

УДК 539.434:677.494

**УПРУГИЕ КОМПОНЕНТЫ ДИАГРАММЫ РАСТЯЖЕНИЯ
СИНТЕТИЧЕСКОЙ НИТИ**

А.М. СТАЛЕВИЧ, А.Г. МАКАРОВ, Е.Д. САИДОВ

(Санкт-Петербургский государственный университет технологии и дизайна,
Институт проблем машиноведения РАН)

Среди различных характеристик физико-механических свойств синтетических нитей наибольшая информация содержится в деформационных и энергетических компонентах. В силу же наибольшей доступности чаще всего используется работа деформирования, вычисляемая по полной диаграмме растяжения [1]. Однако для условий эксплуатации изделий характерна лишь начальная зона деформирования, где существенного накопления микроразрушений не происходит. В силу этого более объективными следует считать физико-механические характеристики, определяемые по измерениям именно в этой зоне механических воздействий. Это прежде всего упругая и запаздывающая компоненты деформации и потенциальная, и рассеивающая компоненты механической работы.

Целью работы является определение этих компонент, которые находятся как по диаграммам растяжения, так и прямым расчетным прогнозированием по параметрам нелинейно-вязкоупругой математической модели как физико-механическим характеристикам, которые определяются по кратковременным "семействам" релаксации и ползучести [2].

Процесс деформирования синтетической нити с заданной скоростью $\dot{\epsilon}$ в виде начальной стадии диаграммы растяжения (рис.1 – разложение полной работы на упругую составляющую и на составляющую

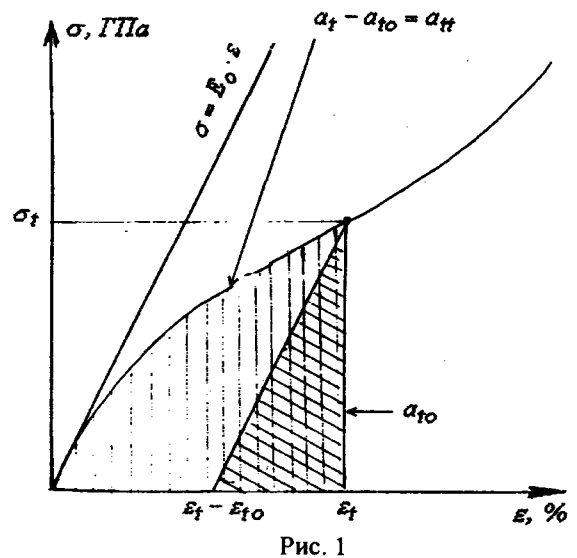


Рис. 1

рассеяния) аналитически описывается феноменологическим интегральным уравнением нелинейно-наследственного типа [3]:

$$\sigma_t = E_0 \epsilon_t - (E_0 - E_\infty) \int_0^t \epsilon_{t-s} \varphi'_{es} ds, \quad (1)$$

где $E_{\epsilon_t} = E_0 - (E_0 - E_\infty) \varphi_{\epsilon_s}$ – релаксирующий модуль; E_0 и E_∞ – модули упругости и вязкоупругости; φ_{ϵ_s} – нормированная релаксирующая функция; $\epsilon_t = \dot{\epsilon}t$ и σ_t – координаты точки на диаграмме растяжения; $\epsilon_{t-s} = \dot{\epsilon}(t-s)$ – деформация под интегралом.

В связи с тем, что все параметры и функции, входящие в (1), имеют вполне

определенный физический смысл, уравнение (1) можно считать математической моделью физико-механических свойств нити с конкретной спектральной интерпретацией [4].

Как в общем случае, когда $\dot{\varepsilon} \neq \text{const}$, так и в частном случае, когда $\dot{\varepsilon} = \text{const}$, упругий компонент деформации можно определить по формуле

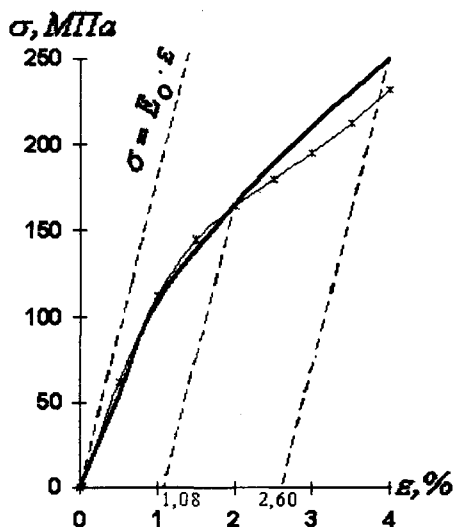


Рис. 2

$$\varepsilon_{t0} = E_0^{-1} \sigma_t, \quad (2)$$

либо расчетным прогнозом исходя из (2) и (1):

$$a_t = 0,5E_0\varepsilon_t^2 - \dot{\varepsilon}(E_0 - E_\infty) \int_0^t \int_0^t \varepsilon_{t-s} \varphi'_{\varepsilon s} ds dt. \quad (7)$$

Потенциальная (упругая) компонента удельной механической работы

$$a_{t0} = 0,5E_0^{-1}\sigma_t^2. \quad (8)$$

Уруго-потенциальная доля механической работы определяется соответственно либо для заданной точки диаграммы с координатами ε_t и σ_t :

$$\frac{a_{t0}}{a_t} = \frac{E_0^2\varepsilon_t^2 + \left(\int_0^t \varepsilon_{t-s} E'_{\varepsilon s} ds \right)^2 + 2\varepsilon_t E_0 \int_0^t \varepsilon_{t-s} E'_{\varepsilon s} ds}{E_0^2\varepsilon_t^2 + 2\dot{\varepsilon}E_0 \int_0^t \int_0^t \varepsilon_{t-s} E'_{\varepsilon s} ds dt} =$$

$$\varepsilon_{t0} = \varepsilon_t - \left(1 - E_\infty E_0^{-1} \right) \int_0^t \varepsilon_{t-s} \varphi'_{\varepsilon s} ds. \quad (3)$$

Выделение упругой компоненты деформации показано на рис.2, где изображена диаграмма растяжения синтетической нити лавсан 114 текс, $t = 40^\circ\text{C}$, $\dot{\varepsilon} = 0,083\text{c}^{-1}$ (сплошная линия – эксперимент, * – расчет).

Относительная доля упругой компоненты соответственно

$$\varepsilon_{t0}\varepsilon_t^{-1} = E_0^{-1}\sigma_t\varepsilon_t^{-1} \quad (4)$$

или

$$\varepsilon_{t0}\varepsilon_t^{-1} = 1 - \left(1 - E_\infty E_0^{-1} \right) \varepsilon_t^{-1} \int_0^t \varepsilon_{t-s} \varphi'_{\varepsilon s} ds. \quad (5)$$

При расчетах по (2...5) использовали вязкоупругие характеристики E_0 , E_∞ и другие, получаемые экспресс-методом [2].

К заданной точке диаграммы растяжения с координатами ε_t и σ_t удельная механическая работа (на единицу объема) вычисляется по формуле

$$a_t = \int_0^{\varepsilon_t} \sigma_t d\varepsilon \quad (6)$$

или с учетом (1) из (6) получаем выражение для прогноза:

$$\frac{a_{t0}}{a_t} = \frac{\sigma_t^2}{2E_0 \int_0^{\varepsilon_t} \tilde{\sigma}_t d\varepsilon}, \quad (9)$$

либо прогнозом по (9) с помощью (1):

$$= \frac{\varepsilon_t^2 + (1-c)^2 \left(\int_0^t \varepsilon_{t-s} \varphi'_{\varepsilon s} ds \right)^2 + 2\varepsilon_t (1-c) \int_0^t \varepsilon_{t-s} \varphi'_{\varepsilon s} ds}{\varepsilon_t^2 + 2\varepsilon_t (1-c) \int_0^t \int_0^s \varepsilon_{t-s} \varphi'_{\varepsilon s} ds dt}, \quad (10)$$

где $c = \frac{E_\infty}{E_0}$.

Рассеивающаяся часть удельной механической работы

$$a_{\text{и}} = a_t - a_{t0} \quad (11)$$

или ее относительная часть

$$\frac{a_{\text{и}}}{a_t} = 1 - \frac{a_{t0}}{a_t} \quad (12)$$

также определяются любым из указанных двух способов.

римент, * – расчет).

Например, расчет полной работы, упругой компоненты и соответственно энергии рассеяния для эталонного образца – синтетической нити лавсан 114 текс при $t = 40^\circ\text{C}$, где в качестве значения $\varepsilon_t = \varepsilon_1$ взяты соответственно 2 и 4%, $\dot{\varepsilon} = 0,083\text{c}^{-1}$ (рис.2), а в качестве нормированной функции $\varphi_{\varepsilon t}$ – нормированный арктангенс логарифма приведенного времени (НАЛ), дает следующие результаты: $E_0 = 17,9$ ГПа, $E_\infty = 2,5$ ГПа, откуда при $\varepsilon_t = 2\%$: $\varepsilon_t - \varepsilon_0 = 1,08\%$, $a_{t0} = 0,759$ МПа, $a_t = 1,86$ МПа, $a_{\text{и}} = 1,10$ МПа, при $\varepsilon_t = 4\%$: $\varepsilon_t - \varepsilon_0 = 2,60\%$, $a_{t0} = 1,750$ МПа, $a_t = 5,42$ МПа, $a_{\text{и}} = 3,67$ МПа.

Аналогичные данные получаются для других температур: при $T = 20^\circ\text{C}$: $E_0 = 18,1$ ГПа, $E_\infty = 2,8$ ГПа, при $T = 60^\circ\text{C}$: $E_0 = 16,7$ ГПа, $E_\infty = 2,2$ ГПа, при $T = 80^\circ\text{C}$: $E_0 = 14,8$ ГПа, $E_\infty = 1,8$ ГПа. Исследование синтетической нити нитрон 33,3 текс при $T = 40^\circ\text{C}$ дает $E_0 = 7,62$ ГПа, $E_\infty = 1,78$ ГПа.

Из графиков зависимости доли потенциальной упругой компоненты в механической работе деформирования нити (рис.3) следует, что доля потенциальной компоненты в механической работе уменьшается с ростом деформации ε . Это означает, что материалу для возвращения в исходное состояние в силу закона сохранения энергии потребуется передать из внешней среды тем больше (в процентном отношении) энергии, чем на большую величину его деформировали. С другой стороны, увеличение доли компоненты $a_{\text{и}}$ в механической работе с ростом деформации говорит об усилении роли вязкоупругого фактора по мере увеличения деформации. Аналогичным образом (рис.3) строятся зависимости, получаемые по формулам (4) и (5).

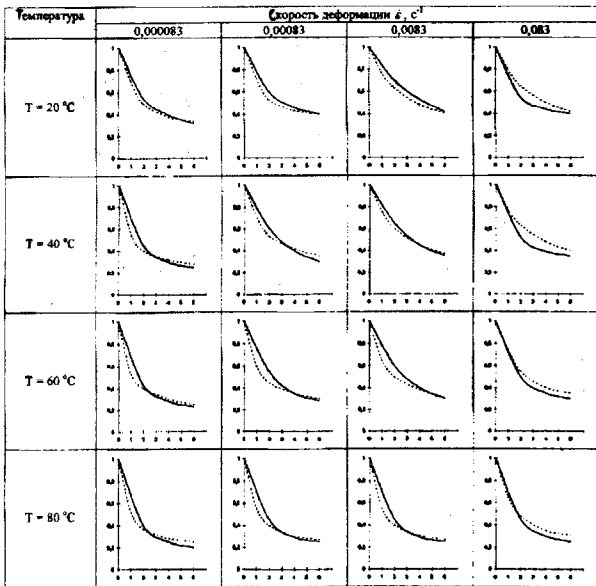


Рис. 3

Результаты расчетов по (9) и (10) представлены на рис.3: доля упругой компоненты механической работы $\frac{a_{t0}}{a_t}$ (ось ординат) при деформировании нити ПЭТФ (лавсан) 114 текс в зависимости от деформации $\varepsilon, \%$ (ось абсцисс) для различных значений скорости деформирования $\dot{\varepsilon}$ и температуры T (сплошная линия – экспе-

Предложены методики получения из диаграмм растяжения или расчетным прогнозированием упругих компонент деформации и механической работы на стадии неразрушающего механического воздействия. Близость значений упругих компонент, получаемых по измеряемой или прогнозируемой диаграмме растяжения, подтверждает вполне удовлетворительную надежность моделирования физико-механических свойств нити в виде нелинейно-наследственного уравнения (1).

1. Кукин Г.Н., Соловьев А.Н., Кобляков А.И. Текстильное материаловедение (волокна и нити). – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Легпромбытиздат, 1989.
2. Сталевич А.М. // Проблемы прочности. – 1981, № 12. С.95...98.
3. Сталевич А.М. // Изв. вузов. Технология легкой промышленности. – 1989, № 3. С. 23...29.
4. Сталевич А.М., Макаров А.Г. // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2000, №3. С. 8...13.

Рекомендована кафедрой сопротивления материалов СПГУТД. Поступила 10.01.02.