кривым ползучести (рис. 1, а), снятых в широком интервале температур и напряжений.

Для многих полимеров, в особенности в области низких температур, в условиях одноосного сжатия кривые ползучести имеют вид, представленный на рис. 1, б. В этом случае участок быстрого развития деформации не наблюдается, а имеет место только участок установившейся ползучести вплоть до разрушения образца. При этом разрушение не является хрупким, а происходит при большой деформации. Долговечность формы при этом можно определять по величине времени τ_ϕ , в течение которого деформация достигает предельной величины ε_ϕ . Поскольку в данном случае речь идет о механическом размягчении материала, величину предельной деформации ε_ϕ , соответствующей пределу вынужденной эластичности, целесообразно определять по кривым сжатия или растяжения, полученным при непрерывном деформировании образца.

Как показали наши исследования, кривые сжатия при непрерывном деформировании теплостойких полимеров – полиоксадиазола (ПОД), полибензоксазола и полимида даже в области низких температур обладают отчетливо выраженным максимумом (пределом вынужденной эластичности $\sigma_{\text{вз}}$).

Исследуемый ПОД имел следующее строение звена:



Для ПОД предел вынужденной эластичности наблюдается практически при одной и той же предельной деформации ε_t , не зависящей от температуры и равной 13,5%. Это значение предельной деформации ε_t и было выбрано нами в качестве критерия для оценки долговечности формы τ_ϕ по кривым ползучести, имеющим вид, показанный на рис. 1, б.

В соответствии с этим, способ II определения параметров A , b и U заключается в определении предельной деформации ϵ_{ϕ} , снятии двух пар диаграмм ползучести (рис. 1, б) при разных температурах и напряжениях, определении соответствующих значений долговечности формы и вычислении параметров. Из выражения (1) находим

$$U=R \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)^{-1} \ln \left(\tau_{\phi 1}/\tau_{\phi 2} \right), \quad (2)$$

где $\tau_{\phi 1}$ и $\tau_{\phi 2}$ – долговечности формы, полученные при одинаковом напряжении σ и температурах T_1 и T_2 соответственно. Аналогично

$$b = \frac{\ln \tau_{\phi 1} - \ln \tau_{\phi 2}}{\ln \sigma_2 - \ln \sigma_1}, \quad (3)$$

где $\tau_{\phi 1}$ и $\tau_{\phi 2}$ – долговечности формы, полученные при одинаковой температуре T и напряжениях σ_1 и σ_2 соответственно.

При известных параметрах b и U величина $\ln A$ определяется из любой имеющейся диаграммы ползучести по выражению

$$\ln A = \ln \tau_{\phi} + b \ln \sigma - \frac{U}{RT} \quad (4)$$

Способ III оценки параметров заключается в использовании двух семейств кривых ползучести, снятых в течение одинакового времени испытания t_i (в наших экспериментах $t_i=1,5$ ч). Первое семейство состоит из m кривых ползучести, снятых при одной температуре и разных напряжениях. Второе семейство состоит из m кривых ползучести, снятых при одном напряжении и разных температурах. По указанным кривым ползучести строятся два семейства изохронных зависимостей для N фиксированных значений времени, показанные на рис. 2. На изохронных зависимостях наносится величина предельной деформации ϵ_{ϕ} и определяются значения долговечности формы при разных напряжениях и температурах. Таким образом определяется N экспериментальных значений зависимостей $\ln \tau_{\phi} = f(\ln \sigma) |_{t=\text{const}}$

$$\text{и } \ln \tau_{\phi} = f\left(\frac{1}{T}\right) \Big|_{\sigma=\text{const}}, \quad \text{показанных на рис. 3. Согласно выражению (1), эти за-}$$

висимости носят линейный характер

$$\ln \tau_{\phi} = \ln A - b \ln \sigma + \frac{U}{RT} \quad (5)$$

Экспериментально установленные точки аппроксимируются прямыми линиями рис. 3, наклон которых равен b и U/R соответственно. Параметры определяются по следующим выражениям:

$$b = \frac{\ln \tau_{\phi \max} - \ln \tau_{\phi \min}}{\ln \sigma_{\max} - \ln \sigma_{\min}}, \quad (6)$$

где $\tau_{\phi \max}$ и $\tau_{\phi \min}$ – долговечности формы при минимальном σ_{\min} и максимальном σ_{\max} значениях напряжения в эксперименте (рис. 3, а)

$$U = R \left(\frac{1}{T_{\min}} - \frac{1}{T_{\max}} \right)^{-1} \ln \left(\tau_{\phi \max} / \tau_{\phi \min} \right), \quad (7)$$

где $\tau_{\phi \max}$ и $\tau_{\phi \min}$ – долговечности формы при минимальном T_{\min} и максимальном T_{\max} значениях температуры в эксперименте (рис. 3, б).

Если параметры U и b известны, величина A определяется по любой из указанных линейных зависимостей (рис. 3) с учетом выражения (4).

Способ IV оценки параметров A , b и U заключается в проведении экспериментов только по одноосному сжатию или растяжению при непрерывном деформировании с получением кривых сжатия или растяжения при трех разных температурах. Для расчетов используется методика, описанная в работе [7]. Зависимость напряжения σ от времени t до появления вынужденной эластичности аппроксимируется степенной функцией

$$\sigma = (at)^c, \quad (8)$$

а для расчета долговечности формы t_{ϕ} при изменении напряжения по выражению (8) принимается критерий, аналогичный критерию Бейли

$$\int_0^{t_{\phi}} \frac{dt}{\tau_{\phi}(\sigma(t))} = 1, \quad (9)$$

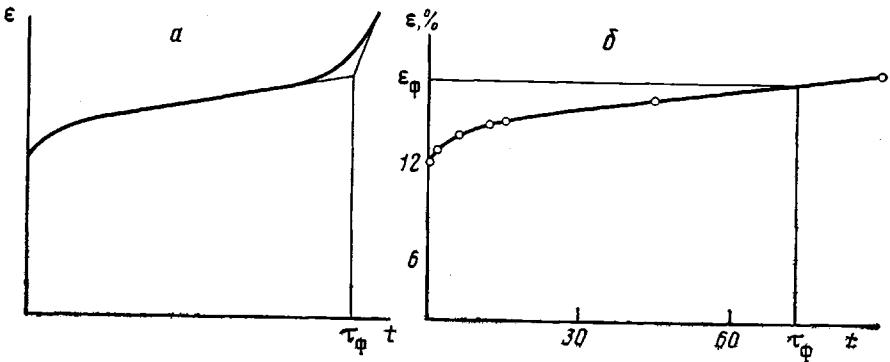


Рис. 1. Кривые ползучести при больших уровнях начальных напряжений: *a* – участок быстрого развития деформации ползучести после плавного развития деформации в течение времени τ_Φ ; *b* – такой участок отсутствует (ПОД)

где t_Φ – долговечность формы в условиях действия переменного напряжения; $\tau_\Phi(\sigma(t))$ – долговечность формы при действии постоянного напряжения, равного мгновенному значению $\sigma(t)$.

Подставляя выражения (1) и (8) в выражение (9) и учитывая, что $(at_\Phi)^c = \sigma_{\text{вз}}$, получаем [7]

$$\frac{\sigma_{\text{вз}}^{b+\frac{1}{c}}}{aA(bc+1)e^{U/RT}} = 1 \quad (10).$$

После преобразований имеем [7]

$$U = \frac{R(B \ln(a_1/a_3) - \ln(a_1/a_2))}{D_{12} - BD_{13}}, \quad (11).$$

где

$$D_{12} = \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}, \quad D_{13} = \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_3}, \quad B = \frac{\ln(\sigma_{\text{вз}1}/\sigma_{\text{вз}2})}{\ln(\sigma_{\text{вз}1}/\sigma_{\text{вз}3})}$$

$(\sigma_{\text{вз}1}, \sigma_{\text{вз}2}, \sigma_{\text{вз}3}$ и a_1, a_2, a_3 – пределы вынужденной эластичности и значения коэффициентов a в соотношении (8) при температурах T_1, T_2, T_3). Соответственно

$$b = \frac{\ln(a_1/a_2) + \frac{U}{R} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)}{\ln(\sigma_{\text{вз}1}/\sigma_{\text{вз}2})} - \frac{1}{c} \quad (12).$$

$$\ln A = \frac{bc+1}{c} \ln \sigma_{\text{вз}} - \ln(bc+1) - \ln a - \frac{U}{RT} \quad (13).$$

Рассмотрим погрешности определения параметров A, b и U способами II–IV на примере ПОД при испытании на сжатие. Способ I применять нельзя, так как кривые ползучести имеют вид, показанный на рис. 1, б. Сначала проведем анализ погрешностей в общем виде. Любой из рассматриваемых параметров y является функцией нескольких величин x_i

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n) \quad (14).$$

Каждая величина x_i при эксперименте измеряется с максимальной абсолютной погрешностью Δx_i или максимальной относительной погрешностью δ_{xi} . При дальнейшем анализе условно допустим, что эти погрешности случайные и распределены по нормальному закону. Погрешности измерения δ_{xi} влекут за собой появление частных абсолютных погрешностей Δ_{iy} и частных относительных погрешностей δ_{iy} определения параметра y . Когда зависимость (14) близка к линейной или при сравнительно небольших значениях частных погрешностей δ_{iy} ($< 10-30\%$) суммарная погрешность δ_y величины y остается распределенной по закону, близкому к нормальному, а ее величина определяется по выражению

$$\delta_y = \sqrt{\sum_{i=1}^n \delta_{iy}^2}, \quad (15).$$

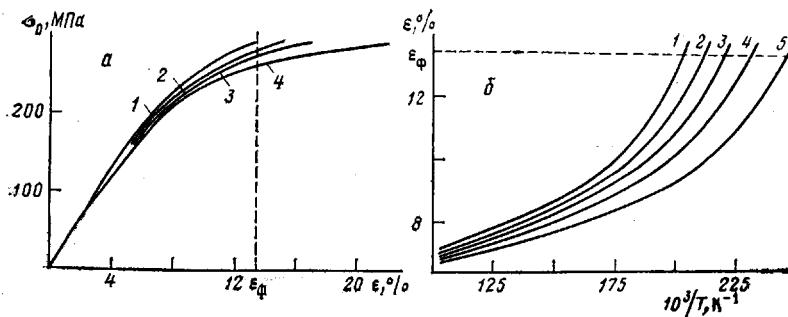


Рис. 2. Изохронные зависимости ползучести для ПОД $\sigma_0 - \varepsilon$ (а) и $\varepsilon_0 - T$ (б) для времен 0,5 (1), 3 (2), 9 (3), 30 (4) и 90 мин (5)

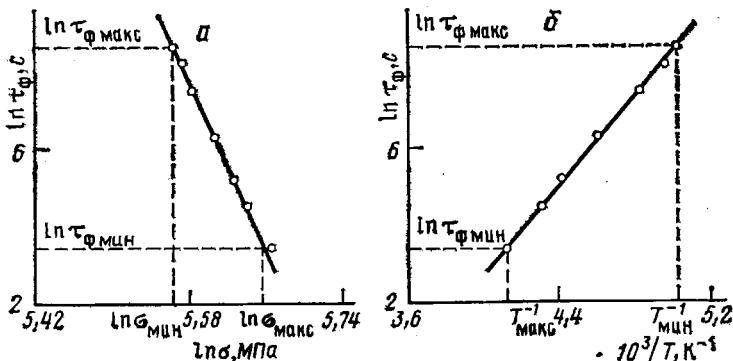


Рис. 3. Линейные зависимости для ПОД $\ln \tau_0 - \ln \sigma$ при $T=150^\circ$ (а) и $\ln \tau_0 - 10^3/T, \text{К}^{-1}$ при $\sigma=220 \text{ МПа}$ (б)

где $\delta_{iy} = \frac{\Delta_{iy}}{y} = \frac{x_i}{y} W_{xi} \delta_{xi}$, $W_{xi} = \frac{\partial_y}{\partial_{xi}}$ — коэффициент влияния погрешности δ_{xi} .

Отметим, что в тех случаях, когда получаем суммарную погрешность $\delta_y > (30-60\%)$, результат может быть не точным, а только ориентировочным.

В табл. 1 приведены выражения частных погрешностей δ_{iy} для способов II—IV, найденные по выражению (15) с учетом выражений (2)–(7) и (11)–(13). Символом $\Delta \ln \tau_0$ обозначена абсолютная погрешность экспериментального определения величины $\ln \tau_0$, которую находим по выражению (15) с учетом выражения (5)

$$\Delta \ln \tau_0 = \sqrt{\Delta_1^2 + \Delta_2^2 + \Delta_3^2}, \quad (16)$$

где

$$\Delta_1 = b \delta_\sigma, \quad \Delta_2 = \frac{U \delta_T}{RT}, \quad \Delta_3 = \delta_t.$$

Для дальнейших расчетов требуются погрешности δ_{xi} исходных экспериментальных данных. Эксперименты проводили на приборе 1253У2-2 [8], по техническим характеристикам которого находим максимальные относительные погрешности, получаемые при испытании одного образца: погрешность измерения напряжения $\delta_\sigma = 1,5\%$, погрешность измерения температуры $\delta_T = 1,5\%$, погрешность измерения деформации $\delta_e = 3\%$, погрешность измерения времени $\delta_t = 6\%$. Каждая исходная диаграмма получена путем усреднения результатов испытаний k образцов ($k=3-5$). Вследствие этого случайные погрешности δ_{xi} уменьшаются в $\sqrt{k}-1 \approx 1,7$ раз и при дальнейшем анализе для способов II и IV будут приняты равными

$$\begin{aligned} \delta_\sigma &= 0,9\%, & \delta_T &= 0,9\%, & \delta_e &= 1,8\% \\ \delta_t &= 3,5\%, & \delta_c &= 5\%, & \Delta \ln a &= 0,035, \end{aligned} \quad (17)$$

где $\Delta \ln a$ — абсолютная погрешность определения величины $\ln a$; δ_c — относительная погрешность определения величины c в соотношении (8).

Для способа III исходными являются изохронные зависимости (рис. 2), которые усредняют результаты $m=5$ кривых ползучести. Поэтому погрешности уменьшаются еще в $\sim \sqrt{m}-1=2$ раза и становятся равными

$$\delta_\sigma = 0,45\%, \quad \delta_T = 0,45\%, \quad \delta_e = 0,9\%, \quad \delta_t = 1,8\% \quad (18)$$

Таблица I

Формулы для вычисления частной погрешности

Частная погреш- ность	Выражения частных погрешностей		
	способ расчета		
	I	III	IV
δ_{1U}	$\frac{R\Delta \ln \tau_{\phi 1}}{U \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)}$	$\frac{R\Delta \ln \tau_{\phi \text{мин}}}{U \left(\frac{1}{T_{\text{мин}}} - \frac{1}{T_{\text{макс}}} \right) \sqrt{N-1}}$	$\sqrt{\left(\frac{1-B}{T_1} \right)^2 + \frac{1}{T_2^2} + \frac{B^2}{T_3^2}} \frac{\delta_T}{D_{12} - BD_{13}}$
δ_{2U}	$\frac{R\Delta \ln \tau_{\phi 2}}{U \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)}$	$\frac{R\Delta \ln \tau_{\phi \text{макс}}}{U \left(\frac{1}{T_{\text{мин}}} - \frac{1}{T_{\text{макс}}} \right) \sqrt{N-1}}$	$\sqrt{1+B^2+(1-B)^2} \frac{\Delta \ln a}{B \ln a_1/a_3 - \ln a_1/a_2}$
δ_{3U}	$\frac{T_2 \delta_T}{T_2 - T_1}$	$\frac{T_{\text{макс}} \delta_T}{(T_{\text{макс}} - T_{\text{мин}}) \sqrt{N-1}}$	$\sqrt{1+B^2 + \left(\frac{\ln \sigma_{B3} 2 / \sigma_{B3} 3}{\ln \sigma_{B3} 1 / \sigma_{B3} 3} \right)^2} \delta_\sigma \times$ $\times \left[\frac{\ln a_1/a_3}{B \ln a_1/a_3 - \ln a_1/a_2} + \frac{D_{13}}{D_{12} - BD_{13}} \right] \frac{1}{\ln \sigma_{B3} 1 / \sigma_{B3} 2}$
δ_{4U}	$\frac{T_1 \delta_T}{T_2 - T_1}$	$\frac{T_{\text{мин}} \delta_T}{(T_{\text{макс}} - T_{\text{мин}}) \sqrt{N-1}}$	—
δ_{1b}	$\frac{\Delta \ln \tau_{\phi 1}}{b \ln \sigma_2 / \sigma_1}$	$\frac{\Delta \ln \tau_{\phi \text{мин}}}{\sqrt{N-1} b \ln \sigma_{\text{макс}} / \sigma_{\text{мин}}}$	$\sqrt{\frac{1}{T_1^2} + \frac{1}{T_2^2}} \frac{U \delta_T}{Rb \ln \sigma_{B3 1} / \sigma_{B3 2}}$
δ_{2b}	$\frac{\Delta \ln \tau_{\phi 2}}{b \ln \sigma_2 / \sigma_1}$	$\frac{\Delta \ln \tau_{\phi \text{макс}}}{\sqrt{N-1} b \ln \sigma_{\text{макс}} / \sigma_{\text{мин}}}$	$\sqrt{2} \frac{\Delta \ln a}{b \ln \sigma_{B3 1} / \sigma_{B3 2}}$
δ_{3b}	$\frac{\delta_\sigma}{\ln \sigma_2 / \sigma_1}$	$\frac{\delta_\sigma}{\sqrt{N-1} \ln \sigma_{\text{макс}} / \sigma_{\text{мин}}}$	$\sqrt{2} \frac{\delta_\sigma}{\ln \sigma_{B3 1} / \sigma_{B3 2}}$
δ_{4b}	$\frac{\delta_\sigma}{\ln \sigma_2 / \sigma_1}$	$\frac{\delta_\sigma}{\sqrt{N-1} \ln \sigma_{\text{макс}} / \sigma_{\text{мин}}}$	$\frac{\delta_c}{bc}$
δ_{5b}	0	0	$\frac{U \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \delta_U}{Rb \ln \sigma_{B3 1} / \sigma_{B3 2}}$
$\delta_{1 \ln A}$	$\frac{b \delta_b \ln \sigma}{\ln A}$	$\frac{b \delta_b \ln \sigma}{\ln A}$	$\frac{b \delta_b}{\ln A} \left(\ln \sigma_{B3} - \frac{c}{cb+1} \right)$
$\delta_{2 \ln A}$	$\frac{U \delta_U}{RT \ln A}$	$\frac{U \delta_U}{RT \ln A}$	$\frac{U \delta_U}{RT \ln A}$
$\delta_{3 \ln A}$	$\frac{b \delta_\sigma}{\ln A}$	$\frac{b \delta_\sigma}{\sqrt{N-1} \ln A}$	$\frac{(cb+1) \delta_\sigma}{c \ln A}$
$\delta_{4 \ln A}$	$\frac{\Delta \ln \tau_\phi}{\ln A}$	$\frac{\Delta \ln \tau_\phi}{\sqrt{N-1} \ln A}$	$\frac{\Delta \ln a}{\ln A}$
$\delta_{5 \ln A}$	$\frac{U \delta_T}{RT \ln A}$	$\frac{U \delta_T}{RT \ln A}$	$\frac{U \delta_T}{RT \ln A}$
$\delta_{6 \ln A}$	0	0	$\frac{c \delta_c}{\ln A} \left(\frac{\ln \sigma_{B3}}{c^2} + \frac{b}{cb+1} \right)$

Для дальнейшего анализа погрешностей требуются условия и исходные данные проведения экспериментов и величины параметров A , b и U . Параметры были определены способом III и, как увидим ниже, наиболее точным способом и для ПОД получились равными

$$b=56,9, \quad U=49,8 \text{ кДж/моль}, \quad \ln A=285,7 \quad (19)$$

Таблица 2

Исходные данные и величины суммарных погрешностей по различным способам

Частная погрешность	Значения параметров		
	способ расчета		
	II	III	IV
δ_U	0,194	0,055	30,9
Исходные данные	$T_1=193 \text{ К}$ $T_2=223 \text{ К}$ $\tau_{\phi 1}=1 \text{ мин}$ $\tau_{\phi 2}=90 \text{ мин}$ $\sigma=221,7 \text{ МПа}$	$T_{\min}=196 \text{ К}$ $T_{\max}=230 \text{ К}$ $\sigma=220 \text{ МПа}$ $m=5$ $N=5$	$T_1=150 \text{ К}, \ln \sigma_{\text{вз}}=5,76$ $T_2=199 \text{ К}, \ln \sigma_{\text{вз}}=5,59$ $T_3=293 \text{ К}, \ln \sigma_{\text{вз}}=5,42$ $\ln a_1=5,78, \ln a_2=5,58$ $\ln a_3=5,33, c=0,81$
δ_b	0,241	0,047	38,8
Исходные данные	$\sigma_1=204,9 \text{ МПа}$ $\sigma_2=221,7 \text{ МПа}$ $\tau_{\phi 1}=1 \text{ мин}$ $T=223 \text{ К}$ $\tau_{\phi 2}=90 \text{ мин}$	$\sigma_{\max}=290 \text{ МПа}$ $T=151 \text{ К}$ $\sigma_{\min}=261 \text{ МПа}$ $m=5$ $N=5$	$T_1=151 \text{ К}, T_2=293 \text{ К}$ $\ln \sigma_{T_1}=5,765$ $c=0,81$ $\ln \sigma_{T_2}=5,424$
$\delta_{\ln A}$	0,26	0,055	42
Исходные данные	$\sigma=220 \text{ МПа}$ $T=216 \text{ К}$	$\sigma_{\max}=280 \text{ МПа}$ $T=151 \text{ К}$ $\sigma_{\min}=261 \text{ МПа}$ $m=5$ $N=5$	$\ln \sigma_{\text{вз}}=5,424$ $T=293 \text{ К}$ $c=0,81$

Исходные данные для определения погрешностей были взяты из проведенных нами экспериментов за исключением $\sigma_{\text{вз}}$. Экспериментальные значения $\sigma_{\text{вз}}$ — недостаточно точны для определения параметра U способом IV, а тем самым и для анализа соответствующей погрешности. Для определения $\sigma_{\text{вз}}$ было использовано выражение (13).

Суммарные погрешности, найденные по выражениям, приведенным в табл. 1 с учетом выражений (15)–(19), приведены в табл. 2. Там же указаны исходные экспериментальные данные, для которых проведен расчет.

Результаты анализа погрешностей, приведенные в табл. 2, показывают, что одних диаграмм сжатия при непрерывном деформировании (способ IV) недостаточно для определения кинетических параметров процесса размягчения. Чтобы определить параметр U способом IV, точность измерения напряжения и температуры требуется повысить примерно на два порядка, т. е. погрешности δ_σ и δ_T должны быть меньше 0,01%, что достигнуть практически невозможно.

Представляет интерес комбинированный способ III–IV, когда параметр U определяется способом III, а параметры b и A способом IV. Погрешности определения параметров таким комбинированным способом, рассчитанные по выражениям, приведенным в табл. 1, получились равными $\delta_U=5,5\%$, $\delta_b=7\%$, $\delta_{\ln A}=8\%$, но они не соответствуют реальным погрешностям. Величины параметра b , найденные из разных комбинаций кривых сжатия по выражению (12), отличаются между собой и от значения, полученного способом III, на 30–50%. Такая большая погрешность объясняется влиянием некоторых, не учтенных при анализе погрешностей способа IV факторов: неточность аппроксимирующего выражения (8), особенности поведения материала при низких температурах, увеличение сечения образца при сжатии и др.

Отметим, что при анализе погрешностей не учтены корреляционные связи между частными погрешностями, систематические погрешности, отклонение погрешностей от нормального закона распределения и некоторые другие факторы. Несмотря на это, разброс параметров, многократно определенных способами II и III, лежит в пределах полученных погрешностей.

Далее рассмотрим трудоемкость экспериментов. Длительность экспериментов при k -м способе определения параметров обозначим

$$t_k = m_k t_{mk} + t_{ef} \quad (20)$$

где $t_{mk}=s(t_3+t_{an})n$ — затраты приборного времени для снятия одной усредненной диаграммы k -го способа; m_k — число диаграмм, требующихся для расчетов k -м способом; $t_{ef}=t_{IV}m_{ef}$ — длительность экспериментов для определения температурной

Таблица 3

Длительность экспериментов и погрешности параметров A , b , U

Способ, №	$t_{\text{зк}}$, ч	t_{mk} , ч	m	$t_{\varepsilon\phi}$, ч	t_k , ч	δ_U^*	δ_b	$\delta_{\ln A}$
II	0,76	6,05	2-2	13,2	37,4	0,2	0,25	0,27
III	1,5	9,6	5-5	13,2	109	0,055	0,05	0,06
IV	0,05	2,64	0	13,2	13,2	31	39	42
III-IV		9,6	5	13,2	61,2	0,055	0,07	0,08

* По эксперименту (способ III — IV) $\delta_U = 0,3 - 0,5$.

зависимости предельной деформации $\varepsilon_{\phi} = f(T)$ по $m_{\varepsilon\phi} = 4 - 6$ диаграммам сжатия при непрерывном деформировании; $t_s = 0,5$ ч — среднее время замены образца и установления температуры; $t_{\text{зк}}$ — средняя длительность испытания одного образца для k -го способа; $s = 1, 2$ (коэффициент, учитывающий процент некачественных экспериментов (ошибки, некачественные образцы и т. п.)); $n = 4$ (число образцов для получения одной усредненной диаграммы).

Результаты расчетов длительности экспериментов по определению параметров рассмотренными выше способами приведены в табл. 3. Там же приведены погрешности соответствующих способов.

Результаты расчетов, приведенные в табл. 3, показывают, что наиболее точным из рассмотренных является способ III, но он и наиболее трудоемок. Способ II менее трудоемкий, но его погрешность больше. Погрешность способа II можно уменьшить, увеличивая объем испытаний. При одинаковой трудоемкости оба способа дают примерно одинаковую точность. Предпочтение следует отдавать способу III, так как его исходные кривые ползучести более информативны и могут быть использованы для выявления ряда других особенностей материалов.

Погрешности найденных параметров следует определять в каждом конкретном случае по выражению (15) и выражениям, приведенным в табл. 1. Критериям определения долговечности формы по диаграммам сжатия, имеющим вид, показанный на рис. 1, б, служит предельная деформация ε_{ϕ} . Предельная деформация определяется по диаграммам сжатия при непрерывном деформировании.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аскадский А. А. Деформация полимеров. М., 1973. 448 с.
2. Слонимский Г. Л., Аскадский А. А., Мжельский А. И. // Высокомолек. соед. А. 1970. Т. 12. № 6. С. 1162.
3. Карапин В. А., Саголова Т. И., Рубштейн В. М. // Высокомолек. соед. А. 1967. Т. 9. № 2. С. 288.
4. Слонимский Г. Л., Аскадский А. А., Казанцева В. В. // Высокомолек. соед. А. 1972. Т. 14. № 5. С. 1149.
5. Ратнер С. Б. // Пласт. массы. 1977. Т. 10. № 1. С. 31.
6. Ратнер С. Б., Брохин Ю. И. // Докл. АН СССР. 1965. Т. 188. № 4. С. 807.
7. Марма А.-И. И. Дис... канд. техн. наук. Каунас: Каунасский политех. ин-т им. А. Снечкуса, 1979. 140с.
8. Машина универсальная для испытания материалов 1253У-2-2: Техническое описание и инструкция по эксплуатации 4У2. 773.050.Т0. М., 1977. 25 с.

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

Поступила в редакцию
10.II.1987

Каунасский политехнический
институт им. А. Снечкуса

ANALYSIS OF METHODS OF DETERMINATION OF KINETIC PARAMETERS OF MECHANICAL SOFTENING OF POLYMERS

Askadskii A. A., Migonene Z. B., Migonis R. B.

Summary

Various methods of experimental and calculation determination of kinetic parameters of mechanical softening of polymers are analysed. The most optimal from the view-point of duration of an experiment and accuracy of determination of kinetic parameters is the combination of two methods including measuring a family of creep and stretching (or compression) curves.