

МЕТОДЫ РАСЧЕТА ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

УДК 685.34.03 : 519

С. Л. Фурашова, В. Е. Горбачик, П. И. Скоков

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДЕЛЬНЫХ МЕТОДОВ ДЛЯ ОПИСАНИЯ РЕЛАКСАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ ОБУВНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Статья посвящена поиску математической модели, наиболее точно описывающей реологические свойства различных по природе, происхождению, химическому составу и строению обувных материалов. Рассмотрены уравнения, применяемые ранее для описания релаксации усилий обувных материалов. С использованием разработанной программы автоматизации расчета параметров уравнений – Кольрауша, Максвелла и Максвелла-Томсона – осуществлен выбор моделей, пригодных для прогнозирования релаксации усилий обувных материалов.

Изучению релаксационных процессов, протекающих в обувных материалах при растяжении, всегда уделялось большое внимание в научно-исследовательских работах в связи с их значительным влиянием на формоустойчивость обуви – одну из главных составляющих качества обуви. Так как абсолютное большинство материалов, используемых для производства обуви, представляют собой различные высокомолекулярные соединения натурального и искусственного происхождения, то является обоснованным для описания их свойств использовать методы расчета механических свойств полимеров.

Для выражения механических свойств полимеров широко используют различные модели, для которых составляются уравнения, позволяющие получить зависимости между напряжением и деформацией и производить расчет этих величин в любой момент времени, в том числе и превышающем время проведения эксперимента, что позволяет прогнозировать свойства материалов.

В данной работе исследована возможность описания релаксации усилий различных по химическому составу обувных материалов, используемых в качестве верха, подкладки и межподкладки обуви, а также их систем при двухосном растяжении.

Релаксация, т.е. молекулярная перегруппировка в направлении восстановления равновесной ненапряженной структуры материала, характерна для полимерных соединений, структура которых состоит из цепочных молекул. Релаксационные свойства полимеров зависят от многих факторов, в их числе: химический состав и способ соединения атомов в молекуле, способ упаковки макромолекул в структуре, их размеров, формы и взаимного расположения в пространстве. Так как для производства обуви применяется обширная группа материалов, отличающихся по своей природе и происхождению, по химическому составу, по строению и характеру структуры, а также по многим другим признакам, правомерным является то, что для описания реологических свойств одних материалов ближе могут подойти одни модели, а для других – другие.

Кожа для верха обуви представляет собой волокнисто-сетчатый материал, состоя-

щий в основном из волокон белка коллагена. Макромолекула коллагена образована тремя полипептидными цепями, образующими в пространстве винтовую линию. Модель деформации кожи как волокнисто-сетчатого материала была предложена Зыбиным Ю.П., позднее была усовершенствована Шестаковой Н.А. и использовалась для описания реологических свойств натуральной кожи при одноосном растяжении [1].

Ратаутас А.С. для математического описания релаксационных процессов в коже при одноосном растяжении использовал систему уравнений Максвелла-Томсона, учитывающих наличие в структуре натуральной кожи нескольких групп элементов, каждая из которых релаксирует со своей скоростью [2].

Большая группа материалов, используемых для обуви, представляет собой текстильные материалы, отличающиеся по химическому составу, структуре волокон и нитей. Как показал обзор научно-исследовательских работ, наиболее часто, в 80-ых годах, для прогнозирования релаксационных свойств текстильных материалов (ткани, трикотаж и нити) использовалось уравнение Кольрауша [3-4]. Его применимость показана также и для искусственных и синтетических кож [5].

Трехкомпонентную модель Максвелла, состоящую из элементов, характеризующих быстропротекающий, замедленный и заторможенный процессы релаксации усилия, рекомендуется применять для описания релаксации усилия обувных материалов при одноосном растяжении [6].

Широкое распространение получил метод исследования реологических свойств обувных материалов с использованием наследственной теории вязкоупругости Больцмана-Вольтеры. Ее применимость показана для описания деформирования трикотажа и натуральной кожи при одноосном растяжении [7,8]. В настоящее время основные постулаты теории широко используются в исследованиях реологических свойств обувных материалов. Производится поиск наиболее приемлемых ядер уравнения Больцмана, решение которого будет содержать необходимую совокупность релаксационных параметров, используемых в оценке качества кож [9].

Таким образом, для описания деформационных свойств обувных материалов используют различные модели и реологические уравнения, применимость которых в основном опробовалась при исследованиях релаксационных свойств одиночных материалов при одноосном растяжении. Поэтому представляет интерес поиск модели, наиболее точно описывающей кинетику релаксации напряжений одиночных материалов и систем материалов при двухосном растяжении.

Для этой цели рассмотрим некоторые из модельных представлений, зарекомендовавшие себя в качестве методов, хорошо прогнозирующих релаксацию напряжений некоторых групп обувных материалов при одноосном растяжении: уравнение Кольрауша, Максвелла и Максвелла-Томсона.

Уравнение Кольрауша имеет вид:

$$\sigma(t) = \sigma_0 e^{-at^k} + \sigma_\infty, \quad (1)$$

где $\sigma(t)$ – напряжение в момент времени t ; σ_0 – максимальная величина релаксирующей части напряжения; σ_∞ – равновесное напряжение; a , k – константы, характеризующие релаксационные свойства полимера.

Разработаны два практических метода расчета параметров уравнения Кольрауша, один из которых, графоаналитический, использовался в данной работе [10].

Трехкомпонентное уравнение Максвелла позволяет разбить сложный релаксационный процесс на три составные части, при $\epsilon = \text{const}$ уравнение имеет вид:

$$\sigma(t) = \epsilon E_1 e^{-\frac{t}{\tau_1}} + \epsilon E_2 e^{-\frac{t}{\tau_2}} + \epsilon E_3 e^{-\frac{t}{\tau_3}}, \quad (2)$$

где $\sigma(t)$ – напряжение в промежуток времени t ; ϵ – деформация; E_i – модуль упругости; τ_i – время релаксации.

В уравнении три части характеризуют соответственно быстропротекающий, замедленный и заторможенный процессы релаксации напряжения. Методика расчета параметров уравнения Максвелла изложена в источнике [6].

Система уравнений Максвелла-Томсона учитывает наличие в натуральной коже нескольких групп элементов структуры, каждая из которых релаксирует со своей скоростью.

$$\left. \begin{array}{l} \sigma + n_1 \dot{\epsilon} = E_1 \epsilon_1 + n_1 H_1 \dot{\epsilon}_1; \\ \sigma + n_2 \dot{\epsilon} = E_2 \epsilon_2 + n_2 H_2 \dot{\epsilon}_2; \\ \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots \\ \sigma + n_m \dot{\epsilon} = E_m \epsilon_m + n_m H_m \dot{\epsilon}_m; \\ \epsilon_1 + \epsilon_2 + \dots\dots\dots + \epsilon_m = \epsilon. \end{array} \right\}, \quad (3)$$

где $\sigma, \dot{\sigma}$ – напряжение и скорость напряжения;

$\epsilon, \dot{\epsilon}$ – деформация и скорость деформации;

n – коэффициент времени релаксации напряжения ($n = \frac{bE}{H}$);

b – коэффициент времени релаксации деформации;

E, H – длительный и мгновенный модуль упругости ($E = \frac{\sigma}{\epsilon_k}$); ($H = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$);

ϵ_0, ϵ_k – соответственно начальная и конечная деформация.

Решение системы уравнения для релаксации усилий при $\epsilon = \text{const}$ имеет вид

$$\sigma(t) = \sigma_2 + \frac{(\sigma_0 - \sigma_2)}{3} \left(e^{-\frac{t}{n_1}} + e^{-\frac{t}{n_2}} + e^{-\frac{t}{n_3}} \right), \quad (4)$$

где σ_0 – начальное напряжение; σ_2 – конечное напряжение.

Коэффициенты времени релаксации определяют графическим способом, используя экспериментальную кривую [2].

В качестве объектов исследования были выбраны различные материалы, используемые для верха обуви: натуральная кожа «Наппа» и «Элита», термобязь, нетканый материал «Спанбонд», термотрикотаж межподкладочный и подкладочный, ткань подкладочная, кожа свиная подкладочная, а также системы из перечисленных материалов.

Двухосное растяжение образцов осуществлялось по методике [11] на автоматизированном комплексе, состоящем из разрывной машины «Франк», персонального компьютера и электронного блока преобразования сигнала. Персональный компьютер оснащен

специальным программным обеспечением, необходимым для получения оцифрованных данных эксперимента и отдачи команд по проведению эксперимента. Блок преобразования сигнала служит связующим звеном между разрывной машиной и компьютером. В ходе испытаний материалов, усилия, возникающие при деформации образца, и спад усилий при фиксированном удлинении в течение заданного времени регистрируются датчиком разрывной машины и преобразуются посредством аналогового устройства в цифровые значения, которые передаются ПЭВМ. Полученный массив данных представляет собой значения усилий, зафиксированные каждые 250 миллисекунд. Программа, написанная на языке программирования «DELPHI», осуществляет обработку и хранение информации.

В связи с тем, что расчет и графическое определение параметров моделей требует больших затрат времени и так как возникает необходимость обрабатывать и анализировать значительный объем экспериментальных данных, все расчеты по описанию полученных кривых релаксации реологическими уравнениями выполнялись с использованием разработанной на языке Visual Basic программы расчета параметров моделей.

Исходными данными для расчета являются полученные в ходе эксперимента значения релаксирующих усилий и соответствующее им время. Программа позволяет производить расчет параметров уравнений, рассчитывать усилие в любой заданный момент времени, включая время, превышающее эксперимент, и определять соответствие экспериментальной зависимости эмпирической формуле. Кроме этого существует возможность вывести на печать результат обработки и графическое изображение теоретических кривых релаксации и экспериментальных значений усилий.

Результаты обработки показали, что относительные отклонения расчетных значений усилий от экспериментальных, вычисленные по уравнению Максвелла-Томсона, в промежутке времени от 5 с до 30 мин в среднем не превышают 2%. Но в начале и конце времени наблюдения за процессом релаксации отклонения достигают 4%. Проверка сходимости по уравнению Кольрауша показала, что хорошее совпадение расчетных величин с экспериментальными наблюдается в текстильных материалах: трикотажные полотна, нетканый материал и ткань подкладочная (ошибка аппроксимации не превышает 1%), что подтверждает ранее полученные результаты для текстильных материалов [3-4]. Также ошибка аппроксимации менее 1% получена для кривых релаксации систем, где в качестве материала межподкладки используется нетканое полотно. Однако для одиночных натуральных кож и систем материалов с межподкладкой из термобязи и трикотажного полотна ошибка аппроксимации в начале и конце процесса релаксации достигает для некоторых кривых 8%. При описании экспериментальных данных уравнением Максвелла расхождение экспериментальных значений с расчетными для всех материалов и систем не превышает 1% для всего промежутка времени наблюдения за процессом релаксации.

Таким образом, при рассмотрении релаксационных процессов, протекающих в обувных материалах и системах при двухосном растяжении, рекомендуется использовать трехкомпонентное уравнение Максвелла, так как оно описывает достаточно точно релаксацию усилий при двухосном растяжении независимо от вида материала и комплектующих материалов системы. Ошибка аппроксимации не превышает 1% для всего промежутка времени наблюдения за процессом релаксации.

Литература

1. *Шестакова Н.А.* Исследование реологических свойств кож на основе сетчатой модели: Автореферат ... канд. техн. наук. Москва, 1970. 19с.
2. *Адигезалов Л. И.-О.* Увлажнение, сушка и влажно-тепловая обработка в обувном производстве. М.: Легкая и пищевая промышленность, 1983. С. 31-32.
3. *Герасимова А.Н., Клименко А.Я, Павлов В.И.* Исследование механических и релаксационных свойств некоторых образцов шерстяного и хлопчатобумажного трикотажа // ИВУЗ ТЛП. 1978. №6. С. 11-17.
4. *Клименко А.Я, Герасимова А.Н., Павлов В.И.* Исследование релаксационных свойств тканей некоторых структур // ИВУЗ ТЛП. 1977. №5. С. 51-55.
5. *Луцык Р. В., Хомяк Н. Е.* Влияние тепла и влаги на релаксационные свойства и формоустойчивость искусственных и синтетических кож // КОП. 1979. №10. С. 45-48.
6. *Бернштейн М.М., Жихарев А.П., Булатов Г.П.* Лабораторный практикум по материаловедению изделий из кожи. М.: Легпромбытиздат. 1993. 382с.
7. *Щербачков В.П., Петоян Б.С.* Описание деформирования трикотажа по нелинейной теории вязкоупругости // ИВУЗ ТЛП. 1986. №6. С. 78-81.
8. *Луцык Р.В., Хомяк Н.Е., Холод В.П.* Влияние влаги на релаксационные процессы, происходящие в обувных материалах при формовании // ИВУЗ ТЛП. 1986. 30 Т. №3/177. С. 38-41.
9. *Островский К.Ю, Островский Ю.К.* Способ оценки релаксационных параметров кожи // КОП. 2000. №5. С. 42-43.
10. *Аскадский А.А.* Физико-химия полиакрилатов. М.: Изд-во «Химия», 1968. С. 44-48.
11. *Фурашова С.Л., Горбачик В.Е., Загайгора К.А.* и др. Методика исследования упругоэластических свойств обувных материалов при двухосном растяжении // В сб.: Метрологическое обеспечение, стандартизация и сертификация в сфере услуг. Шахты: ЮРГУЭС, 2006. С.24-25.

© **С. Л. Фурашова** – асп. каф. конструирования и технологии изделий из кожи Витебского гос. технол. ун-та; **В. Е. Горбачик** – д-р техн. наук, проф., зав. каф. конструирования и технологии изделий из кожи Витебского гос. технол. ун-та; **П. И. Скоков** – канд. техн. наук, проф., зав. каф. инженерной графики Витебского гос. технол. ун-та.