

4. Хмелевская И.Ю., Лагунова М.И., Прокошкин С.Д., Капуткина Л.М. / Научные труды семинара «Актуальные проблемы прочности» им. В.А. Лихачёва, том 2, часть 2, 1997, с. 356-361.
5. Пушкин В.Г., Кондратьев В.В., Хачин В.Н. / Известия ВУЗов «Физика», №5, 1985, с. 292-304.
6. Хусаинов М.А., Зайцев В.А., Андреев А.В. / Сб. металлы с эффектом памяти формы и их применение. Новгород – Ленинград, 1989, с. 117-121.
7. M.A. Khusainov, O.Yu. Volnyanskaya / Journal de Physique IV Proceedings. ICOMAT'02. International Conference on Martensitic Transformations, part 2, France, 2002, p. 781-784.
8. Лихачёв В.А., Кузьмин С.Л., Каменцева З.П. / Эффект памяти формы. Л., ЛГУ, 1987, с. 134-147.

УДК 677.017

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЕТЕРОГЕННОСТИ СТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НА ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Кузнецов А. А., Иваненков Д. А.

Витебский государственный технологический университет, Витебск, Беларусь
iwanenkow@tut.by

Одинокое волокно (нить), как практически любую продукцию текстильной промышленности, необходимо рассматривать как сложную техническую систему вследствие многообразия и многосвязности отношений между их компонентами, сложности поведения под действием разнообразных воздействий внешних факторов и условий окружающей среды. Известно, что исследования практически любых технических систем осуществляется на основе применения двух типов математических моделей: аналитических и имитационных [1]. В данной работе в качестве метода исследования использовано имитационное моделирование процессов испытания.

Имитационное моделирование в общем случае представляет собой численный метод проведения на ЭВМ экспериментов с математическими моделями, которые описывают поведение компонентов изделия (системы) в течение заданного или формируемого периода времени. Поведение компонентов системы и их взаимодействие в имитационной модели чаще всего описывается определенным набором алгоритмов, реализуемых на выбранном языке моделирования.

Для описания кривых растяжения в координатах «напряжение σ – относительное удлинение ϵ » предлагается универсальная математическая модель, следующего вида:

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

где σ – напряжение, возникающее при растяжении волокна (нити), Па; ϵ – относительное удлинение, %, b_0, b_1, b_2 – некоторые параметры модели.

При разработке имитационной модели полциклового испытания на растяжение одиночной нити (волокна) была выдвинута гипотеза, предполагающая, что объект исследования можно представить структурно в виде m последовательно соединенных участков (элементов) длиной ΔL_i . При этом каждый i -й участок нити имеет не только

различную линейную плотность T_i , но и различные параметры модели b_{0i}, b_{1i}, b_{2i} (1), которые характеризуют упругие, пластические и упрочняющие свойства одиночной нити (волокна).

Схематическое представление одиночной нити (волокна) с учетом предложенных допущений представлено на рис. 1.

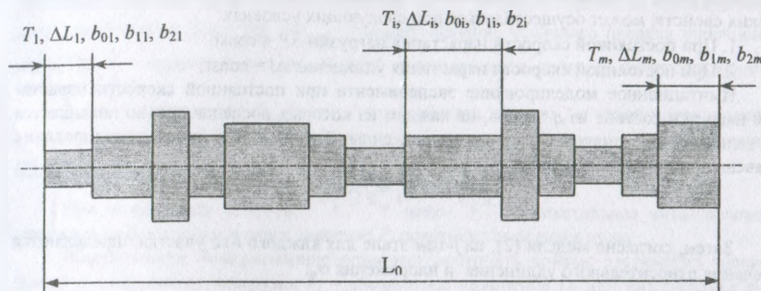


Рис. 1. Схематическое представление одиночной нити (волокна) с продольной гетерогенностью механических свойств и строения при имитационном моделировании процессов деформирования и разрушения.

Предложенная модель растяжения (1) текстильных волокон и нитей, а также предложенные допущения позволяют определить значение напряжения σ , для каждого i -го сечения одиночной нити (волокна) при известном значении относительной деформации ε_i . Умножив правую и левую часть модели (1) на площадь i -го сечения нити $F_i = T_i / \gamma$, где γ – плотность вещества волокна (нити), уравнение (1) преобразуется к следующему виду:

$$\varepsilon_i = \frac{\gamma P}{T_i \left(\frac{1}{b_{0i} + b_{1i} \varepsilon_i} + b_{2i} \varepsilon_i \right)}, \quad (2)$$

где P – текущее значение силы растяжения, H .

Данное уравнение легко решается методом итераций.

Параметры уравнения (2) для i -го участка волокна (нити) определяются, согласно их физическому смыслу, исходя из следующих соотношений:

$$b_{0i} = \frac{\varepsilon_{pi}}{\sigma_{yi}}, b_{1i} = \left(\frac{1}{\sigma_{ni}} - \frac{1}{\sigma_{yi}} \right); b_{2i} = \frac{\sigma_{pi} - \sigma_{ni}}{\varepsilon_{pi}^2}. \quad (3)$$

где σ_{yi} – условный предел упругости i -го элемента нити, Па; ε_{pi} – относительное разрывное удлинение i -го элемента нити, %; σ_{pi} – предел прочности i -го элемента нити, Па; σ_{ni} – условный предел пластичности i -го элемента нити, Па.

Таким образом, случайными характеристиками i -го элемента нити (волокна) будут являться значения σ_{yi} , ε_{pi} , σ_{pi} , T_i , σ_{ni} , ΔL_i , которые распределены согласно выбранному закону распределения. Для учета влияния нестабильности явления упрочнения

генератор случайных чисел генерирует значение $\Delta\sigma_{ynpi} = (\sigma_{pi} - \sigma_{ni})$, а значение σ_{pi} , определяется из следующего выражения: $\sigma_{pi} = \Delta\sigma_{ynpi} + \sigma_{ni}$. Для каждого участка данные характеристики определяются на основе соответствующего генератора случайных чисел и далее остаются постоянными в течение всего цикла моделирования.

Имитационное моделирование полциклового испытания на растяжение текстильной нити, обладающей продольной вариацией показателей структуры и механических свойств, может осуществляться при следующих условиях:

1. При постоянной скорости нарастания нагрузки $\Delta P = \text{const}$;
2. При постоянной скорости нарастания удлинения $\Delta l = \text{const}$;

Имитационное моделирование эксперимента при постоянной скорости нарастания нагрузки состоит из q этапов, на каждом из которых последовательно повышается на величину ΔP значение растягивающей силы. Тогда на j -ом этапе моделирования значение растягивающей силы:

$$P_j = j \cdot \Delta P.$$

Затем, согласно модели (2), на j -том этапе для каждого i -го участка определяются значения относительного удлинения и напряжения σ_{ij} :

$$\sigma_{ij} = P_j \cdot \frac{\gamma}{T_i}. \quad (4)$$

Абсолютные удлинения каждого элемента l_{ij} , и всей нити l_j на j -м этапе моделирования будут определяться следующими соотношениями:

$$l_{ij} = \varepsilon_{ij} \cdot \Delta L_i; l_j = \sum_{i=1}^m l_{ij}. \quad (5)$$

Тогда среднее значение относительного удлинения нити ε_j на j -м шаге моделирования будет определяться следующим соотношением:

$$\varepsilon_j = \frac{l_j}{\sum_{i=1}^m \Delta L_i}. \quad (6)$$

При выполнении условий: $\varepsilon_{ij} \geq \varepsilon_{pi}$ либо $\sigma_{ij} \geq \sigma_{pi}$ текстильная нить (волокно) считается разрушенным и далее значение P_j принимается равным нулю.

При проведении имитационного моделирования при постоянстве скорости нарастания удлинения ($\Delta l = \text{const}$) нижнему зажиму разрывной машины последовательно сообщается постоянное на каждом этапе моделирования удлинение Δl . Следовательно, удлинение нити на j -м этапе моделирования l_j определяется как

$$l_j = j \cdot \Delta l, \quad (7)$$

что позволяет определить нагрузку P_j , приложенную к нити на j -м этапе:

$$P_j = \frac{l_j}{a_0 + a_1 \cdot l_j} + a_2 \cdot l_j^2, \quad (8)$$

$$a_0 = \frac{\bar{l}_p \cdot \gamma}{\sigma_y \cdot \bar{T}}, \quad a_1 = \left(\frac{1}{\sigma_n} - \frac{1}{\sigma_y} \right) \cdot \frac{\gamma}{\bar{T}}, \quad a_2 = \frac{\Delta \bar{\sigma}_{\text{упр}}}{\bar{l}_p^2} \cdot \frac{\bar{T}}{\gamma}, \quad (9)$$

где \bar{l}_p – среднее значение абсолютного разрывного удлинения нити, м; $\bar{\sigma}_y$ – среднее значение условного предела упругости нити, Па; $\bar{\sigma}_n$ – среднее значение условного предела пластичности нити, Па; $\Delta \bar{\sigma}_{\text{упр}}$ – среднее значение условного предела упрочнения нити, Па; \bar{T} – среднее значение линейной плотности нити, кг/м; γ – плотность вещества нити, кг/м³.

Далее, для каждого i -го структурного элемента нити на j -м этапе моделирования определяются значения относительного удлинения ε_{ij} и напряжения σ_{ij} (соотношения (2) и (4)).

При выполнении условий: $\varepsilon_{ij} \geq \varepsilon_{pi}$ либо $\sigma_{ij} \geq \sigma_{pi}$ текстильная нить (волокно) считается разрушенным и далее значение P_j принимается равным нулю.

Имитационное моделирование позволяет построить кривые растяжения волокна (нити) в координатах «нагрузка P_j – абсолютное удлинение l_j » или «напряжение σ_j – относительное удлинение ε_j » с учётом продольной гетерогенности механических свойств и структуры, а также определить влияние продольной гетерогенности на параметры данной кривой.

В качестве объекта исследования было введено понятие «синтезированная» нить. Под понятием «синтезированной» в дальнейшем будет пониматься реальная одиночная нить, при полусцикловом испытании на растяжение которой проявляются наиболее общие свойства, определяемые параметрами математической модели (1). Кривая растяжения «синтезированной» нити в координатах «напряжение σ – относительное удлинение ε » при отсутствии гетерогенности структуры и механических свойств представлена на рис.2.

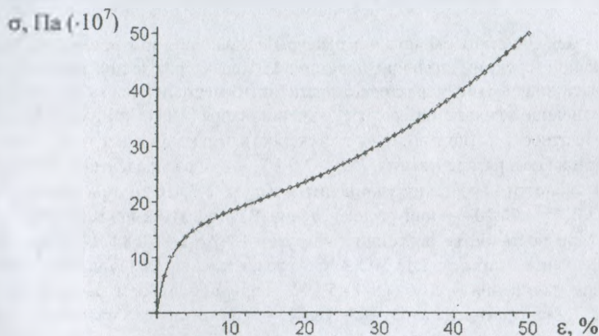


Рис.2. Кривая растяжения «напряжение σ – относительное удлинение ε » для «синтезированной» одиночной нити при отсутствии вариаций (неровноты) по физико-механическим свойствам.

Данные исследования проводились на основе предложенной в имитационной модели деформирования и разрушения одиночной нити (волокна). В качестве объекта исследования использована «синтезированная» нить. При проведении имитационного моделирования было принято допущение о том, что параметры «синтезированной» одиночной нити, характеризующие деформационные и прочностные свойства, являются независимыми случайными величинами и подчиняются нормальному закону распределения (или закону распределения Вейбулла).

Применение математической модели (2) позволит не только достоверно описать влияние различных вариаций на прочностные показатели, но также и сопоставить результаты данного влияния.

Следовательно, появляется реальная возможность классификации различных нестабильностей по степени оказываемого влияния на напряжения при разрыве $\bar{\sigma}_p$ и относительное разрывное удлинение $\bar{\epsilon}_p$ не только на качественном уровне, но и на количественном. Использование математической модели типа (2) позволяет провести анализ совместного влияния различных вариаций на исследуемый показатель. Параметром математической модели (2), который позволяет провести количественное сопоставление результатов имитационного моделирования, является темп уменьшения исследуемого показателя прочности $K\sigma$.

В результате проведения имитационного моделирования процесса испытания на растяжение одиночной нити следующее:

1. Асимметрия закона распределения, отражающая смещение моды относительно среднего значения, существенно влияет на закономерность уменьшения среднего значения напряжения при разрыве $\bar{\sigma}_p$ и относительного разрывного удлинения $\bar{\epsilon}_p$.

2. Смещение моды закона распределения показателей механических свойств в сторону больших значений (закон распределения Вейбулла) приводит к увеличению темпа уменьшения среднего значения напряжения при разрыве $\bar{\sigma}_p$ и относительного разрывного удлинения $\bar{\epsilon}_p$ по сравнению с симметричным (нормальным) распределением.

3. Вариация механических свойств и структуры одиночной нити приводит к закономерному снижению средних значений показателей, характеризующих прочностные свойства. Наиболее значимыми характеристиками нити, нестабильность по которым оказывает существенное влияние на среднее значение напряжения при разрыве, являются: линейная плотность T (при постоянстве скорости нарастания нагрузки – $K\sigma_T = 2,9 \cdot 10^{-2}$ – при нормальном распределении, $K\sigma_T = 3,9 \cdot 10^{-2}$ – при распределении Вейбулла; при постоянстве скорости нарастания удлинения – $K\sigma_T = 2,78 \cdot 10^{-2}$ – при нормальном распределении, $K\sigma_T = 4,06 \cdot 10^{-2}$ – при распределении Вейбулла), условный предел упругости $\Delta\sigma_{упр}$ (при постоянстве нарастания нагрузки – $K\Delta\sigma_{упр} = 0,88 \cdot 10^{-2}$ – при нормальном распределении, $K\Delta\sigma_{упр} = 1,15 \cdot 10^{-2}$ – при распределении Вейбулла; при постоянстве нарастания удлинения – $K\Delta\sigma_{упр} = 1,45 \cdot 10^{-2}$ – при нормальном распределении, $K\Delta\sigma_{упр} = 3,63 \cdot 10^{-2}$ – при распределении Вейбулла), условный предел пластичности σ_n (при постоянстве скорости нарастания нагрузки – $K\sigma_n = 0,88 \cdot 10^{-2}$ – при нормальном распределении, $K\sigma_n = 0,89 \cdot 10^{-2}$ – при распределении Вейбулла; при постоянстве скорости нарастания удлинения – $K\sigma_n = 0,91 \cdot 10^{-2}$ – при нормальном распределении, $K\sigma_n = 1,05 \cdot 10^{-2}$ – при распределении Вейбулла). Вариации по относительному разрывному удлинению ϵ_p ($K\epsilon_p \approx (0,5-4) \cdot 10^{-7}$) и условному пределу упругости σ_y ($K\sigma_y \approx (0,01-2) \cdot 10^{-5}$) не приводят к изменению напряжения при разрыве нити.

4. Отсутствие влияния коэффициента вариации по относительному разрывному удлинению ϵ_r на напряжение при разрыве σ_r объясняется допущением о том, что относительное разрывное удлинение ϵ_r и предел прочности σ_r являются независимыми случайными величинами (корреляционная связь отсутствует) [2]. С другой стороны, зависимость предела прочности σ_r от вариации условных пределов пластичности σ_n и упрочнения $\Delta\sigma_{упр}$ можно объяснить взаимосвязью данных показателей и напряжения при разрыве ($\sigma_r = \sigma_n + \Delta\sigma_{упр}$).

5. Наиболее значимыми свойствами нити, нестабильность по которым оказывает существенное влияние на среднее значение относительного разрывного удлинения, являются: линейная плотность нити T (при постоянстве скорости нарастания нагрузки – $K\epsilon_r = 2,8 \cdot 10^{-2}$ — при нормальном распределении, $K\epsilon_r = 4,9 \cdot 10^{-2}$ – при распределении Вейбулла; при постоянстве скорости нарастания удлинения – $K\epsilon_r = 2,61 \cdot 10^{-2}$ — при нормальном распределении, $K\epsilon_r = 3,47 \cdot 10^{-2}$ – при распределении Вейбулла), условный предел упрочнения $\Delta\sigma_{упр}$ (при постоянстве скорости нарастания нагрузки – $K\epsilon\Delta\sigma_{упр} = 1,38 \cdot 10^{-2}$ – при нормальном распределении, $K\epsilon\Delta\sigma_{упр} = 1,39 \cdot 10^{-2}$ – при распределении Вейбулла; при постоянстве скорости нарастания удлинения – $K\epsilon\Delta\sigma_{упр} = 1,32 \cdot 10^{-2}$ – при нормальном распределении, $K\epsilon\Delta\sigma_{упр} = 1,91 \cdot 10^{-2}$ – при распределении Вейбулла) и условный предел пластичности σ_n (при постоянстве скорости нарастания нагрузки – $K\epsilon\sigma_n = 0,77 \cdot 10^{-2}$ — при нормальном распределении, $K\epsilon\sigma_n = 0,93 \cdot 10^{-2}$ – при распределении Вейбулла; при постоянстве скорости нарастания удлинения – $K\epsilon\sigma_n = 0,79 \cdot 10^{-2}$ — при нормальном распределении, $K\epsilon\sigma_n = 0,93 \cdot 10^{-2}$ – при распределении Вейбулла.). Вариации по относительному разрывному удлинению ϵ_r ($K\epsilon\epsilon_r \approx (0,07-2) \cdot 10^{-5}$) и условному пределу упругости σ_y ($K\epsilon\sigma_y \approx (0,02-5) \cdot 10^{-6}$) не оказывают влияния на относительное разрывное удлинение нити.

6. При различных вариациях по механическим свойствам значения предела прочности $\bar{\sigma}_{r0}$ и относительного разрывного удлинения $\bar{\epsilon}_{r0}$ практически не изменяются. Среднее значение разброса значений $\bar{\sigma}_{r0}$ и $\bar{\epsilon}_{r0}$ при вариациях по различным свойствам не превышает 1.5%.

7. При совместном влиянии вариаций по различным свойствам не происходит изменения характера зависимости предела прочности и относительного разрывного удлинения от параметров нестабильности. Влияние отдельных параметров при их случайном одновременном изменении не суммируется. Темп уменьшения показателей прочности при влиянии вариаций практически не изменяется относительно параметра $K\sigma$ для вариации по наиболее значимому свойству.

Подводя итоги работы, результаты которой представлены в данном параграфе, можно отметить, что:

1. Установлена закономерность влияния продольной гетерогенности строения и механических свойств на характеристики кривой «напряжение – относительное удлинение» (с увеличением степени указанной неравномерности закономерно снижаются разрывное напряжение и относительное удлинение);

2. Установлено, что наибольшее влияние на напряжение при разрыве оказывают неравномерности по линейной плотности и разрывному напряжению;

показано, что наиболее значимыми свойствами нити, нестабильность по которым существенно уменьшает относительное разрывное удлинение, являются: линейная плотность, напряжение при разрыве и условный предел пластичности;

3. Проведено исследование случайного совместного влияния различных нестабильностей (строения, механических свойств нити) на форму и параметры кривой растяжения;

4. Показано, что применение параметрического принципа оценки показателей, характеризующих качество текстильных материалов, для анализа реализации случайного значения исследуемого параметра позволяет достоверно провести анализ и сопоставление полученных результатов имитационного моделирования.

Проведенные исследования подтвердили высокую эффективность имитационного моделирования как метода исследования механических свойств текстильных материалов при полцикловых испытаниях на растяжение. Результаты проведенных исследований можно рекомендовать для прогнозирования изменения прочностных показателей при наличии различных вариаций (неровноты) по механическим свойствам и строению текстильных нитей и волокон.

Список литературы

1. Ольшанский В.И., Махаринский Е.И., Кузнецов А.А. Методика оценки показателей деформационных свойств текстильных нитей по результатам полциклового испытания на растяжение. / ВГТУ – Витебск, 2001 – 19 с.
2. Перепелкин К.Е. Дефектность и технологическая работоспособность нитей – основные факторы стабильности процессов их получения и переработки. // Вестник Московской государственной текстильной академии. Вып. 1. / МГТА – Москва, 1994 – С.139-151.

УДК 669.24'295

ВЛИЯНИЕ ЗНАКОПЕРЕМЕННЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ НА ПРОЦЕССЫ ПЛАСТИЧНОСТИ ПРЕВРАЩЕНИЯ И ПАМЯТИ ФОРМЫ В TiNi

Беляев С. П., Рубаник В. В.* , Рубаник В. В.* мл.

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

** Институт технической акустики, Витебск, Беларусь*

ita@vitebsk.by

Исследованию физических свойств материалов, обладающих эффектом памяти формы, в последние годы уделяется значительное внимание, что связано с их широким внедрением и использованием в современной технике и медицине. Специфика фазовых превращений этих материалов обуславливает проявление новых уникальных свойств, не характерных для обычных металлов и сплавов, таких как пластичность превращения и эффект памяти формы. Поскольку реальные материалы, составляющие основу всевозможных конструкций и изделий, подвержены, в той или иной мере, воздействию внешних механических усилий, они непрерывно изменяют свои свойства. Учитывая высокую зависимость свойств материалов с памятью от внешних напряжений, следует ожидать и изменения в их поведении при реализации эффектов пластичности превращения и памяти формы.

Действительно, в работах [1, 2] было подтверждено, что воздействие ультразвуковых колебаний на образцы сплава TiNi вызывает ускорение обратного фазового пре-