

УДК 541.64:539.3

АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ, ОПИСЫВАЮЩИХ МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НИТЕЙ НА ОСНОВЕ ВЫСОКОПРОЧНЫХ И ВЫСОКОМОДУЛЬНЫХ ВОЛОКОН

© 1996 г. А. Р. Давыдов*, R. Shishoo**, Э. В. Прут*

*Институт химической физики им. Н.Н. Семёнова Российской академии наук
117977 Москва, ул. Косыгина, 4**Swedish Institute for Textile Research
Box 5402 402 29 Göteborg

Поступила в редакцию 01.12.95 г.

Исследованы механические свойства при растяжении трех видов высокопрочных и высокомодульных волокон различной природы: полиэфирные (Diolen 174S, ENKA), полиэтиленовые (Dyneema SK-60, Dyneema) и полипропиленовые (Request 1481, Bonar). Экспериментальные данные проанализированы на основе различных моделей. Показано, что степень реализации механических параметров (начального модуля и нагрузки при разрушении) моноволокон в нити зависит как от природы волокон, так и от условий получения нити. Предложены модели, учитывающие высокие значения модуля упругости волокон.

Влияние различных конструкционных и технологических параметров на механические свойства высокомодульных и высокопрочных полимерных волокон и нитей на их основе чрезвычайно важны при конструировании композиционных и текстильных материалов. Поэтому необходимо использование математических моделей, позволяющих предсказывать механические свойства нитей, исходя из данных о механических свойствах моноволокон, параметрах нитей и технологии их производства. Такие модели позволили бы разрабатывать новые нити с заданными механическими свойствами без проведения трудоемких и дорогостоящих экспериментальных исследований. В течение последних лет в этом направлении был выполнен ряд работ. В частности, в работах [1, 2] были подробно изучены механические свойства жесткоцепных полимерных волокон ВНИИВЛОН и Кевлар-49, а также кручёных и некручёных нитей и жгутов на их основе. Было показано, что прочностные свойства этих материалов наиболее целесообразно характеризовать с помощью функции распределения Вейбулла. Тем не менее вопрос разработки математических моделей, позволяющих прогнозировать механические характеристики, в особенности модуль упругости кручёных нитей, проработан недостаточно. Эта задача и была целью представленной работы.

В качестве объектов исследования использовали три типа высокопрочных и высокомодульных волокон разной химической природы: полиэфирные, ПЭ и ПП с различными модулями упругости.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ

В настоящее время существуют две основные теоретические модели, позволяющие прогнозировать механические свойства нитей при растяжении.

Первая модель была развита Хэрлом на основе рассмотрения геометрии идеальной нити. Им были получены уравнения [3]

$$E_y/E_f = \cos^2 \alpha \quad (1)$$

$$\begin{aligned} E_y/E_f = F(\alpha, \sigma_1, \sigma_y) = & 2c^2/(1+2\sigma_1)(1-c^2) \times \\ & \times \{(1+\sigma_y)[\ln(c)+2(1+\sigma_1)/(1+2\sigma_1) \times \\ & \times (1-c^{2\sigma_1+1})]-\sigma_y/2[3(1+2\sigma_1)/(2\sigma_1-1)- \\ & -(4(1+\sigma_1)/(2\sigma_1-1))c^{2\sigma_1-1}-1/c^2]\}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $K = E_y/E_f$ – коэффициент отношения модулей упругости нити и моноволокна; α – угол, образуемый моноволокном с осью симметрии нити на поверхности; $c = \cos^2 \alpha$; σ_1 – коэффициент Пуассона для волокна; σ_y – коэффициент Пуассона для нити. Допущения, принятые при выводе представленных моделей, приведены в табл. 1. Для небольших напряжений можно принять [3], что имеет место деформация без изменения объема, т.е. $\sigma_1 = 0.5$ и $\sigma_y = 0.5$. Тогда уравнение (2) записывается как

$$\begin{aligned} E_y/E_f = & (c^2/(1-c^2)) \times \\ & \times (2 + (3 \ln(c) - (9/4)c^2 + 1/(4c^2))) \end{aligned} \quad (3)$$

Таблица 1. Факторы, влияющие на механические свойства крученых нитей и их учет математическими моделями

Фактор	Реальная нить	Модель Херла, описываемая формулой		Энергетический метод
		(1)	(2)	
Форма поперечного сечения нити	Изменяется в зависимости от типа нити	Круглая	Круглая	Круглая
Изменение объема и формы при деформации	Может возникать	Нет	Учитывается экспериментальным значением коэффициента Пуассона	Нет
Скручающие, сдвиговые и изгибающие усилия	Возникают	Нет	Нет	Нет
Изменение диаметра нити при крутке	Имеет место	Нет	Нет	Учитывается экспериментально значением диаметра
Трение	Коэффициент трения зависит от давления	Нет	Нет	Нет
Распределение волокон в поперечном сечении нити	При крутке отклоняется от равномерного из-за перемещения волокон	Нет	Нет	Учитывается экспериментально наблюдаемым распределением моноволокон по зонам

Другая математическая модель, известная как энергетический критерий, впервые описана Тейлором и Райдингом [4]. Модель широко используется для прогнозирования всей диаграммы напряжение–деформация. Суть этого подхода заключается в установлении связи между энергией упругой деформации моноволокна и работой, совершаемой при растяжении нити. Если соотношение между напряжением σ и деформацией моноволокна ϵ_f имеет вид

$$\sigma = \phi(\epsilon_f),$$

то удельная работа W_f при растяжении моноволокна до ϵ_f определяется выражением

$$W_f = \int_0^{\epsilon_f} \phi(\epsilon_f) d\epsilon_f \quad (4)$$

Для линейной части диаграммы напряжение–деформация функция ϕ принимает вид

$$\phi(\epsilon_f) = E_f \epsilon_f (\epsilon_y) \quad (5)$$

Здесь $\epsilon(\epsilon_y)$ – функция зависимости между деформацией моноволокна и нити соответственно.

Предложено несколько путей оценки $\epsilon_f(\epsilon_y)$. Наиболее простая формула была получена Хэрлом при анализе деформации идеальной непрерывной нити [3]

$$\epsilon_f = \epsilon_y \cos^2 \alpha, \quad (6)$$

где угол α вычисляется по формуле

$$\alpha = \operatorname{arctg}(2\pi r/h) \quad (7)$$

(h – длина одного витка крутки ($h = 1/T$, где T – крутка, м^{-1}), а r – расстояние между осью симметрии нити и моноволокном).

Выражение (6) не учитывает влияние трансверсальных сил, поэтому более точные результаты могут быть получены с учетом выражения для больших деформаций нити [3]

$$1 + \epsilon_f = (1 + \epsilon_y)(\cos^2(\alpha) + (1 + \epsilon_y)^{-3} \sin^2(\alpha))^{0.5} \quad (8)$$

Теперь, зная значения E_f и связь между ϵ_f и ϵ_y , интеграл (4) может быть оценен численным интегрированием с использованием данных о диаметре нити и распределении волокон в поперечном сечении нити. Энергию упругой деформации W_{fj} моноволокна j , находящегося на расстоянии r_j от центра в нити, можно записать как

$$W_{fj} = 0.5 E_f (\epsilon_f(\epsilon_y))^2, \quad (9)$$

где E_f – модуль упругости моноволокна.

Дальнейшие расчеты связаны с рассмотрением поперечного сечения нити, разделенной на n -концентрических зон. Масса волокон в i -й зоне имеет вид [5]

$$m_i = (\pi \rho_f \Phi_0 (r_i^2 - r_{(i-1)}^2)) / T \quad (10)$$

Здесь ρ_f – плотность моноволокна, Φ_0 – коэффициент плотности упаковки волокон в нити, r_i и $r_{(i-1)}$ – наибольший и наименьший радиусы колца соот-

вественно. Отсюда количество волокон между радиусами $r_{(i-1)}$ и r_i находится как

$$n_i = \frac{(2m_i)}{\rho_f \pi \bar{r}_f^2} ((4\pi^2 r_i^2 + (1/T^2))^{0.5} + (4\pi^2 r_{(i-1)}^2 + (1/T^2)^{0.5}) \quad (11)$$

(\bar{r}_f – среднеквадратичный радиус моноволокна). Если в зоне i имеется n_i волокон, то суммарная энергия упругой деформации на один виток крутки W_i записывается как

$$W_i = n_i((W_{fj} + W_{f(j-1)})/2) \quad (12)$$

И суммарная энергия упругой деформации W нити равна

$$W = \sum W_i \quad (13)$$

Из выражения (13) следует, что начальный модуль упругости нити вычисляется следующим образом:

$$E_y = (2W)/((\epsilon_y)^2 t), \quad (14)$$

где t – текс нити. Допущения, принятые при построении этой модели, представлены в табл. 1.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Описание нитей

Использовали непрерывные нити: полиэфирное Diolen 174S (ENKA), ПЭ Dyneema SK-60 (Dyneema) и ПП Request 1481 (Bonar) с тексом 122, 44.5 и 111 соответственно. Нить Dyneema была первоначально некрученой, а нити Diolen и Request имели крутку 26 и 50 витков на 1 м соответственно.

От каждого типа нитей отрезали по 15 кусков длиной 500 мм. Образцы закручивали на машине, причем приложенное натяжение равно $t/2$, а скорость крутки – 1000 об/мин. Образцы были закручены до значений 86, 140 и 200 витков/м для Diolen, 100, 150 и 200 витков/м для Request и 40, 100 и 200 витков/м для Dyneema.

Геометрические характеристики крученых нитей

Диаметр нитей и угол, образуемый наружными моноволокнами с осью симметрии крученых нитей, измеряли на проекционном световом микроскопе "Nikon" при увеличении 100. Экспериментальные значения диаметра нитей сравнивали с величинами, вычисленными по эмпирической формуле [3]

$$d = 4.44 \times 10^{-3} \text{ SQR}(t/\rho_f) \quad (15)$$

Экспериментальные данные по значениям угла α сравнивали с рассчитанными по формуле (7). Результаты, представленные в табл. 2, показыва-

ют, что формула (15) неточно отражает зависимость диаметра от величины крутки, тем не менее ее можно использовать для приблизительной оценки диаметра слабо скрученной нити.

Результаты, полученные по формуле (7), согласуются с экспериментальными результатами. Различие зависит от природы волокна.

Измерение свойств моноволокон

Для оценки механических свойств моноволокон из каждой нити извлекали 15 волокон длиной 100 мм. Текс каждого моноволокна оценивали на вибрископе "Lenzing AG". Первая гармоника частоты в вибрископе f_1 равна

$$f_1 = (0.5L) \text{ SQR}(t'/M),$$

где L – длина образца, M – масса образца на единицу длины, t' – текс моноволокна. Отсюда рассчитывали текс моноволокна. Затем те же моноволокна вклеивали в бумажную рамку (использовали эпоксидный клей Araldit (Casco)). База образцов 75 мм. Механические испытания на растяжение проводили на машине "Instron 1122" с использованием пневматических зажимов. Скорость деформации 100 мм/мин. Результаты усредняли по 15 образцам. Полученные суммарные данные по свойствам моноволокон представлены в табл. 3.

Оценка механических свойств крученых нитей

Крученые образцы вклеивали в бумажный шаблон, чтобы предотвратить их от раскручивания. Механические испытания крученых образцов проводили на машине "Instron 1122". База – 75 мм. Полученные данные представлены в табл. 4.

Сравнение теоретических и экспериментальных результатов

На основе экспериментальных данных вычисляли коэффициент K , представляющий собой отношение модулей упругости нити и моноволокна. Этот коэффициент находили из выражений (1) и (3). По формулам (4)–(14) составляли программу и вычисляли коэффициент K . Полученные результаты представлены в табл. 4. Было принято, что моноволокна равномерно распределены по диаметру нитей, а коэффициент упаковки Φ_0 (табл. 2) вычислен аналитически, исходя из экспериментальных данных по диаметру нитей, их тексу, диаметру и плотности материалов моноволокон.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенные исследования механических и геометрических свойств нитей показали, что с

Таблица 2. Зависимость между значением крутки, углом α и диаметром нитей Diolen, Request и Dyneema

Крутка, m^{-1}	Экспериментальный диаметр нити, см	Диаметр нити, рассчитанный по формуле (15), см	Экспериментальный угол, град	Поверхностный угол, рассчитанный по формуле (7), град	Коэффициент плотности упаковки волокон в нити Φ_0
Diolen 174S					
26	0.05	0.042	0	2.34	0.45
86	0.042	0.042	8.1	6.5	0.63
140	0.04	0.042	12.8	10.4	0.70
200	0.037	0.042	13.2	11.7	0.82
Request 1481					
50	0.056	0.049	5	5	0.50
100	0.046	0.049	7.6	8.2	0.73
150	0.0425	0.049	12.5	11.3	0.86
200	0.041	0.049	14.1	14.5	0.90
Dyneema SK-60					
0	—	0.03	0	0	—
40	0.035	0.03	3.0	2.5	0.47
100	0.032	0.03	6.4	5.8	0.55
200	0.030	0.03	12.6	10.7	0.64

Таблица 3. Основные свойства моноволокон Dyneema, Request и Diolen

Тип волокна	Нагрузка при разрушении, Н/текс		Начальный модуль упругости, Н/текс		Текс моноволокна		Плотность моноволокна, г/см	
	среднее значение	отклонение, %	среднее значение	отклонение, %	среднее значение	отклонение, %	среднее значение	отклонение, %
Diolen 174S	0.63	10.25	6.95	11.9	0.5	8.1	1.38	—
Dyneema SK-60	2.3	8.1	79.3	13.7	0.2	7.4	0.97	—
Request 1481	0.68	11.0	5.88	10.5	0.62	7.0	0.91	—

увеличением крутки наблюдается снижение начального модуля, нагрузки при разрушении и диаметра нити. Для нитей Diolen снижение начального модуля составило 33, нагрузки при разрушении – 22 и диаметра – 26% при увеличении крутки от 26 до 200 m^{-1} . Для нитей Request и Dyneema наблюдали меньшее снижение свойств по сравнению с Diolen (для Request начальный модуль уменьшился на 8.2, нагрузка при разрушении – на 4 и диаметр – на 27% (диапазон крутки 50–200 m^{-1}); для Dyneema: 14 и 17% соответственно (диапазон крутки 0–200 m^{-1})). Во всех случаях механические свойства моноволокон были выше, чем свойства нитей. Из сказанного следует, что падение модуля и нагрузки при разрушении зависит от типа нити (волокон). Влияние типа волокон требует дальнейшего анализа. Полученные результаты могут быть объяснены влиянием следующих основных факторов.

1. В результате крутки происходит увеличение трансверсальных сил, что должно приводить к росту прочности, модуля и уменьшению диаметра. Трансверсальные силы появляются из-за того, что внешние волокна в нити приобретают форму спирали и внутренние волокна оказываются сжатыми. С увеличением крутки это приводит к уменьшению сечения. Однако скручивание всегда сопровождается (особенно при высоких скоростях крутки) повреждением и ломкой моноволокон. Так как скручивание проводили при высокой скорости, падение механических свойств скорее всего означает, что преобладает ломка и повреждение волокон по сравнению с ростом трансверсальных сил.

2. Другое возможное объяснение состоит в том, что поскольку волокна находятся под углом к направлению прикладываемой нагрузки, прочность и модуль упругости волокна не реализуются в нити. При этом внешние и внутренние волок-

Таблица 4. Зависимость между механическими свойствами и значениями крутки для нитей Diolen 174S, Dyneema SK-60 и Request 1481

Крутка, м ⁻¹	Нагрузка при разрушении, Н/текс	Начальный модуль, Н/текс	Коэффициент <i>K</i>	Значения <i>K</i> , вычисленные по формулам				Данные регрессионного анализа	
				(1)	(3)	(4) и (6)	(4) и (8)	<i>K</i>	<i>r</i>
Diolen 174S									
26	0.59	6.32	0.910	0.998	0.997	0.992	0.991	0.976–0.028α*	0.995
86	0.54	5.53	0.795	0.987	0.980	0.960	0.953	1.006–0.0065α**	0.931
140	0.49	4.90	0.705	0.967	0.950	0.953	0.940	1.013–0.0088α***	0.938
200	0.46	4.25	0.611	0.958	0.943	0.920	0.896		
Request 1481									
50	0.68	5.80	0.986	0.992	0.988	0.974	0.971	1.081–0.02α*	0.992
100	0.67	5.40	0.918	0.979	0.969	0.953	0.943	1.023–0.009α**	0.979
150	0.67	4.95	0.842	0.961	0.942	0.932	0.914	1.034–0.011α***	0.985
200	0.65	4.74	0.806	0.955	0.906	0.887	0.860		
Dyneema SK-60									
0	2.00	71.1	0.896	–	–	–	–	0.89–0.0085α*	0.999
40	1.85	69.1	0.871	0.998	0.997	0.965	0.964	0.981–0.0049α**	0.955
100	1.78	67.0	0.846	0.989	0.984	0.960	0.958	0.987–0.0069α***	0.950
200	1.62	64.0	0.807	0.965	0.948	0.926	0.910		

* Для экспериментальных значений *K*.

** Для предсказанных по энергетическому методу (4) и (6).

*** Для предсказанных по энергетическому методу (4) и (8).

на нагружены по-разному. Это особенно должно влиять на прочность из-за перегрузки внешних волокон. Необходимо отметить, что даже для некрученой нити (Dyneema SK-60) величина *E* ниже, чем для моноволокна (табл. 4). Следовательно, при растяжении не все волокна в нити нагружаются одновременно. Некрученую нить можно представить как пучок параллельно уложенных моноволокон, и тот факт, что не все волокна нагружены на начальной стадии деформации, означает, что исходные волокна в нити имеют разную длину. С увеличением крутки коэффициент реализации модуля упругости волокна в нити уменьшается.

Сравнение экспериментальных и вычисленных значений коэффициента *K* с рассчитанными (табл. 4) показывает, что последние несколько завышены. Ни один метод не позволил более или менее удовлетворительно прогнозировать падение начального модуля упругости нити при крутке. Тем не менее результаты прогнозирования на основе энергетического метода ближе к истине, чем полученные на основе формул (1) и (2). Расчет по энергетическому методу с зависимостью ϵ/ϵ_y , описываемой формулой (6) без учета сжатия нити при крутке (диаметр нити и ϕ_0 постоянные), дает при высоких значениях крутки более правдоподобные результаты, чем те же расчеты

с использованием экспериментальных данных по сжатию нити при крутке. В частности, коэффициенты *K* для нитей Diolen, Request и Dyneema при значении крутки 200 м⁻¹ были равны соответственно 0.884, 0.767 и 0.873. Это свидетельствует о том, что при больших значениях крутки, когда влияние угла спирали становится существенным, необходимы особо точные измерения (по большему числу образцов) угла α и диаметра нити.

Из полученных экспериментальных данных видно, что существует взаимосвязь между величиной крутки, связанной с углом α , и величиной *K* (рис. 1). Эту зависимость можно представить в виде интерполяционной формулы

$$K = A\alpha + B, \quad (16)$$

где *A* и *B* – эмпирические коэффициенты. Такую же зависимость можно использовать для описания взаимосвязи между коэффициентом *K*, рассчитанным по энергетическому методу, и углом α .

В таком случае представляется возможным оценить адекватность энергетического метода, т.е. того, насколько он полно и правильно описывает процессы, происходящие в скручиваемой нити. Это достигается сравнением коэффициентов *A*, описывающих наклон прямой, для экспериментальных *A_э* и расчетных *A_р* данных. Можно принять, что $Q = (A_p/A_e) \times 100\%$, где *Q* – адекватность

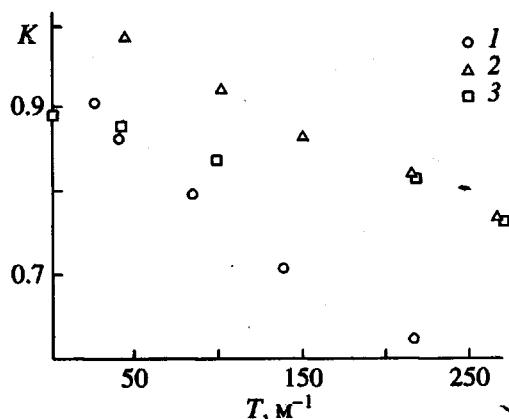


Рис. 1. Зависимость между значением коэффициента K и значением крутизны T для нитей Request (1), Diolen (2) и Dyneema (3).

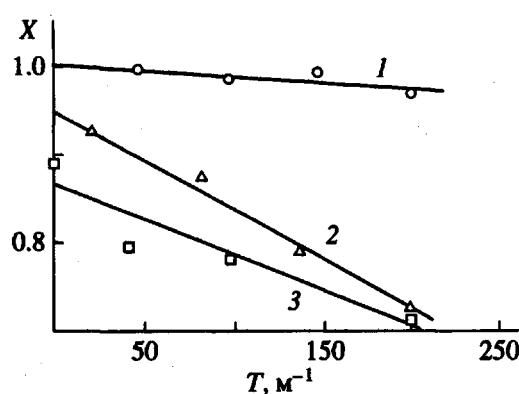


Рис. 2. Зависимость между отношением нагрузок при разрушении нити и моноволокна X и значением крутизны T для нитей Request (1), Diolen (2) и Dyneema (3).

описания. В табл. 4 представлены интерполяционные формулы, полученные для каждого типа нитей, исходя из экспериментальных и рассчитанных по энергетическому методу данных по коэффициенту K . Коэффициент r , приведенный в табл. 4, характеризует адекватность использова-

ния формулы (16) для интерполяции. Считается, что эта формула достаточно точно описывает экспериментальные данные при $r > 0.9$.

Из полученных интерполяционных формул видно, что для нитей Diolen адекватность Q при использовании энергетического метода составляет от 23 до 31% в зависимости от функции, по которой рассчитывали зависимость $\varepsilon/\varepsilon_y$. Для Request адекватность составляет от 44 до 57 и для Dyneema от 58 до 80%. Таким образом, следует отметить, что адекватность является недостаточно высокой для Diolen и Request, хотя для Dyneema она может считаться удовлетворительной.

Для дальнейшего представляется необходимым удалить все допущения и ограничения базовых теорий (табл. 1) и соединить аксиальную деформацию, возникающую при растяжении нити, с одной стороны, и сдвиговую и изгибающую с другой.

Касаясь экспериментальных данных по нагрузке при разрушении, следует отметить довольно высокую степень реализации прочности волокон в исходных нитях (рис. 2). В работе [6] было показано, что прочность снижается с ростом крутизны, начиная с ее определенного значения. Полученные данные подтверждают эту зависимость.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kompanietz L.V., Potapov V.V., Prut E.V. // Polym. Compos. 1985. V. 6. № 1. P. 54.
2. Баженов С.Л., Михеев П.В., Берлин А.А., Куперман А.М., Пучков Л.В., Зеленский Э.С. // Докл. АН СССР. 1984. Т. 277. № 1. С. 107.
3. Hearle J.W.S., Grosberg P., Bacher S. Structural Mechanics of Fibers, Yarns and Fabrics. New York: Wiley, 1969.
4. Threlor L.R.G., Riding G.J. // J. Textile Institute. 1963. V. 156. № 54. P. 1013.
5. Postle R., Carnaby G.A., de Jong S. The Mechanics of Wool Structures. New York: Ellis Horwood Limited, 1988.
6. Яловега В.М., Баженов С.Л., Берлин А.А. // Докл. АН СССР. 1985. Т. 284. № 3. С. 613.

Analysis of Models Describing the Mechanical Properties of Yarn Made of High-Strength High-Modulus Filaments

A. R. Davydov*, R. Shishoo**, and E. V. Prut*

*Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, ul. Kosygina 4, Moscow, 117334 Russia

**Swedish Institute for Textile Research, Box 5402 402 29, Göteborg, Sweden

Abstract—Mechanical properties of three types of high-strength, high-modulus fibers of different nature were studied in tension. Polyester (Diolen 174S, ENKA), polyethylene (Dyneema SK-60, Dyneema), and polypropylene (Request 1481, Bonar) fibers were studied. Experimental data were analyzed within the frameworks of different models. It was demonstrated that the extent to which the mechanical parameters (initial modulus and tenacity) of monofilaments are realized in a yarn is controlled by the nature of filaments and the conditions of spinning the yarn. Models that take into account the high elastic modulus of filaments were suggested.