

**ДЕФОРМАЦИОННО-ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫЕ ПРОЦЕССЫ  
СИНТЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ**

*Сталевич А. М., Макаров А. Г..*

*(Санкт-Петербургский государственный  
университет технологии и дизайна)*

Применение полимерных материалов в различных отраслях техники способствует повышенному вниманию со стороны материаловедов к изучению и прогнозированию вязкоупругих свойств синтетических материалов в условиях неразрушающего механического воздействия. Математические модели, описывающие физико-механические свойства конструкционных высокоориентированных полимеров в условиях нагружения и деформирования, основаны на применении различного рода нормированных функций, выбор которых является феноменологическим. Достоинства и недостатки той или иной математической модели подтверждаются экспериментом. Наиболее употребительными при прогнозировании вязкоупругих состояний полимеров являются математические модели, использующие следующие нормированные функции: интеграл вероятностей (что соответствует нормальному распределению релаксирующих частиц по временам релаксации - для процесса релаксации или нормальному распределению запаздывающих частиц по временам запаздывания - для процесса ползучести), функция Кольрауша, гиперболический тангенс [1, 2]. В качестве аргумента у выбранных функций используется логарифм приведённого времени

$$W_a = \frac{1}{b_{n\varepsilon}} \cdot \ln \frac{t}{\tau_\varepsilon} = \frac{1}{b_{n\varepsilon}} \cdot \left( \ln \frac{t}{t_*} + \ln \frac{t_*}{\tau_\varepsilon} \right) \quad (1)$$

для процесса релаксации и

$$W_\sigma = \frac{1}{b_{n\sigma}} \cdot \ln \frac{t}{\tau_\sigma} = \frac{1}{b_{n\sigma}} \cdot \left( \ln \frac{t}{t_*} + \ln \frac{t_*}{\tau_\sigma} \right) \quad (2)$$

для процесса ползучести, где  $\tau_\varepsilon$  - время релаксации,  $\tau_\sigma$  - время запаздывания,  $t_*$  - некоторое выбранное значение базового времени,  $b_{n\varepsilon}$  и  $b_{n\sigma}$  - некоторые структурные коэффициенты, характеризующие интенсивность процессов релаксации и ползучести. Как показали исследования [1, 2], наиболее точно описывают вязкоупругие процессы математические модели, основанные на применении интеграла вероятности, что сопряжено с физической обоснованностью применения нормального распределения числа релаксирующих или запаздывающих частиц по логарифмическо-временной шкале. В целях наиболее достоверного прогнозирования вязкоупругих состояний желательно иметь несколько независимых друг от друга математических моделей, описывающих вязкоупругие процессы. При этом, наиболее близкими к математическим моделям

$$E_{\varepsilon t} = E_0 - (E_0 - E_\infty) \cdot \varphi_\varepsilon \quad (3)$$

для процесса релаксации и

$$D_{\sigma t} = D_0 + (D_\infty - D_0) \cdot \varphi_\sigma \quad (4)$$

для процесса ползучести, являются математические модели, использующие функцию нормированный арктангенс логарифма

$$\varphi_{\sigma} = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \cdot \arctg(W_{\sigma}) \quad (5)$$

и

$$\varphi_{\sigma} = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \cdot \arctg(W_{\sigma}). \quad (6)$$

Рассмотрим применение указанной математической модели на примере расчёта деформационно-восстановительных процессов. Данные процессы являются частным случаем более общего процесса нелинейно-наследственной ползучести, описываемого [2] каноническим уравнением состояния, учитывающим кинетическую природу процессов деформирования

$$\varepsilon_t = D_0 \sigma_t + (D_{\infty} - D_0) \cdot \int_0^t \sigma_{t-s} \cdot \phi'_{\sigma s} ds, \quad (7)$$

где  $D_0$  - начальная упругая податливость, а  $D_{\infty}$  - предельно-равновесная податливость.

Аналитически простейшие деформационно-восстановительные процессы с чередованием нагрузки и разгрузки можно описать следующим образом:

а). процесс с полной разгрузкой (рис.1)

$$\sigma_t = \begin{cases} \sigma_1, & 0 < t < t_1, \\ 0, & t_1 < t < t_2, \end{cases} \quad (8)$$

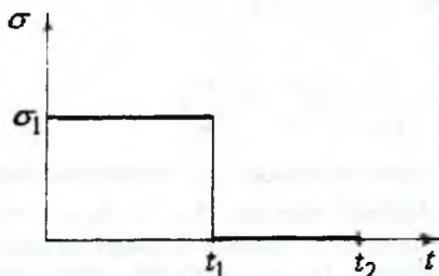


Рис.1. Деформационно-восстановительный процесс с полной разгрузкой.

б). процесс с частичной разгрузкой (рис.2)

$$\sigma_t = \begin{cases} \sigma_1, & 0 < t < t_1, \\ \sigma_2, & t_1 < t < t_2. \end{cases} \quad (9)$$

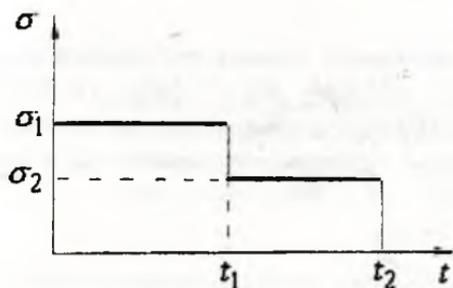


Рис.2. Деформационно-восстановительный процесс с частичной разгрузкой.

Рассмотрим деформационно-восстановительный процесс с полной и с половинной разгрузкой на примере синтетической нити лавсан с линейной плотностью 114 текс, разрывным напряжением  $\sigma_p = 830 \text{ МПа}$ , разрывной деформацией  $\varepsilon_p = 11,5\%$ .

Предварительно определим основные параметры процесса ползучести по разработанной методике [3, 4], для чего используем следующие исходные данные:

$$T = 40^\circ \text{C}, \quad \left. \frac{\partial \sigma}{\partial \ln t} \right|_T = 0,0128 \text{ ГПа}^{-1}; \quad D_T = 0,171 \text{ ГПа}^{-1}; \quad \sigma_* = 0,146 \text{ ГПа}^{-1};$$

$t_* = 60 \text{ с}$ . В результате получены следующие вязкоупругие характеристики:

- начальная податливость  $D_0 = 0,092 \text{ ГПа}^{-1}$ ,
- предельно-равновесная податливость  $D_\infty = 0,250 \text{ ГПа}^{-1}$ ,
- сило-временная функция (рис.3),
- параметр интенсивности  $b_{n\sigma} = 3,95$ .

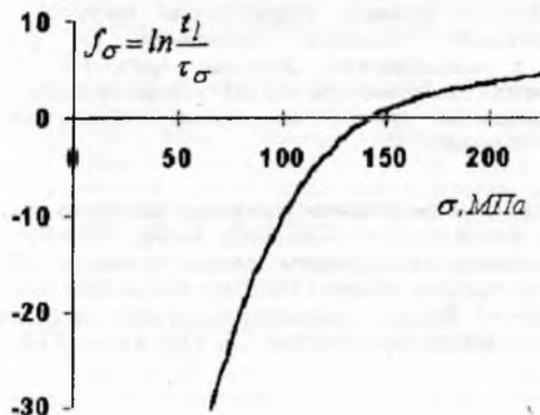
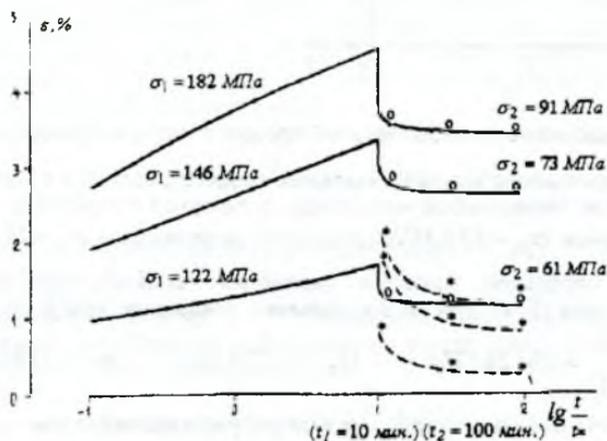


Рис.3. Сило-временная функция синтетической нити лавсан 114 текс.

Расчёт деформационно-восстановительного процесса для значений напряжения  $\sigma_1 = 182 \text{ МПа}$ ,  $\sigma_2 = 91 \text{ МПа}$ , ( $\sigma_1 = 146 \text{ МПа}$ ,  $\sigma_2 = 73 \text{ МПа}$ ), ( $\sigma_1 = 122 \text{ МПа}$ ,  $\sigma_2 = 61 \text{ МПа}$ ),  $t_1 = 10 \text{ мин.}$ ,  $t_2 = 100 \text{ мин.}$  проведён численным интегрированием уравнения (7) согласно разработанным методикам интегрирования [2] и показан на рис.4.



**Рис.4.** Деформационно-восстановительный процесс синтетической нити лавсан 114 текс, при полной (пунктир) и частичной (сплошная линия) разгрузке (расчётные точки: \* - полная разгрузка (8), о - частичная разгрузка (9)).

Как видно из приведённого примера, разработанная методика описания деформационно-восстановительного процесса, основанная на применении математической модели с нормированной функцией арктангенс логарифма достаточно хорошо согласуется с экспериментом, что даёт основание сделать вывод о целесообразности её применения при прогнозировании сложных нелинейно-наследственных процессов ползучести.

#### Литература:

1. Сталевич А.М. Деформирование высокоориентированных полимеров. Ч.1. Теория линейной вязкоупругости: Конспект лекций/ СПбГУТИД. - С.-Пб., 1995. -80 с.
2. Сталевич А.М. Деформирование высокоориентированных полимеров. Ч.2. Теория нелинейной вязкоупругости: Конспект лекций/ СПбГУТИД. -С.-Пб., 1997.-136 с.
3. Сталевич А.М., Макаров А.Г. Вариант наследственных ядер запаздывания и релаксации текстильных материалов//Вестник СПГУТИД, вып.3, СПб., 1999. - с.34-40.