

УДК 539.434:677.494

**СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ВЯЗКОУПРУГОСТИ  
ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ***А.В. ДЕМИДОВ, А.Г. МАКАРОВ, А.М. СТАЛЕВИЧ***(Санкт-Петербургский государственный университет технологии и дизайна)**

Всестороннее, комплексное исследование механических свойств текстильных материалов и прогнозирование деформационных процессов возможно только на основе системного анализа его вязкоупругих свойств, включающего в себя: экспериментальные исследования; построение математической модели вязкоупругости, наиболее адекватно отражающей деформационные свойства текстильного материала; определение вязкоупругих параметров текстильного материала; моделирование деформационных процессов. Внедрению разработанных методик системного анализа вязкоупругости текстильных материалов способствует компьютеризация расчетов.

Важными механическими характеристиками полимерных текстильных материалов являются его упругие и деформационные свойства, определяющие способность материала изменять форму под воздействием нагрузки и восстанавливаться после ее снятия. Для определения механических характеристик необходимо построение математической модели, отражающей физический смысл и концептуальные закономерности механического поведения полимера.

Желательно построение такой математической модели, которая позволяла бы не только с достаточной степенью точности определять механические характеристики полимера, но и была бы наиболее простой из возможных вариантов, а также включала минимум физически обоснованных па-

раметров.

После составления математической модели, при наличии необходимых экспериментальных данных, переходят к процедуре определения механических характеристик с помощью численных методов. На этом этапе особую актуальность приобретает компьютеризация вычислений, позволяющая уменьшить трудоемкость и повысить точность расчетов. Расчетные значения механических характеристик подлежат проверке путем сравнения с экспериментальными данными. По величине отклонения расчетных значений от экспериментальных данных делается вывод о пригодности математической модели для конкретного полимерного материала.

Следующим шагом является прогнозирование деформационных процессов полимеров на основе определенных ранее механических характеристик. Расчетное прогнозирование позволяет дать рекомендации по применимости полимерных материалов и оказывает влияние на отбор образцов, обладающих необходимыми качествами.

Математическое моделирование механических свойств полимеров полезно сочетать с разработкой критериев достоверности определения механических характеристик и надежности прогнозирования деформационных процессов. Указанные критерии с целью контроля прогнозирования применяются как на этапе моделирования – для наилучшего составления математической модели, так и на этапе расчета –

для определения погрешности прогнозирования.

Основными механическими характеристиками текстильных материалов, подлежащими определению, являются параметры процессов релаксации и ползучести [1], [2]. К параметрам релаксации относятся: модуль релаксации  $E(\varepsilon, t)$ , зависящий от деформации  $\varepsilon$  и от времени  $t$ , со своими асимптотическими значениями – модулем упругости  $E_0$  и модулем вязкоупругости  $E_\infty$ , времена релаксации  $\tau_\varepsilon = \tau(\varepsilon)$ , представляющие некоторую функцию деформации, и коэффициент интенсивности процесса релаксации  $b_\varepsilon$ .

Для удобства учета, как достаточно малых, так и достаточно больших значений времени, при построении математической модели пользуются логарифмическо-временной шкалой, перейдя к безразмерному значению времени  $t/t_1$ , где  $t_1$  – некоторое базовое значение времени.

Учитывая убывающий характер модуля релаксации, простейшую математическую модель релаксации можно описать следующим уравнением [3]:

$$E(\varepsilon, t) = E_0 - (E_0 - E_\infty)\phi(\varepsilon, t), \quad (1)$$

где в качестве  $\phi(\varepsilon, t)$  выбирается некоторая нормированная возрастающая функция, включающая в неявном виде времена релаксации  $\tau_\varepsilon$  и коэффициент интенсивности процесса  $1/b_\varepsilon$ .

Функция  $\phi(\varepsilon, t)$  должна хорошо согласовываться с экспериментом, а поэтому быть физически обоснованной. Так, например, для моделирования процесса релаксации синтетических нитей широко применяется в качестве функции  $\phi(\varepsilon, t)$  интеграл вероятности, задающий нормальное распределение релаксирующих частиц по временам релаксации.

Авторами был предложен вариант функции  $\phi(\varepsilon, t)$  в виде нормированного арктангенса логарифма приведенного времени (НАЛ) [4]:

$$\phi(\varepsilon, t) = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \operatorname{arctg} \left( \frac{1}{b_\varepsilon} \ln \frac{t}{\tau_\varepsilon} \right) \quad (2)$$

и показаны преимущества ее применения для моделирования свойств текстильных материалов сложной макроструктуры (пряжи, тканей, лент и т.п.), характеризующимися расширенным распределением релаксирующих частиц по сравнению с синтетическими нитями.

Аналогично процесс ползучести определяется: податливостью  $D(\sigma, t)$ , зависящей от напряжения  $\sigma$  и от времени  $t$ , асимптотическими значениями – начальной  $D_0$  и предельно-равновесной  $D_\infty$  податливостью, временами запаздывания  $\tau_\sigma = \tau(\sigma)$  и коэффициентом интенсивности процесса ползучести  $1/b_\sigma$ .

Так как податливость представляет собой возрастающую функцию, простейшая математическая модель ползучести описывается уравнением [3]:

$$D(\sigma, t) = D_0 + (D_\infty - D_0)\phi(\sigma, t), \quad (3)$$

где в качестве функции  $\phi(\sigma, t)$  для описания ползучести синтетических нитей часто выбирается интеграл вероятностей, а для полимерных материалов сложной макроструктуры, преимущественно использовать функцию НАЛ:

$$\phi(\sigma, t) = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \operatorname{arctg} \left( \frac{1}{b_\sigma} \ln \frac{t}{\tau_\sigma} \right). \quad (4)$$

Для математического моделирования релаксации и ползучести могут применяться и другие нормированные функции  $\phi(\varepsilon, t)$  и  $\phi(\sigma, t)$  [3]. Большое разнообразие применяющихся функций положительно сказывается на точности прогнозирования. Критерием подбора функции является степень отклонения расчетных значений по математической модели (1) и (3) от эксперимента.

Кривые "семейства" релаксации, полученные при разных значениях деформации

ции, можно параллельным сдвигом вдоль логарифмическо-временной шкалы на величину  $\ln(\tau_\varepsilon/t_1)$  наложить на обобщенную кривую модуля релаксации  $E(\varepsilon, t)$ , аппроксимированного математической моделью (1). Данное преобразование "семейства" релаксации основано на так называемой деформационно-временной аналогии [3]. По величине указанных сдвигов определяется функция  $\ln(\tau_\varepsilon/t_1)$ , задающая, по сути, времена релаксации  $\tau_\varepsilon$ . Структурный параметр интенсивности процесса релаксации  $1/b_\varepsilon$  определяется как коэффициент подобия обобщенной кривой модуля релаксации и нормированной функции НАЛ. Расположение обобщенной кривой модуля релаксации  $E(\varepsilon, t)$  позволяет определить асимптотические значения  $E_0$  и  $E_\infty$ .

Таким образом, задание математической модели релаксации (1) позволяет по экспериментальному "семейству" релаксации определить основные характеристики процесса релаксации, которые в дальнейшем используются для прогнозирования деформационных процессов.

Аналогично по экспериментальному "семейству" ползучести определяются параметры процесса ползучести: асимптотические значения  $D_0$  и  $D_\infty$ , параметр интенсивности процесса  $1/b_\sigma$  и функция времен запаздывания  $\ln(\tau_\sigma/t_1)$ .

Достоверность определения рассмотренных механических характеристик проверяется контрольным пересчетом модуля релаксации и податливости по формулам (1), (3) и сопоставлением полученных значений с экспериментальными данными.

На основе вычисленных механических характеристик текстильных материалов проводится прогнозирование деформационных процессов. Для этого пользуются численными методами решения интегральных уравнений Больцмана-Вольтерра наследственного типа [3].

Прогнозирование деформационных процессов играет важную роль при исследовании механических свойств полимер-

ных материалов, применяемых в различных отраслях промышленности. Среди деформационных процессов наиболее часто встречаются деформационно-восстановительные процессы, а также процессы прямой и обратной релаксации.

Деформационно-восстановительный процесс характеризуется заданием функции напряжения  $\sigma(t)$  и является частным случаем процесса нелинейно-наследственной ползучести. Как правило, функция напряжения  $\sigma(t)$  задается в ступенчатом виде с чередованием нагрузки и разгрузки. Процессы прямой и обратной релаксации характеризуются заданием функции деформации  $\varepsilon(t)$  и являются частным случаем процесса нелинейно-наследственной релаксации.

Проверка работоспособности моделей прогнозирования деформационных процессов проводится, как правило, на простейших процессах растяжения с постоянной скоростью деформирования  $\dot{\varepsilon}$  посредством построения экспериментальных диаграмм растяжения. По степени совпадения расчетных значений диаграммы с экспериментальными данными делается вывод о применимости указанной математической модели. Сравнение расчетных значений деформации и напряжения с экспериментальными данными для более сложных деформационных процессов повышает степень надежности прогнозирования.

Следует заметить, что эффективность применения методик системного анализа вязкоупругости текстильных материалов повышается с внедрением компьютеризации расчетов [5].

## ВЫВОДЫ

1. Комплексное исследование механических свойств текстильных материалов и прогнозирование деформационных процессов возможно только с позиции системного анализа вязкоупругости полимеров.

2. При определении механических характеристик текстильных материалов и прогнозирования их деформационных

процессов немаловажную роль играет удачный выбор математической модели. Если деформационные процессы одной группы текстильных материалов точнее прогнозируются с использованием некоторой математической модели, то для другой группы материалов может оказаться предпочтительнее применение другой математической модели. Поэтому чем шире набор предлагаемых математических моделей и соответствующих им методик, тем точнее могут быть определены механические характеристики полимеров и тем точнее будет прогноз деформационных процессов.

3. Немаловажную роль как в выборе математической модели, так и в прогнозировании механических свойств текстильных материалов играет компьютеризация расчетов, способствующая выходу на бо-

лее высокий уровень исследования свойств указанных материалов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Алфрей Т.* Механические свойства высокополимеров. – М., 1952.
2. *Кукин Г.Н., Соловьев А.Н., Кобляков А.И.* Текстильное материаловедение. – М., 1989.
3. *Сталевич А.М.* Деформирование ориентированных полимеров. – СПб., 2002.
4. *Макаров А.Г.* Прогнозирование деформационных процессов в текстильных материалах. – СПб., 2002.
5. *Макаров А.Г.* Математические методы анализа физико-механических свойств материалов легкой промышленности. – СПб., 2002.

Рекомендована кафедрой сопротивления материалов. Поступила 01.12.06.

---