

УДК 539.434:677.494

**МЕТОДЫ КОМПЬЮТЕРНОГО АНАЛИЗА
ВЯЗКОУПРУГОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ ТКАНЕЙ***А.В. ДЕМИДОВ, А.Г. МАКАРОВ, А.М. СТАЛЕВИЧ***(Санкт-Петербургский государственный университет технологии и дизайна)**

Основу исследования механических свойств технических тканей, изготовленных из современных полимерных материалов, составляют феноменологические теории, базирующиеся на эксперименте [1] при учете активирующего влияния механического воздействия в зоне действия неразрушающих нагрузок и деформаций. При этом важными деформационными характеристиками, наряду с релаксирующим модулем и податливостью, признаны времена релаксации и запаздывания [2], которые не могут быть определены только из эксперимента. Для их определения требуется математическое моделирование процесса вязкоупругости.

Наиболее простые математические модели релаксации и ползучести строились на общепринятом и физически обоснованном нормальном распределении релаксирующих и запаздывающих частиц по временам релаксации и запаздывания, характеризующим спектр релаксации и запаздывания [3]. В качестве временной шкалы для удобства использовалась полулогарифмическая шкала приведенного безразмерного времени, хорошо отражающая как большие, так и малые времена.

Методики определения механических характеристик и дальнейшего прогнозирования деформационных процессов, основанные на нормальном распределении, успешно применялись к материалам простой макроструктуры, например, к вискознославсановым тканям [4]. Однако с усложнением макроструктуры полимерных материалов происходило и изменение вида распределения – спектры релаксации и запаздывания отражали это усложнение,

становились более "растянутыми" и менее ярко выраженными.

Для описания указанных спектров требовалось применение иного распределения, чем нормальное. Такое распределение должно обладать как внешним сходством с нормальным распределением, так и замедленным убыванием определяющей его плотности при удалении в область больших и малых времен в полулогарифмической временной шкале. Спектрам указанного вида, как было показано экспериментально, соответствует вероятностное распределение Коши, интегральная функция которого есть нормированный арктангенс логарифма приведенного времени (НАЛ) [5].

Таким образом, полимерные материалы и, в частности, синтетические ткани, можно разделить на две группы. К первой группе относятся материалы с относительно простым макростроением, спектры релаксации и запаздывания у которых соответствуют нормальному распределению. Ко второй группе относятся материалы с более сложным макростроением, спектры релаксации и запаздывания у которых хорошо описываются производной функции НАЛ.

Увеличение разновидности полимерных материалов и усложнение их макроструктуры ведет к увеличению второй группы материалов, что определяет актуальность математического моделирования вязкоупругих свойств с использованием распределения релаксирующих и запаздывающих частиц по закону НАЛ.

Исследования лаборатории механики ориентированных полимеров СПГУТД,

относящиеся к определению механических характеристик и прогнозированию деформационных процессов вискозно-лава-новских тканей [3], были продолжены при изучении вязкоупругих свойств синтетических тканей технического назначения, применяемых в спецодежде [6].

Синтетические ткани для спецодежды имеют в основном сложное макростроение, поэтому их можно отнести к материалам второй группы. В силу главной задачи спецодежды – обеспечения безопасности и защиты человека от вредных воздействий указанные синтетические ткани должны обладать определенными механическими свойствами.

К факторам, способным причинить вред организму человека, можно отнести ряд механических воздействий, например, удары, воздействия нагрузки и деформации. В настоящее время особое внимание уделяется разработке и производству тканей для спецодежды, обладающих определенными защитными свойствами, что повышает актуальность изучения механиче-

ских характеристик указанных материалов и прогнозирования деформационных процессов с их участием.

Иллюстрируя использование функции НАЛ для моделирования вязкоупругости плащевой ткани с полиэфирным волокном с водоотталкивающей отделкой [7], применяемой в качестве материала верха противоударного подшлемника, предназначенного для защиты головы человека от случайно падающих предметов, получаем следующие деформационные характеристики: модуль упругости $E_0 = 5,93$ ГПа; модуль вязкоупругости $E_\infty = 0,82$ ГПа; коэффициент интенсивности процесса релаксации $1/b_{п\epsilon} = 0,043$; функцию времен релаксации τ_ϵ (рис. 1); спектр релаксации \bar{H} (рис. 3); начальную податливость $D_0 = 0,17$ ГПа⁻¹; предельно-равновесную податливость $D_\infty = 1,22$ ГПа⁻¹; коэффициент интенсивности процесса ползучести $1/b_{п\sigma} = 0,139$; функцию времен запаздывания τ_σ (рис. 2); спектр запаздывания \bar{Q} (рис. 4).

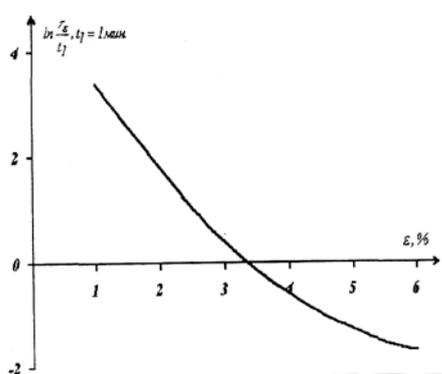


Рис. 1

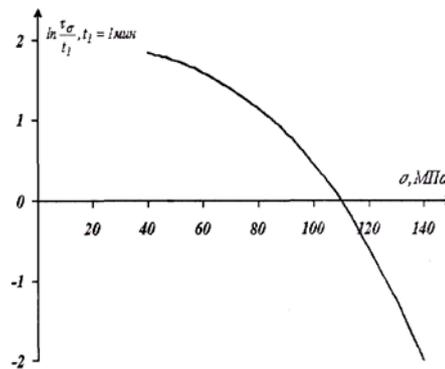


Рис. 2

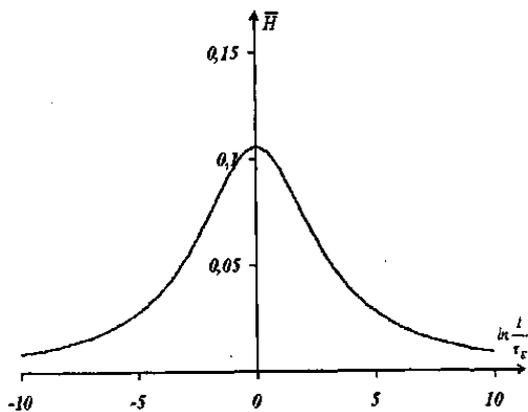


Рис. 3

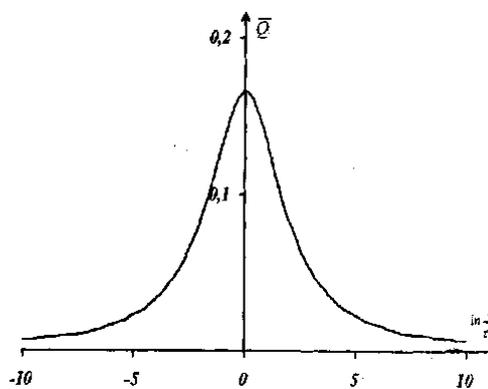


Рис. 4

Рассчитанные деформационные характеристики плащевой ткани далее применяются при прогнозировании вязкоупругих процессов, например, деформационно-восстановительных процессов и процессов обратной релаксации, как численное решение интегральных уравнений Больцмана-Вольтерра [8].

Прогнозирование деформационно-восстановительных процессов и процессов обратной релаксации приобретает особую актуальность при исследовании деформационных свойств материалов для спецодежды. Методики прогнозирования вязкоупругих процессов являются аппаратом исследования свойств указанных материалов как средства защиты от опасных механических воздействий. Ударно-защитное предназначение рассматриваемой плаще-

вой ткани определило первостепенную роль в исследовании ее механических характеристик, особенно ее упругих свойств.

Моделирование процессов деформирования тканей, основы которого изложены в [4], позволяет перейти к анализу энергетических характеристик. С этой целью производится выделение упругих компонент деформации и механической работы деформирования, определяющих упруго-восстановительные свойства ткани. Воспользуемся для этого прогнозом процесса растяжения ткани с постоянной скоростью деформирования $\dot{\varepsilon}$ [9].

Упругий компонент деформации ε_{t0} для значения полной деформации ε_t и напряжения σ_t определяется по формуле

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

где $\phi'_{\varepsilon t} = \frac{\partial \phi_{\varepsilon t}}{\partial t}$ – производная функции НАЛ.

Затем определяется удельная механическая работа деформирования (на единицу объема):

$$a_t = \int_0^{\varepsilon_t} \sigma_t d\varepsilon = 0,5 E_0 \varepsilon_t^2 - \dot{\varepsilon} \left(E_0 - E_\infty\right) \int_0^t \int_0^t \varepsilon_{t-s} \phi'_{\varepsilon s} ds dt, \quad (2)$$

ее упругий $a_{t0} = 0,5 E_0^{-1} \sigma_t^2$ и рассеивающий $a_{tt} = a_t - a_{t0}$ компонент.

Расчет компонент удельной механической работы и компонент деформации плащевой ткани приведен в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

$\varepsilon_t, \%$	$\varepsilon_{t0}, \%$	$\varepsilon_t - \varepsilon_{t0}, \%$	$a_t, \text{ГПа}$	$a_{t0}, \text{ГПа}$	$a_{tt}, \text{ГПа}$
2	1,43	0,57	0,91	0,56	0,35
4	2,23	1,73	2,63	1,38	1,25
6	2,91	3,09	5,47	2,43	3,04.

Как видно из табл.1, при малой деформации (2%) преобладают упругие компоненты деформации и механической работы. Доля рассеянной энергии в этом случае составляет величину 30...40%. В то же

время с увеличением деформации (6%) начинают преобладать рассеивающие компоненты механической работы деформирования, характеризующие вязкоупругую и пластическую составляющие деформации.

Исследование упругих и рассеивающихся компонент механической работы деформирования позволяет проанализировать вязкоупругие свойства материалов, применяемых в ударозащитных подшлемниках. В данном случае важно, насколько защитный материал может погасить ударное механическое воздействие.

В связи с этим необходимо отметить, как положительный момент, увеличение доли рассеивающейся составляющей механической энергии деформирования при

увеличении деформации. В то же время при небольшой деформации преобладание упругих компонент деформации и энергии деформирования приводит к тому, что материал хорошо восстанавливается и пригоден для дальнейшего использования.

С целью контроля прогнозирования вязкоупругости разработаны интегральные критерии правдоподобия определяемых вязкоупругих характеристик [10]:

$$E_0 D_{\sigma t} + \int_0^t D_{\sigma \theta} E'_{\varepsilon; t-\theta} d\theta = 1, \quad (3)$$

$$D_0 E_{\varepsilon t} + \int_0^t E_{\varepsilon \theta} D'_{\sigma; t-\theta} d\theta = 1, \quad (4)$$

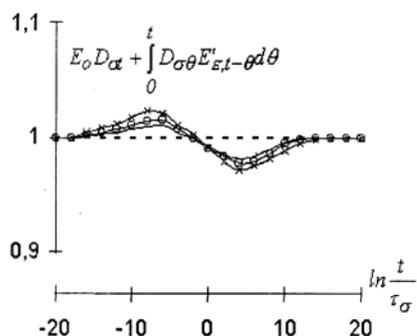


Рис. 5

позволяющие контролировать как точность их определения, так и достоверность прогнозирования деформационных процессов (здесь $E'_{\varepsilon t} = \frac{\partial E_{\varepsilon t}}{\partial t}$, $D'_{\sigma t} = \frac{\partial D_{\sigma t}}{\partial t}$ – производные релаксирующего модуля $E_{\varepsilon t}$ и податливости $D_{\sigma t}$

Применение критериев к рассматриваемой плащевой ткани подтверждает гипотезу о распределении НАЛ релаксирующих и запаздывающих частиц (рис. 5 – критерия (3) к плащевой ткани: ---- – $\sigma = 82$ МПа; --o-- – $\sigma = 114$ МПа; ---- – $\varepsilon = 136$ МПа; рис. 6 – критерия (4) к плащевой ткани: ---- – $\varepsilon = 5\%$; --o-- – $\varepsilon = 3\%$; ---- – $\varepsilon = 1\%$), а также достоверность определения среднестатистических времен релаксации и запаздывания.

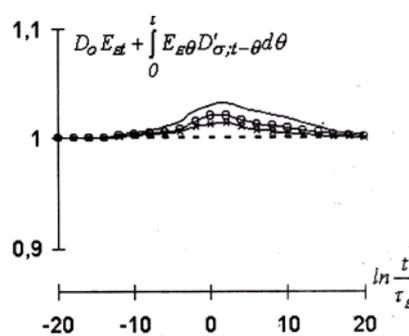


Рис. 6

Указанные интегральные критерии являются удобным средством наилучшего выбора нормированной функции из числа предложенных – по величине отклонения интегральных кривых, соответствующих левым частям уравнений (3), (4) от значения единицы.

Интегральные критерии (3) и (4) носят универсальный характер, так как, с одной стороны, являются критериями достоверности выбора нормированных функций релаксации и ползучести, а с другой – являются критериями правдоподобия определяемых вязкоупругих характеристик.

В связи с тем, что определение механических характеристик полимерных материалов и прогнозирование деформационных процессов становятся точнее и проще с применением вычислительной техники

большое внимание уделяется компьютеризации расчетов.

Моделирование вязкоупругих свойств получило дальнейшее развитие в виде компьютеризации методик, что позволило автоматизировать процесс вычисления. Компьютеризация вычислений позволяет произвести наилучшим образом выбор математической модели для описания вязкоупругости синтетических материалов. Этот фактор способствует увеличению роли математического моделирования механических свойств, а также стимулирует переход к компьютерным технологиям прогнозирования вязкоупругости.

Применение компьютерного прогнозирования, основанного на оптимальном выборе математической модели, способствует повышению степени достоверности прогноза. Более точный расчет деформа-

ционных процессов позволяет повысить надежность их прогнозирования.

Без компьютеризации расчетов практически невозможно применение интегрального критерия достоверности определения механических характеристик синтетических материалов (3), (4). Компьютерные расчеты упрощают также процедуру нахождения спектров релаксации и запаздывания.

Методики компьютерного прогнозирования деформационных процессов и расчета механических характеристик полимерных материалов служат основой для обработки экспериментальных данных.

В заключение подчеркнем, что без математического моделирования деформационных свойств материала практически невозможно объективное решение задач по сравнительному анализу, структурной обусловленности, целенаправленному регулированию этих свойств, а также прогнозированию как кратковременных, так и длительных процессов деформирования.

ВЫВОДЫ

1. Применение математической модели с функцией НАЛ при аналитическом описании вязкоупругости синтетических тканей позволяет повысить точность расчетного прогнозирования деформационных процессов, в том числе деформационно-восстановительных и обратнорелаксационных, близких к условиям эксплуатации изделий.

2. Предлагается методика разделения механической работы деформирования на составные части: упругую и рассеивающуюся, которую, в частности, рекомендуется использовать при расчетах сопротив-

ления синтетических тканей ударной нагрузке.

3. Для повышения надежности математического моделирования предлагается использовать компьютерно-интегральный критерий при выборе варианта нормированных функций релаксации и запаздывания, что повышает достоверность решений технологических и механических задач.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Алфрей Т.* Механические свойства высокополимеров. – М.: ИЛ, 1952.
2. *Кукин Г.Н., Соловьев А.Н., Кобляков А.И.* Текстильное материаловедение (волокна и нити). – М.: Легпромбытиздат, 1989.
3. *Сталевич А.М.* // Изв. вузов. Технология легкой промышленности. – 1981, № 3. С.18...22.
4. *Лобья Л.И., Романов В.Е., Сталевич А.М.* // Изв.вузов. Технология легкой промышленности. – 1991, № 1. С.25...26.
5. *Сталевич А.М., Макаров А.Г.* // Химические волокна. – 2001, № 6. С.68...70.
6. *Сталевич А.М., Макаров А.Г., Князева К.В.* Сложные деформационные процессы в швейных материалах и их прогнозирование // В сб.: Физико-химия полимеров. Вып. 9 – Тверь: Изд-во Тверского ун-та, 2003. С. 212...215.
7. *Князева К.В., Шнеур Ю.В., Энхцацрал Т., Сталевич А.М., Макаров А.Г.* Многослойный пакет. Патент на изобретение № 2201703, зарегистрирован в Гос. реестре изобретений РФ 10 апреля 2003.
8. *Макаров А.Г., Сталевич А.М.* // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2002, № 3. С.10...13.
9. *Сталевич А.М., Макаров А.Г.* // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2002, № 4-5. С.15...18.
10. *Макаров А.Г.* // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2000, № 2. С.12...16.

Рекомендована кафедрой сопротивления материалов. Поступила 03.02.06.