

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УПРУГО-ВЯЗКИХ СВОЙСТВ НИТИ

Асп. А.А. БУДАРИН, д-р техн. наук, проф. С.Ф. ЯЦУН

Рассмотрен эффект релаксации напряжений, возникающих в нити. По результатам экспериментов построена математическая модель, описывающая изменение напряжения во времени. Это позволяет разработать эффективные методы расчета механизмов подачи нити.

This paper presents the results of experimental investigations of relaxation problem for a thread. Mathematical model of relaxation problem is developed. The model allowed creating new effective methods of calculating of parameters of mechanisms of thread feeding and knitting machine.

Трикотажная промышленность — одна из подотраслей текстильной промышленности, продукция которой не только удовлетворяет потребности населения, но и широко применяется для технических целей [1—3].

Трикотажным способом производства вырабатывается большой ассортимент полотен технического и медицинского назначения.

В процессе выработки трикотажа на вязальной машине принимают участие различные механизмы, основные из которых — механизм подачи нити и механизм вязания. Свойства нити — основного элемента таких систем — остаются недостаточно изученными. Поэтому целью исследований является определение упруго-вязких свойств нити и разработка соответствующей математической модели. При проектировании механизмов подачи нити широко используются методы математического моделирования динамического поведения изучаемой системы [3,4]. И здесь важным является построение модели нити, адекватно описывающей как квазистатическое, так и динамическое ее поведение.

Математическая модель нити

Далее изучаются модели, полученные с помощью законов наследственной механики [5]. В основе этих моделей лежат уравнения Вольтера — Больцмана. В линейном приближении модель нити запишем в виде следующих интегральных соотношений [6]:

$$\varepsilon(t) = \frac{1}{E_0} \left[\sigma + \int_0^t K(t-\tau) \sigma(\tau) d\tau \right] \quad (1)$$

$$\sigma(t) = E_0 \left[\varepsilon - \int_0^t R(t-\tau) \varepsilon(\tau) d\tau \right] \quad (2)$$

где E_0 — мгновенный или динамический модуль упругости; σ , ε — напряжение и деформация, возникающие в нити при растяжении. Функции $K(t-\tau)$ и $R(t-\tau)$ называют функциями ползучести и функцией релаксации соответственно.

Данные уравнения отражают тот факт, что материал запоминает напряжения σ , возникающие в моменты времени τ , действующие на отрезке времени dt .

Элементарную деформацию $d\varepsilon$, полученную телом в результате действия σ , можно определить по формуле:

$$d\varepsilon = \frac{1}{E_0} K(t-\tau) \sigma(\tau) d\tau.$$

Проинтегрировав это выражение, на интервале времени от 0 до t получаем уравнение (1). Аналогичные рассуждения позволяют получить уравнение (2). Для определения вида функций $K(t-\tau)$ и $R(t-\tau)$ проводятся экспериментальные исследования. Обработка экспериментальных данных позволяет выбрать вид функций и найти реологические параметры, адекватно описывающие свойства нитей.

Экспериментальное определение кривых релаксации

Для определения вида функции релаксации необходимо получить экспериментальные кривые релаксации. Для этого была разработана специальная экспериментальная установка, схема которой приведена на рис. 1.

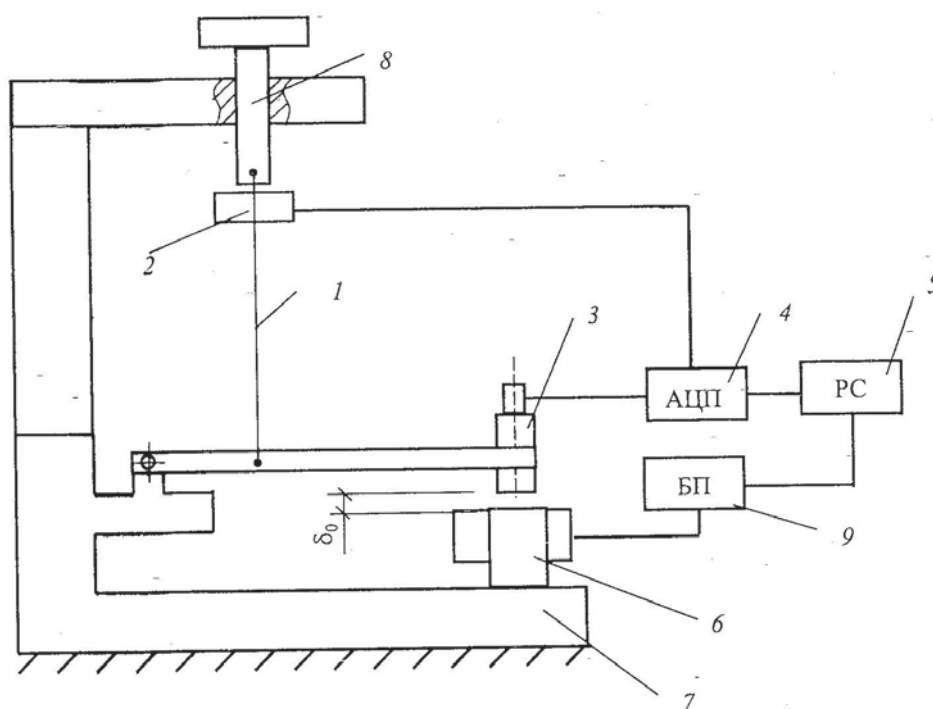


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Установка состоит из следующих элементов: 1 — образец нити, 2 — датчик измерения силы, возникающей при растяжении нити, 3 — датчик измерения перемещения якоря электромагнита во время деформирования нити, 4 — аналогово-цифровой преобразователь (L-CARD), 5 — компьютер, 6 — электромагнит, 7 — корпус установки, 8 — регулировочный узел, 9 — блок электрического питания электромагнита.

Работа установки происходит следующим образом. В заданный момент времени на катушку электромагнита поступает электрическое напряжение, якорь электромагнита быстро притягивается к статору. Нить деформируется на величину δ , которая в дальнейшем не изменяется. Величина деформации δ может регулироваться с помощью регулировочного узла. Относительная деформация нити определялась по формуле $\varepsilon = \delta/L$, где δ — величина деформации; L — длина образца нити.

Величина условного напряжения (далее напряжения) в нити находится из следующего соотношения: $\sigma = N/d$, где N — сила, возникающая в нити при деформации; d — диаметр нити.

Сигналы с датчиков поступают через АЦП на параллельный порт компьютера, где происходит их запись и последующая обработка. В качестве датчика определения скорости деформирования использован пьезоэлектрический датчик ускорения КД-30. Сила, возникающая в нити при деформации растяжения и изменяющаяся во времени, регистрируется специальным датчиком марки Honeywell РК 80091 с чувствительностью 0,12 мВ/г.

Такой эксперимент позволяет получить зависимости напряжения растяжения от времени при постоянной деформации и построить кривые релаксации. Имея эти кривые, можно определить функцию релаксации, решив задачу аппроксимации.

Для исследования были отобраны три типа синтетических (капрон) нитей, применяемых в трикотажном производстве. Все образцы прошли предварительную вытяжку на стенде. Каждый тип нити имеет следующие параметры: d — диаметр, $\sigma_{\text{вр}} = N_{\text{вр}}/d$ — условное напряжение разрыва нити, где $N_{\text{вр}}$ — усилие разрыва нити.

Тип нити №1	$d = 0,003$ м;	$\sigma_{\text{вр}} = 12$ кН/м.
Тип нити №2	$d = 0,001$ м;	$\sigma_{\text{вр}} = 10$ кН/м.
Тип нити №3	$d = 0,00025$ м;	$\sigma_{\text{вр}} = 28$ кН/м.

С помощью электромагнита экспериментальной установки нить деформировалась в диапазоне значений ϵ от 0,03 до 0,115. Анализ кривых релаксации приведенных на рис. 3—5, показывает, что напряжение, возникающее в нити после приложения нагрузки, быстро падает. В среднем период релаксации напряжений (время, за которое напряжение из начального уровня переходит на уровень установившихся значений) мало зависит от типа нити и равен приблизительно 25 сек.

С помощью электромагнита экспериментальной установки нить деформировалась в диапазоне значений ϵ от 0,03 до 0,115. Анализ кривых релаксации, приведенных на рис. 2, показывает, что напряжение, возникающее в нити после приложения нагрузки, быстро падает. В среднем период релаксации напряжений (время, за которое напряжение из начального уровня переходит на уровень установившихся значений) мало зависит от типа нити и равен приблизительно 25 сек. Скорость релаксации напряжения равна максимуму в начальный момент времени, а затем плавно стремится к нулю. Уровень падения напряжения в нити за период релаксации можно оценить с помощью коэффициента

$$\eta = (\sigma_0 - \sigma_1)/\sigma_0$$

где σ_0, σ_1 — условные напряжения в начальный и конечный моменты времени.

Для исследованных образцов это отношение составляет в среднем 0,20...0,25.

Разработанное экспериментальное оборудование позволяет варьировать скорость деформирования нити за счет изменения уровня электрического питания, подаваемого на обмотку электромагнита, создающего деформацию в нити. Это дает возможность изучить влияние скорости деформирования образцов на величину мгновенного $E_0 = \sigma_0/\epsilon$ и длительного $E_1 = \sigma_1/\epsilon$ модулей упругости нити. На рис. 3 приведены кривые релаксации для различных значений времени деформирования.

Хорошо видно, что время деформирования влияет на характер релаксационного процесса. С ростом времени нагружения происходит сближение модулей упругости и величина длительного модуля приближается к величине мгновенного, а параметр α , стремится к нулю.

δ

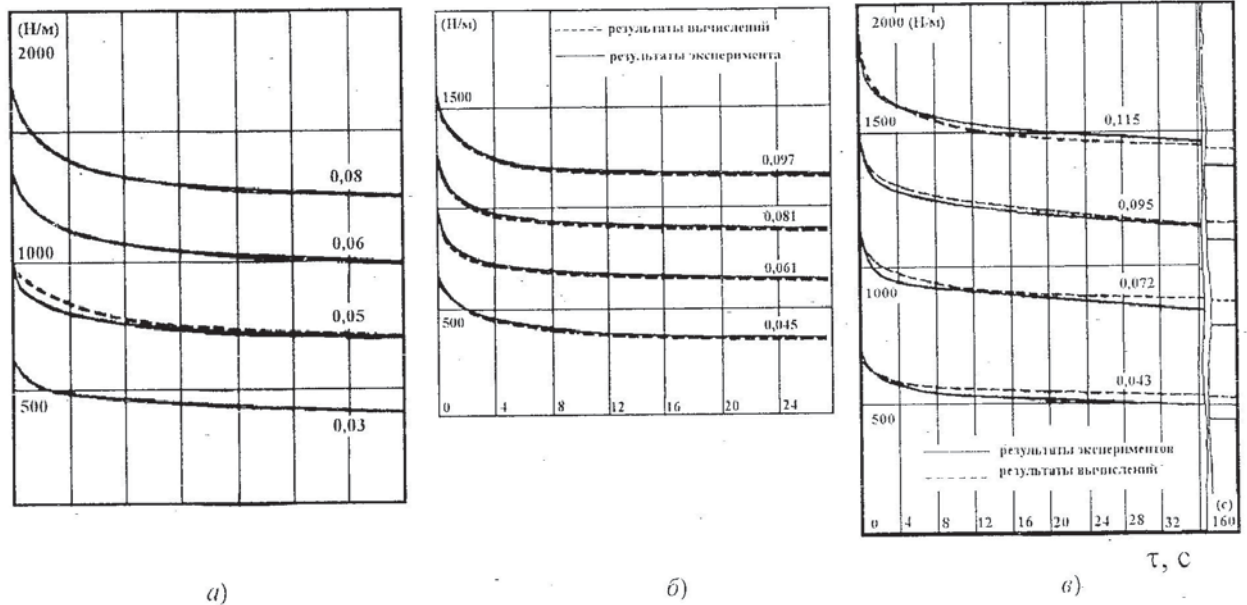


Рис. 2. Кривые релаксации условных напряжений в нити: а — типа № 1, б — типа № 2, в — типа № 3 для различных значений деформации

δ, Н/м

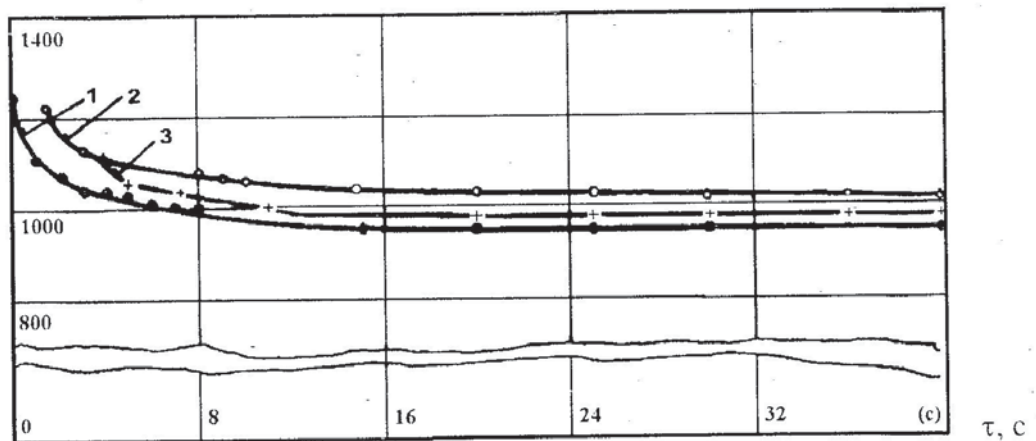


Рис. 3. Кривые релаксации напряжений в нити типа № 1 для различных значений времени и скорости деформирования образца; время деформирования τ, с: 1 — 0, 1; 2 — 2; 3 — 4

Полученные экспериментальные данные в виде кривых релаксации позволяют определить вид функции релаксации (ядра релаксации). В работах Ю.Н. Работнова [5, 6] рассмотрены различные типы ядер релаксации. Для исследования релаксационных процессов в нити были выбраны такие:

экспоненциальное ядро в виде

$$R(t) = Ce^{-\beta t}, \tag{3}$$

в этом случае зависимость напряжения от времени при постоянной величине деформации $\epsilon = \epsilon_0$ примет вид

$$\sigma(t) = E_0 \epsilon_0 [1 - c(1 - e^{-\beta t})]; \tag{4}$$

гиперболическое ядро, которое представим в виде

$$R(t) = \frac{c}{t^\alpha}, \quad (5)$$

зависимость напряжения от времени при постоянной величине деформации $\varepsilon = \varepsilon_0$ примет вид

$$\sigma(t) = E_0 \varepsilon_0 \left[1 - \frac{c}{1-\alpha} t^{1-\alpha} \right], \quad (6)$$

экспоненциально-гиперболическое ядро [7]

$$R(t-\tau) = c(t-\tau)^{-\alpha} \exp[-\beta(t-\tau)], \quad (7)$$

уравнение релаксационного процесса

$$\sigma(t) = E_0 \varepsilon_0 \left[1 - \int_0^t c(t-\tau)^{-\alpha} \exp[-\beta(t-\tau)] d\tau \right], \quad (8)$$

где c , α , β — постоянные, определяемые с использованием метода наименьших квадратов при сравнении экспериментальных и расчетных кривых релаксации.

Для сравнения возможностей каждого уравнения, построенного с применением трех типов ядер (3), (5) и (7) по формулам (4), (6) и (8) были построены расчетные кривые релаксации, приведенные на рис. 4. На этих кривых напряжение представлено в безразмерном виде: $\sigma_1 = \sigma/E_0 \varepsilon_0$

$$\alpha := 0.4 \quad \beta := 0.25 \quad c = 0.08$$

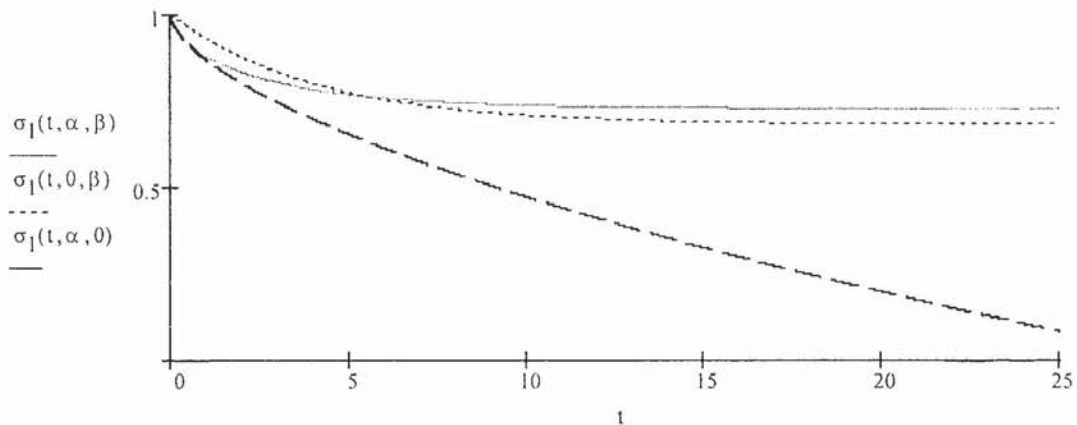


Рис. 4. Расчетные кривые релаксации, построенные для экспоненциального, гиперболического и экспоненциально-гиперболического ядер

Сравнение с экспериментами показало, что экспоненциальное ядро не обеспечивает моделирование высокой начальной скорости релаксации, а гиперболическое достаточно точно воспроизводит начальный период процесса релаксации, но на большом интервале времени приводит к значительным погрешностям.

Наиболее точно процесс релаксации описывается с помощью ядра, объединяющего свойства экспоненциального и гиперболического и называемое ядром Ржаницина. Кривые релаксации, построенные с применением такого ядра, изображены пунктирными линиями на рис. 2.

Выводы

1. Проведенные экспериментальные исследования позволили изучить эффект релаксации, присущий нити. Установлено, что скорость деформирования нити существенно влияет на величину мгновенного и длительного модулей упругости. Показано, что существует значение скорости деформирования нити, при которой явление релаксации практически не наблюдается.

2. Сравнительное исследование моделей для трех типов ядер релаксации (экспоненциального, гиперболического и экспоненциально-гиперболического) позволило предложить закон деформирования нити, связывающий напряжения, деформацию и время. Показано, что наиболее точным является описание свойств нити с применением ядра Ржаницина.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гарбарук В. Н. Проектирование трикотажных машин. — Л.: Машиностроение, 1980. — 472 с.
2. Зайцев С. А., Бударин А. А., Томакова И. А. Исследование динамики индивидуального электромагнитного привода петлеобразующих органов вязальных машин / Механизмы и машины ударного, периодического и вибрационного действия: Матер. конф. — Орел, 2003. — С. 398—384.
3. Волков В. В., Семенов А. Д. Оценка параметров механических характеристик текстильных машин // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. — 2004. — №5(280). — С. 101—102.
4. Каган В. М. Взаимодействие нити с рабочими органами текстильных машин. — М.: Легкая и пищевая промышленность, 1984. — 119 с.
5. Работнов Ю. Н. Ползучесть элементов конструкции. — М.: Наука, 1966. — 362 с.
6. Работнов Ю. Н. Элементы наследственной механики твердых тел. — М.: Наука, 1977. — 384 с.
7. Ржаницин А. Р. Некоторые вопросы механики систем, деформирующихся во времени. — М.: Гостехиздат, 1949. — 140 с.