

осуществлять комплексную оценку реологических свойств материалов с учетом подвижности различных элементов их макро- и микроструктуры, а также прогнозировать величину деформации в любой момент времени.

#### Список использованных источников

1. Горбачик, В. Е. Исследование релаксации деформации обувных материалов и систем при одноосном растяжении. / В. Е. Горбачик, Р. Н. Томашева. // Техническое регулирование – базовая составляющая управления качеством услуг и изделиями сервиса: Междунар. сб. науч. трудов / ЮРГУЭС. – Шахты : Изд-во ЮРГУЭС, 2005. – 142 с.

#### SUMMARY

In article are stated results of the study to relaxations to deformation natural and artificial material for top footwear and is studied possibility of the description of the processes to relaxations in data material by means of generalised mechanical model Kelivina-Foygta. The Designed program of the processing experimental given on relaxations of the deformation, allowing quickly and with high degree of accuracy to realize the calculation all parameter to mechanical model Kelivina-Foygta, define importances of the factors viscous-springy characteristic under investigation material and forecast the value to their deformation any time time. Use the model method at study of the relaxations to deformation shoe material promotes the most full estimation their quality and allows to forecast their behaviour in determined condition production and usages footwear.

УДК 677.017

### ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДЕФОРМАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ТЕКСТИЛЬНЫХ НИТЕЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПОЛУЦИКЛОВОГО ИСПЫТАНИЯ НА РАСТЯЖЕНИЕ

*А.А. Кузнецов*

Применяемые для оценки качества текстильных нитей и волокон полуцикловые характеристики растяжения не в полном объеме раскрывают все особенности механических свойств текстильных материалов [1].

С целью повышения информативности разрушающих полуцикловых испытаний на растяжение и на основе анализа многообразия форм кривых [1], для описания кривых растяжения в координатах «напряжение  $\sigma$  - относительное удлинение  $\varepsilon$ » предлагается универсальная математическая модель следующего вида

$$\sigma = \frac{\varepsilon}{b_0 + b_1 \cdot \varepsilon} + b_2 \cdot \varepsilon^2, \quad (1)$$

где  $\sigma$  – напряжение, возникающее при растяжении волокна (нити), Па;  $\varepsilon$  – относительное удлинение, %;  $b_0$ ,  $b_1$ ,  $b_2$  – некоторые параметры модели.

Физический смысл параметров  $b_0$ ,  $b_1$ , и  $b_2$  определяется из следующих соображений. Тангенс угла  $\alpha$  касательной к кривой растяжения (рис.1) в начале координат характеризует упругие свойства нити.

С одной стороны, для нахождения тангенса угла  $\alpha$  касательной к кривой растяжения продифференцируем выражение (1) по  $\varepsilon$  и устремим  $\varepsilon$  к нулю:

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = \frac{1}{b_0 + b_1 \cdot \varepsilon} - \frac{b_1 \cdot \varepsilon}{(b_0 + b_1 \cdot \varepsilon)^2} + 2 \cdot b_2 \cdot \varepsilon, \quad \operatorname{tg} \alpha = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \xrightarrow{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{1}{b_0}. \quad (2)$$

С другой стороны, из геометрических соображений (рис.1) можно записать

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\sigma_y}{\varepsilon_p},$$

где  $\sigma_y$  - условный предел упругости или напряжение, при котором произошло бы разрушение абсолютно упругой нити, Па;

$\varepsilon_p$  - относительное разрывное удлинение, %.

Следовательно:

$$b_0 = \frac{\varepsilon_p}{\sigma_y} = \frac{1}{E_y}, \quad (3)$$

где  $E_y$  - условный модуль упругости, Па.

Таким образом, параметр  $b_0$  модели (1) имеет размерность  $[(\text{Па})^{-1}]$  и характеризует упругие свойства волокна (нити) при растяжении.

В модели (1) параметр  $b_2$  характеризует упрочняющие свойства нити при растяжении. Если бы нить растягивалась без упрочнения, то параметр  $b_2$  следовало бы принять равным 0 (рис.1, кривая 2), а разрушение нити происходило бы при напряжении  $\sigma_n$ , которое можно назвать условным пределом пластичности.

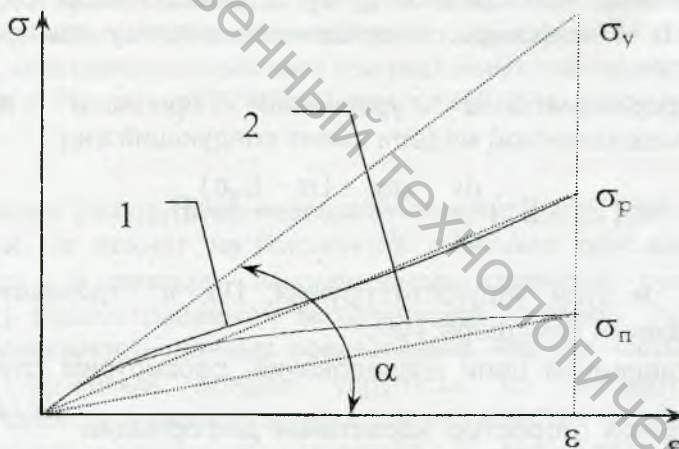


Рисунок 1 - Схематическое представление кривой растяжения: 1-реальная кривая «напряжение – относительное удлинение»; 2-условная кривая для абсолютно неупрочняющейся нити

Тогда

$$\sigma_n = \frac{\varepsilon_p}{b_0 + b_1 \cdot \varepsilon_p}. \quad (4)$$

При подстановке выражения (4) в (3) появляется возможность определения параметра  $b_1$ :

$$b_1 = \frac{1}{\sigma_n} - \frac{1}{\sigma_y}. \quad (5)$$



Следовательно, параметр  $b_1$  модели (1) имеет размерность, аналогичную параметру  $b_0$  и характеризует пластические свойства волокна (нити) при растяжении.

Если подставить в модель (1) значение  $\varepsilon_p$ , значения параметров  $b_0$  и  $b_1$ , согласно выражениям (3) и (5), то параметр  $b_2$  определяется следующим соотношением:

$$b_2 = \frac{\sigma_p - \sigma_n}{\varepsilon_p^2} = \frac{\Delta\sigma_{упр}}{\varepsilon_p^2}, \quad (6)$$

где  $\Delta\sigma_{упр}$  - условный предел упрочнения волокна (нити), Па.

Целью дальнейших исследований является более глубокое обоснование физической сущности введенных показателей (условного предела упругости  $\sigma_u$ , условного предела пластичности  $\sigma_p$  и условного предела упрочнения  $\Delta\sigma_{упр}$ ) деформационных свойств текстильных нитей, численные значения которых определяются по результатам полуциклового испытания на растяжение и определение их соответствия основам теории реологии.

В данных исследованиях для описания поведения текстильной нити при деформировании использовалась механическая модель высокоэластичного элемента Догаткина, Бартенёва, Резниковского, состоящая из параллельно соединённых пружины и одного полного максвелловского элемента [1–3]. Несмотря на кажущуюся простоту, данная механическая модель довольно успешно применялась Эйрингом и его сотрудниками для изучения релаксационных свойств ацетатных и вязкозных компонентов [2–3], а также нашла своё отражение в работах проф. А.В. Матукониса, посвященных анализу процесса растяжения неоднородных систем.

Общее дифференциальное уравнение процесса деформирования рассматриваемой механической модели имеет следующий вид:

$$(E_1 + E_2) \frac{d\varepsilon}{dt} - \frac{d\sigma}{dt} - \frac{(\sigma - E_2\varepsilon)}{\eta} E_1 = 0, \quad (7)$$

где  $E_1, E_2$  – модули упругости пружин, Па;  $\eta$  - динамическая вязкость жидкости демпфера, Па·с.

Исходя из поставленной цели исследований, рассмотрим случай растяжения элемента с постоянной скоростью нарастания деформации  $d\varepsilon/dt = C_\varepsilon = \text{const}$ , так как данный вид растяжения соответствует случаю полуциклового испытания на растяжение текстильной нити (разрывная машина РМ-3).

Решение дифференциального уравнения (7) для данного вида деформирования имеет следующий вид:

$$\sigma(\varepsilon) = C_\varepsilon \eta \left( 1 - \exp\left(-\frac{\varepsilon E_1}{\eta C_\varepsilon}\right) \right) + E_2 \varepsilon \quad (8)$$

Обоснование физического смысла введённых показателей деформационных свойств осуществлялось методом модельного синтеза. На начальном этапе моделирования предполагалось, что упрочнения нити при растяжении не происходит ( $\Delta\sigma_{упр}=0$ ). Варьирование значений условного предела пластичности  $\sigma_p$  и условного предела упругости  $\sigma_u$  нити позволяло на основе использования разработанной модели кривой растяжения (1) сформировать массив координат диаграммы растяжения для «синтезированной» нити [4].

На основе сформированного массива координат диаграммы растяжения определялись численные значения моделей упругости  $E_1$  и  $E_2$  пружин и динамическая вязкость жидкости демпфера  $\eta$  математической модели (8).



Определение численных значений осуществлялось с использованием пакета «Statistica for Windows». Скорость нарастания деформации  $\dot{\epsilon}$  при проведении моделирования задавалась, исходя из значений относительного разрывного удлинения, времени разрушения и зажимной длины образца нити. Следует отметить высокую сходимость результатов, полученных с использованием модели (8) и задаваемых значений диаграммы растяжения. Некоторые результаты проведенного моделирования графически представлены на рис.2.

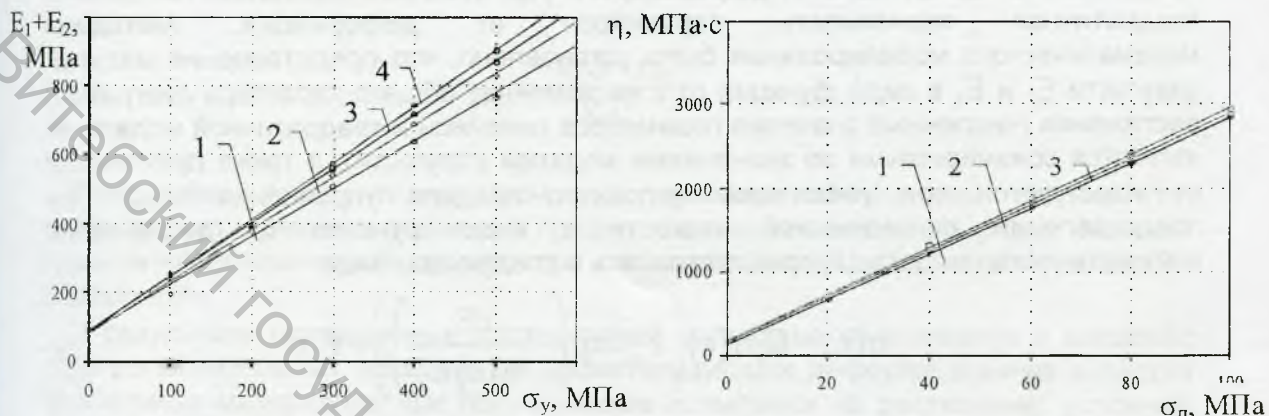


Рисунок 2 - Зависимости суммарного модуля упругости ( $E_1+E_2$ ) «синтезированной» нити от условного предела упругости  $\sigma_y$  при различных значениях условного предела пластичности  $\sigma_n$  (1- при  $\sigma_n=40$  МПа; 2- при  $\sigma_n=60$  МПа; 3- при  $\sigma_n=80$  МПа; 4- при  $\sigma_n=100$  МПа) (рис.а) и динамической вязкости  $\eta$  жидкости демпфера от условного предела пластичности  $\sigma_n$  «синтезированной» нити при различных значениях условного предела упругости  $\sigma_y$  (1- при  $\sigma_y=100$  МПа; 2- при  $\sigma_y=200$  МПа; 3- при  $\sigma_y=500$  МПа)

Анализ полученных результатов позволяет отметить, что изменение условного предела упругости не влияет на численное значение динамической вязкости жидкости демпфера  $\eta$ , а приводит к закономерному изменению суммарного модуля упругости ( $E_1+E_2$ ) рассматриваемой механической системы (следует отметить прямую пропорциональность данных показателей), что полностью подтверждает тот факт, что условный предел упругости  $\sigma_y$  является показателем деформационных свойств и характеризует упругие свойства нити при растяжении с постоянной скоростью нарастания удлинения. В результате математического моделирования установлено, что увеличение условного предела пластичности практически не оказывает влияние на суммарный модуль упругости рассматриваемой механической системы, а приводит к закономерному увеличению численного значения динамической вязкости жидкости демпфера. Условный предел пластичности и динамическая вязкость являются пропорциональными величинами ( $\eta=k\sigma_n$ ), что свидетельствует о том, что условный предел пластичности косвенно характеризует динамическую вязкость жидкости демпфера рассматриваемой механической модели. Несомненным преимуществом введённого показателя является тот факт, что для определения его численного значения не требуется значительных временных затрат и специального испытательного оборудования (численное значение  $\sigma_n$  довольно легко определяется по результатам полуциклового испытания на растяжение).

При математической обработке массивов диаграмм растяжения для нитей, обладающих различными значениями условного предела упрочнения  $\Delta\sigma_{упр}$ , было установлено, что использование различных методов определения численных значений параметров  $E_1$ ,  $E_2$  и  $\eta$  не позволяет достоверно описать процесс растяжения для указанных образцов нитей. Увеличение условного предела



упрочнения  $\Delta\sigma_{\text{упр}}$  приводит к снижению достоверности  $R^2$  с 0,998 при  $\Delta\sigma_{\text{упр}}=0$  МПа до 0,687 при  $\Delta\sigma_{\text{упр}}=20$  МПа. Это свидетельствует о том, что рассматриваемая механическая модель не может достоверно описать процесс растяжения текстильной нити при условии постоянства её параметров ( $E_1$ ,  $E_2$  и  $\eta$ ). Следовательно, можно предположить, что в процессе деформирования нити происходит изменение параметров рассматриваемой механической модели. На начальном этапе исследований параметры механической модели  $E_1$ ,  $E_2$  и  $\eta$  были представлены как функции от деформации  $\varepsilon$ . При этом исследовалась линейная и квадратичная зависимость параметров от деформации. Методами математического моделирования было установлено, что представление модулей упругости  $E_1$  и  $E_2$  в виде функций от  $\varepsilon$  не изменяет общего характера диаграммы растяжения (численные значения параметров линейной и квадратичной модели не являются соизмеримыми со значениями модулей упругости), а также практически не изменяются при увеличении условного предела упрочнения  $\Delta\sigma_{\text{упр}}$ . При представлении динамической вязкости в виде функции от деформации математическая модель (8) представлялась в следующем виде:

$$\sigma(\varepsilon) = C_\varepsilon \eta(\varepsilon) \left( 1 - \exp\left(-\frac{\varepsilon E_1}{\eta(\varepsilon) C_\varepsilon}\right) \right) + E_2 \varepsilon. \quad (9)$$

В качестве функции  $\eta(\varepsilon)$  использовались линейная ( $\eta(\varepsilon) = \eta_0 + K_\eta \varepsilon$ ) и квадратичная ( $\eta(\varepsilon) = \eta_0 + K_\eta \varepsilon^2$ ) модели. В результате исследований было установлено, что наиболее предпочтительным с точки зрения минимизации дисперсии (достоверности модели  $R^2$ ) является применение квадратичной модели в качестве функции  $\eta(\varepsilon)$  для описания процесса деформирования «синтезированной» нити, обладающей упрочнением. Численное значение величины достоверности  $R^2$  модели (9) при различных значениях условного предела упрочнения выше 0,996. Анализ результатов, полученных в ходе математического моделирования, позволяет отметить закономерный характер изменения темпа нарастания динамической вязкости при увеличении условного предела упрочнения (рис.3).

После представления темпа нарастания вязкости в виде  $K_\eta = K \Delta\sigma_{\text{упр}}$  функциональная зависимость динамической вязкости от деформации  $\eta(\varepsilon)$  принимает следующий вид:

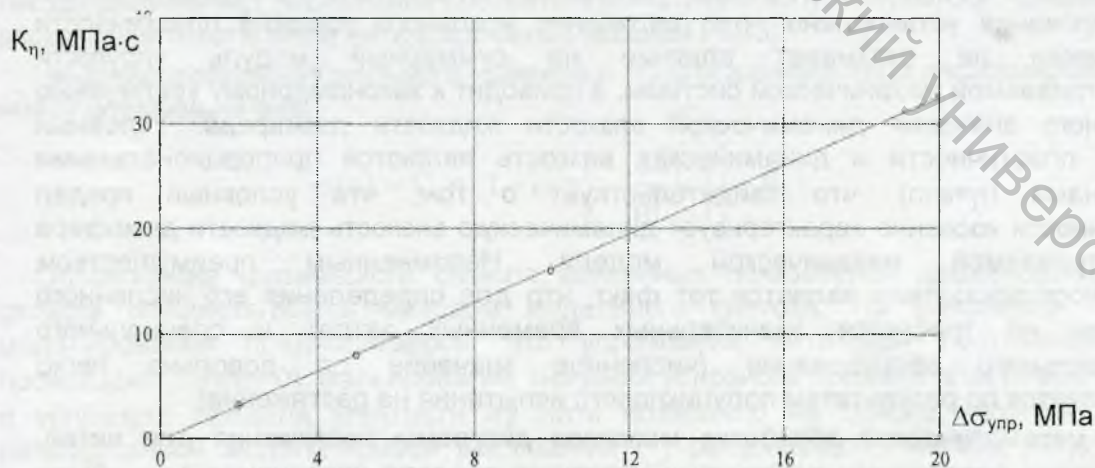


Рисунок 3 - Зависимость темпа изменения динамической вязкости  $K_\eta$  от условного предела упрочнения  $\Delta\sigma_{\text{упр}}$  при  $\sigma_y=500$  МПа,  $\sigma_n=20$  МПа



$$\eta(\varepsilon) = \eta_0 + K\Delta\sigma_{\text{упр}}\varepsilon^2 \quad (10)$$

где  $\eta_0$  – динамическая вязкость жидкости демпфера на начальном этапе испытания (при  $\varepsilon \rightarrow 0$ ), МПа с.

Следовательно, после преобразования соотношения (10) выражение, определяющее физический смысл условного предела упрочнения, имеет следующий вид:

$$\Delta\sigma_{\text{упр}} = \frac{\eta(\varepsilon) - \eta_0}{K\varepsilon^2} \quad (11)$$

Вследствие того, что размерность параметра  $K$  моделей (10) и (11) соответствует времени, условный предел упрочнения численно равен скорости нарастания динамической вязкости при сообщении нити единичной относительной деформации

В результате проведенных исследований проведено обоснование и введение ряда дополнительных показателей, характеризующих деформационные свойства текстильных материалов при полуцикловом испытании на растяжение: условный предел упругости  $\sigma_y$ , условный предел пластичности  $\sigma_n$  и условный предел упрочнения  $\Delta\sigma_{\text{упр}}$ , применение которых позволяет без использования дополнительного специального оборудования значительно расширить диапазон полученных сведений при проведении полуцикловых разрушающих испытаний и более объективно и всесторонне оценить качество волокон и нитей. Методами модельного синтеза произведено обоснование физического смысла введенных показателей деформационных свойств текстильных нитей и определена их взаимосвязь с параметрами идеального вязкоупругого элемента деформирования.

#### Список использованных источников

1. Кукин, Г.К. Текстильное материаловедение. Ч.2. // Г.К. Кукин, А.Н. Соловьев / М.: Легкая индустрия, 1964. – 378 с.
2. Матуконис, А.В. Строение и механические свойства неоднородных нитей // Матуконис А.В. / М.: Легпромбытиздат, 1971 – 186 с.
3. Матуконис, А.В. Производство, свойства и применение неоднородных нитей // Матуконис А.В. / М.: Легпромбытиздат, 1987 – 130 с.
4. Кузнецов А.А. Оценка и прогнозирование механических свойств текстильных нитей / А.А. Кузнецов, В.И. Ольшанский // ВГТУ - Витебск, 2004. – С.225.

#### SUMMARY

As a result of the carried out researches the substantiation and introduction a number of the additional parameters, describing the deformation properties of textile materials at half-cycle test for a stretching, were introduced: the conditional limit of elasticity, a conditional limit of plasticity and a conditional limit of hardening, the using of which allows, without using the additional special equipment, to expand the range of the received data during half-cycle destructive tests and more objectively and comprehensively to estimate the quality of fibers and strings. Using the methods of modeling synthesis, the substantiation of the physical sense of the introduced parameters of the deformation properties of textile strings was made, and their interrelation with parameters of an ideal viscoelastic element of deformation was determined.