СЕКЦИЯ II
МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РЕЛАКСАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ В ТРИКОТАЖНЫХ ПОЛОТНАХ ДЛЯ КОМПРЕССИОННЫХ ИЗДЕЛИЙ

Н. Л. Надежная

Учреждение образования «Витебский государственный технологический университет», Беларусь

Научные руководители: А. В. Чарковский, А. А. Кузнецов

Введение

Компрессионные трикотажные изделия предназначены для обеспечения дозированного давления на участки тела человека. Изделия данной группы являются эффективными функциональными средствами, как лечения, так и профилактики ряда заболеваний: варикозного расширения вен, последствий ожогов, послеоперационных и посттравматических отеков.

Основная характеристика компрессионных трикотажных изделий – давление, оказываемое на тело, зависит от напряжений, возникающих в трикотажном полотне при его растяжении до требуемого удлинения на теле. Проектирование компрессионных изделий обычно основывается на анализе экспериментальных зависимостей распределенной нагрузки (или напряжения) трикотажа от относительной деформации, получаемых, как правило, при постоянной скорости нарастания деформации (диаграмм растяжения) [1], [2]. Однако во время эксплуатации компрессионного изделия давление на тело не постоянно, а в течение носки уменьшается до некоторого равновесного значения. Практический интерес вызывает прогнозирование равновесного значения давления компрессионного изделия, а также его взаимосвязь с начальным значением. Вследствие этого проведение комплекса экспериментально-аналитических исследований, направленных на изучение и прогнозирование релаксационных свойств трикотажа, является актуальной научно-практической задачей.

Объекты и методики исследований

В качестве объектов при проведении исследований использовались образцы кулирных эластомерных трикотажных полотен двух вариантов, отличающихся базовым переплетением и значениями заправочных параметров петельной структуры, предназначенных для компрессионных изделий лечебно-профилактического назначения.

Испытания трикотажных полотен проводились в режимах растяжения с постоянной скоростью нарастания удлинения и релаксации напряжений при постоянном удлинении материала на автоматизированной разрывной машине «Frank» при следующих условиях: ширина образцов – 50 мм; направление растяжения – вдоль петельных рядов; зажимная длина образцов – 100 мм; скорость деформирования – 100 мм/мин.

Прогнозирование вязкоупругих свойств исследуемых трикотажных полотен осуществлялось на основе обобщенной механической модели Максвелла, характеризуемой двумя средними временами релаксации, которая состоит из трех параллельно соединенных модельных элементов: двух вязкоупругих элементов Максвелла ($E_{11} - \eta_1$ и $E_{12} - \eta_2$) и одного

упругого элемента E_2 [3], [4]. Модель позволяет учитывать составляющие напряжения, обусловленные быстропротекающими и замедленными процессами релаксации, время протекания которых меньше времени одного цикла ношения изделия.

Дифференциальное уравнение механической модели имеет следующий вид:

$$\eta_1\eta_2\left(\frac{1}{E_{11}}+\frac{1}{E_{12}}+\frac{E_2}{E_{11}E_{12}}\right)\frac{d^2\varepsilon(t)}{dt^2}+\left(\eta_1+\eta_2+E_2\left(\frac{\eta_1}{E_{11}}+\frac{\eta_2}{E_{12}}\right)\right)\frac{d\varepsilon(t)}{dt}+E_2\varepsilon(t)=$$
$$=\frac{\eta_1\eta_2}{E_{11}E_{12}}\frac{d^2\sigma(t)}{dt^2}+\left(\frac{\eta_1}{E_{11}}+\frac{\eta_2}{E_{12}}\right)\frac{d\sigma(t)}{dt}+\sigma(t). \qquad (1)$$

Решение дифференциального уравнения (1) при условии растяжения образца с постоянной скоростью нарастания удлинения $c=\varepsilon/t$ до заданного конечного значения $\varepsilon=\varepsilon_к$ и последующей релаксации напряжений имеет следующий вид:

$$\sigma(t)=\sigma_{01}e^{-\frac{t}{T_1}}+\sigma_{02}e^{-\frac{t}{T_2}}+E_2\varepsilon_к=c\eta_1(1-e^{\frac{-\varepsilon_к}{cT_1}})e^{-\frac{t}{T_1}}+c\eta_2(1-e^{\frac{-\varepsilon_к}{cT_2}})e^{-\frac{t}{T_2}}+E_2\varepsilon_к, \qquad (2)$$

где $T_1=\eta_1/E_{11}$ и $T_2=\eta_2/E_{12}$ – постоянные времени, характеризующие темп быстропротекающих и замедленных процессов релаксации напряжений соответственно; $\sigma_{01}=c\eta_1(1-e^{\frac{-\varepsilon_к}{cT_1}})$, $\sigma_{02}=c\eta_2(1-e^{\frac{-\varepsilon_к}{cT_2}})$ – составляющие напряжения, релаксирующие вследствие быстропротекающих и замедленных процессов соответственно.

При постоянной скорости нарастания удлинения $c=\varepsilon/t$ решение уравнения (1), будет иметь следующий вид:

$$\sigma(\varepsilon)=c\eta_1(1-e^{-\varepsilon\frac{E_{11}}{c\eta_1}})+c\eta_2(1-e^{-\varepsilon\frac{E_{12}}{c\eta_2}})+E_2\varepsilon=c\eta_1(1-e^{-\frac{\varepsilon}{cT_1}})+c\eta_2(1-e^{-\frac{\varepsilon}{cT_2}})+E_2\varepsilon. \qquad (3)$$

Результаты исследований и их обсуждение

В результате экспериментальных исследований в режиме растяжения с постоянной скоростью нарастания удлинения получены диаграммы растяжения трикотажных полотен вдоль петельных рядов (рис. 1). Результаты испытаний образцов трикотажных полотен в режиме релаксации напряжений представлены на рис. 2.

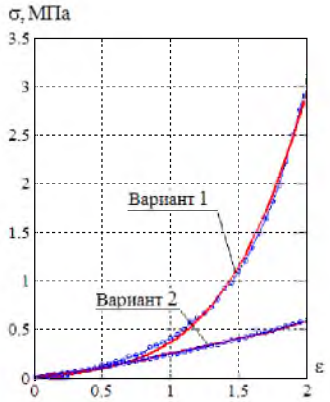
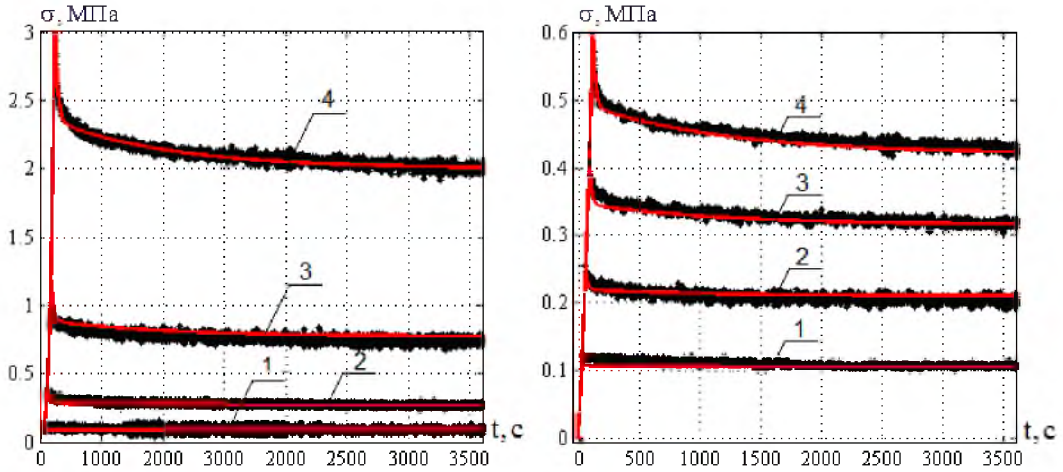


Рис. 1. Диаграммы растяжения трикотажных полотен вдоль петельных рядов:

—o— – экспериментальные данные; —— – результаты моделирования

По одной кривой релаксации напряжений при постоянном удлинении $\varepsilon_к = 2$ произведена оценка параметров уравнения (2). По результатам математического моделирования процесса деформирования трикотажных полотен при постоянной скорости нарастания удлинения с использованием параметров, определенных по одной кривой релаксации напряжений, установлено, что диаграммы растяжения, полученные путем моделирования, существенно отличаются от экспериментальных. В связи с этим была выдвинута гипотеза о том, что параметры механической модели не являются постоянными, а изменяются в процессе растяжения и зависят от величины удлинения.



Вариант 1 Вариант 2

(1 – $\varepsilon_к$ = 0,5; 2 – $\varepsilon_к$ = 1; 3 – $\varepsilon_к$ = 1,5; 4 – $\varepsilon_к$ = 2)

—+— – экспериментальные данные; —— – результаты моделирования

Рис. 2. Кривые релаксации напряжений трикотажных полотен

С использованием семейств экспериментальных кривых релаксации напряжений и соотношений (2) и (3) получены следующие зависимости для математического описания параметров механической модели $\eta_{1(i)}(\varepsilon)$, $\eta_{2(i)}(\varepsilon)$, $E_{11(i)}(\varepsilon)$, $E_{12(i)}(\varepsilon)$ и $E_{2(i)}(\varepsilon)$ *i*-го варианта трикотажа:

$$\eta_{1(1)}(\varepsilon) = K_{\eta_1(1)} \cdot \varepsilon^3;\ \eta_{2(1)}(\varepsilon) = K_{\eta_2(1)} \cdot \varepsilon^3; \tag{4}$$

$$\eta_{1(2)}(\varepsilon) = K_{\eta_1(2)} \cdot \varepsilon^2;\ \eta_{2(2)}(\varepsilon) = K_{\eta_2(2)} \cdot \varepsilon^2; \tag{5}$$

$$E_{11(1)}(\varepsilon) = K_{E_{11}(1)} \cdot \varepsilon^3;\ E_{12(1)}(\varepsilon) = K_{E_{12}(1)} \cdot \varepsilon^3; \tag{6}$$

$$E_{11(2)}(\varepsilon) = K_{E_{11}(2)} \cdot \varepsilon^2;\ E_{12(2)}(\varepsilon) = K_{E_{12}(2)} \cdot \varepsilon^2; \tag{7}$$

$$E_{2(1)}(\varepsilon) = E_{20(1)} + K_{E_2(1)} \cdot \varepsilon^3; \tag{8}$$

$$E_{2(2)}(\varepsilon) = E_{20(2)}, \qquad (9)$$

где $K_{\eta_1(i)}$ – темпы нарастания динамической вязкости $\eta_{1(i)}$, МПа · с; $K_{\eta_2(i)}$ – темпы нарастания динамической вязкости $\eta_{2(i)}$, МПа · с; $K_{E_{11}(1)}$; $K_{E_{11}(2)}$; $K_{E_{11}(1)}$; $K_{E_{11}(2)}$ – темпы нарастания соответствующих модулей упругости, МПа; $E_{20(i)}$ – начальное значение модуля упругости E_2, МПа; $K_{E_2(1)}$ – темп нарастания модуля упругости E_2 трикотажа варианта 1, МПа.

Величины темпов нарастания динамических вязкостей, начальных значений и темпов нарастания модулей упругости для исследуемых трикотажных полотен представлены в таблице.

Величины темпов нарастания динамических вязкостей, начальных значений и темпов нарастания модулей упругости

Наименование исследуемых образцов	K_{η_1}, МПа · с	K_{η_2}, МПа · с	$K_{E_{11}}$, МПа	$K_{E_{12}}$, МПа	E_{20}, МПа	K_{E_2}, МПа
Вариант 1	5,337	22,097	0,243	0,022	0,161	0,21
Вариант 2	1,55	10,474	0,078	0,009	0,1	–

Заключение

Сравнение экспериментальных данных и результатов моделирования показывает, что использование обобщенной механической модели Максвелла с двумя временами релаксации с учетом зависимостей ее параметров от относительного удлинения позволяет достоверно моделировать процессы релаксации напряжений, а также режим растяжения с постоянной скоростью нарастания относительного удлинения трикотажных полотен для компрессионных изделий лечебно-профилактического назначения. Применение полученных результатов позволит прогнозировать равновесные значения давления компрессионных изделий.

Литература

1. Филатов, В. Н. Упругие текстильные оболочки / В. Н. Филатов. – М. : Легпромбытиздат, 1987. – 248 с.
2. Maklewska, E. Modelling and designing of knitted products used in compressive therapy / E. Maklewska, A. Nawrocki, J. Ledwoń, K. Kowalski // Fibres and Text. East. Eur. – 2006. – 14, № 5. – P. 111–113.
3. Нарисава, И. Прочность полимерных материалов / И. Нарисава. – М. : Химия, 1987. – 400 с.
4. Матуконис, А. В. Строение и механические свойства неоднородных нитей / А. В. Матуконис. – М. : Легпромбытиздат, 1971. – 186 с.