

**ИССЛЕДОВАНИЕ МАСШТАБНОГО ЭФФЕКТА ПРОЧНОСТИ
НЕКОТОРЫХ ВИДОВ НИТЕЙ И ПРЯЖИ
СО СПЕЦИАЛЬНЫМИ СВОЙСТВАМИ**

**RESEARCH STUDY THE SCALE EFFECT OF STRENGTH
OF CERTAIN TYPES OF THREADS AND YARNS
WITH SPECIAL PROPERTIES**

П.Е. САФОНОВ, Н.М. ЛЕВАКОВА, С.С. ЮХИН

P.E. SAFONOV, N.M. LEVAKOVA, S.S. YUKHIN

(ООО "ТЕКС-ЦЕНТР",

Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство))

(TEKS-CENTRE Ltd,

Russian State University named after A.N. Kosygin (Technologies. Design. Art))

E-mail: pavlin722007d vandex.ru; vss@statT.msta.ac.ru.

Исследование посвящено экспериментальному изучению масштабного эффекта прочности комплексных арамидных нитей и некоторых видов пряжи со специальными свойствами. Полученные результаты направлены на повышение точности оценки напряженности процессов переработки нитей и пряжи в ткачестве.

The paper is devoted to the experimental study of the scale effect of the strength of complex aramid yarns and some types of yarn with special properties. The obtained results are aimed at increasing the accuracy of estimation of the intensity of the processing of yarns and threads and yarn weaving.

Ключевые слова: параарамидные нити, пряжа из синтетических волокон, масштабный эффект, распределение Вейбулла, прочность нитей и пряжи.

Keywords: paraaramid threads, yarns of synthetic fibers, scale effect, Weibull distribution, strength threads and yarn.

Значительный практический интерес представляет вопрос об аналитическом и экспериментальном исследовании масштабного эффекта прочности комплексных высокопрочных и высокомодульных нитей и пряжи со специальными свойствами, используемых для изготовления тканей технического назначения.

Наличие масштабного или размерного эффекта следует из статистических (физических) теорий разрушения твердого тела. В основе одной из статистических теорий лежит гипотеза слабого звена, где прочность волокна длиной l определяется прочностью его наиболее слабого – дефектного места [1]. Присутствие дефектов в волокнах и нитях,

которые распределяются случайным образом по всей их длине, приводит к тому, что характер законов распределения и средние значения разрывных характеристик зависят от размера образца, то есть увеличивается вероятность того, что более крупные и опасные дефекты встретятся с увеличением длины образца.

Масштабный эффект прочности текстильных нитей на сегодняшний день остается малоизученным, что осложняет оценку перерабатывающей способности того или иного вида нитей, в особенности современных видов нитей со специальными свойствами. Так, например, оценка свойств нитей при растяжении проводится при стандарт-

ной базе испытаний 500 мм, а длина нити основы в заправке ткацкого станка составляет от 1500 до 1800 мм.

Теория наислабейшего звена применительно к текстильным материалам была успешно использована в работах проф. В.П. Щербакова и его учеников и соавторов [1...3]. В основе разработанного подхода лежат результаты В. Вейбулла, получившего соответствующую функцию распределения. Преимущество использования распределения Вейбулла в данном случае заключается в том, что указанное распределение позволяет экстраполировать экспериментальные значения прочности в область малых вероятностей.

Воспользуемся записью распределения Вейбулла, полученной проф. В.П. Щербаковым:

$$\Phi = 1 - \exp \left[- \frac{\ell}{\ell_0} \left(\frac{\sigma - \sigma_0}{\sigma_w} \right)^\alpha \right]. \quad (1)$$

Распределение Вейбулла имеет два параметра: α – коэффициент формы кривой распределения, в данном случае определяет структурные особенности материала, и σ_w – коэффициент масштаба, имеет физический смысл модального значения прочности. Параметр ℓ_a характеризует длину (база испытаний) стандартного образца нити при испытаниях, величина σ_0 – это пороговое напряжение, если $\sigma = \sigma_0$, то разрушения не произойдет.

Формулы для средней прочности, дисперсии прочности и коэффициента вариации имеют следующий вид, соответственно:

$$\bar{\sigma} = \sigma_w \left(\frac{\ell_0}{\ell} \right)^{\frac{1}{\alpha}} \Gamma \left(1 + \frac{1}{\alpha} \right), \quad (2)$$

$$D = \sigma_w^2 \left(\frac{\ell_0}{\ell} \right)^{\frac{2}{\alpha}} \left[\Gamma \left(1 + \frac{2}{\alpha} \right) - \Gamma^2 \left(1 + \frac{1}{\alpha} \right) \right], \quad (3)$$

$$C_w = \sqrt{\frac{\Gamma \left(1 + \frac{2}{\alpha} \right)}{\Gamma^2 \left(1 + \frac{1}{\alpha} \right)}} - 1. \quad (4)$$

Если в формулах (2) и (3) заменить напряжение σ на нагрузку P , а также параметр σ_w на P_w , тогда итоговое выражение для определения средней разрывной нагрузки нити при любой длине ℓ при известной базе ℓ_a примет вид:

$$\bar{P} = P_w \left(\frac{\ell_0}{\ell} \right)^{\frac{1}{\alpha}} \Gamma \left(1 + \frac{1}{\alpha} \right), \quad (5)$$

где \bar{P} – средняя разрывная нагрузка, сН; ℓ_0 – зажимная длина нити, мм; P_w и α – параметры распределения Вейбулла; $\Gamma \left(1 + \frac{1}{\alpha} \right)$ – гамма-функция аргумента.

Таким образом, для определения средней разрывной нагрузки нити при любой длине ℓ необходимо знать параметры распределения Вейбулла (P_w и α) из опытов на растяжение при заданной базе испытаний ℓ_0 .

Итак, исследуем масштабный эффект прочности для трех видов параарамидных нитей малой линейной плотности, которые находят применение при изготовлении тканей специального назначения и при этом отличаются значительной дефектностью структуры (присутствуют массовые обрывы отдельных филаментов – "шишки"). Для определения параметров распределения Вейбулла проведем испытания разрывной нагрузки для нитей Армалон 2,2 и 3,3 текс на базе 200 мм и для нитей Руслан 6,3 текс на базе 500 мм. Далее в среде Statistica проведем обработку данных и построим гистограммы распределения прочности нитей, затем аппроксимируем экспериментальные распределения распределением Вейбулла с помощью встроенной функции.

На рис. 1 представлена гистограмма распределения значений разрывной нагрузки нити Руслан 6,3 текс, аппроксимированная теоретическим распределением Вейбулла. В табл. 1 представлены значения параметров распределения Вейбулла P_w и α для трех видов арамидных нитей малой линейной плотности.

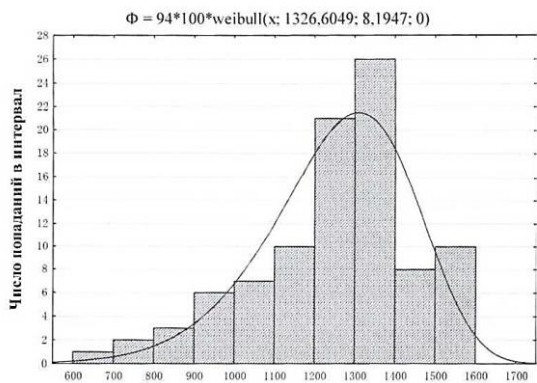


Рис. 1

Т а б л и ц а 1

Наименование нити	Параметр	
	$P_w, \text{сН}$	α
Армалон 2,2 текс (14 филам.)	414,447	3,701
Армалон 3,3 текс (18 филам.)	591,927	11,454
Руслан 6,3 текс (50 филам.)	1326,605	8,195

На основании данных табл. 1 можно сделать вывод о том, что в наибольшей степени масштабный эффект прочности будет выражен для нитей Армалон 2,2 текс, характеризующихся минимальным значением параметра α , что свидетельствует о высоком коэффициенте вариации по прочности, то есть с увеличением длины данной нити ее прочность существенно снижается. При длине 50 мм разрывная нагрузка составит 544 сН, а при длине 500 мм уже 292 сН – на 46% меньше.

Таким образом, полученные результаты могут быть использованы для оценки напряженности условий снования и ткачества, так как по известной длине нити в заправке машины или станка можно оценить ее среднюю прочность и выбрать рациональный уровень натяжения. Так, длина нити основы в заправке рапирного станка 1500...1800 мм, а значит средняя расчетная прочность нити Армалон 2,2 текс при такой длине составит всего 207...217 сН.

По формуле (5) проведем расчет средней разрывной нагрузки для исследуемых арамидных нитей в зависимости от длины образца l . Полученные результаты представлены на рис. 2 (масштабный эффект прочности арамидных нитей малой линейной плотности в логарифмических координатах).

Видно, что прочность в логарифмических координатах уменьшается линейно при увеличении длины образца, тогда как в обычном масштабе прочность от длины описывается показательной функцией [4].

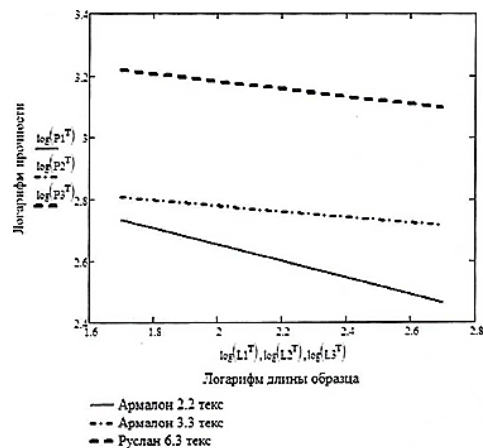


Рис. 2

Далее для подтверждения полученных результатов оценим масштабный эффект прочности для трех видов пряжи из синтетических волокон. В табл. 2 представлены значения параметров распределения Вейбулла для пряжи Арселон 29 текс, Протекс 100% 30 текс, Протекс/Арамид 70/30% 30 текс. На рис. 3 представлена гистограмма распределения значений разрывной нагрузки смешанной пряжи 70/30% Протекс/Арамид, аппроксимированная теоретическим распределением Вейбулла.

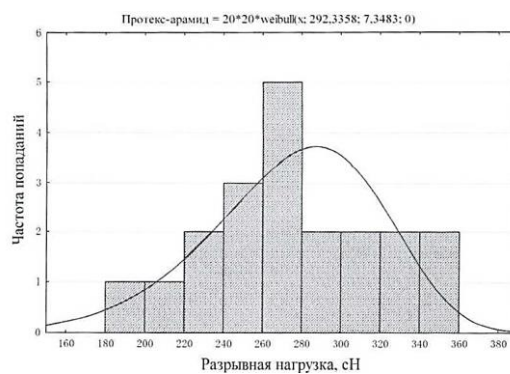


Рис. 3

Т а б л и ц а 2

Наименование нити/пряжи	Параметры распределения	
	$P_w, \text{сН}$	α
Арселон 29 текс	637,997	4,201
Протекс 100% 30 текс	254,915	3,208
Протекс/Арамид 70/30% 30 текс	292,336	7,348

На основании данных табл. 2 можно сделать вывод о том, что в наибольшей степени масштабный эффект прочности выражен для 100%-ной пряжи Протекс, характеризующейся минимальным значением $\alpha=3,208$, далее следует пряжа Арселон с $\alpha = 4,201$.

По формуле (5) проведем расчет средней разрывной нагрузки для исследуемых видов пряжи в зависимости от длины образца l . Полученные результаты представлены на рис. 4 в логарифмических координатах (масштабный эффект прочности различных видов пряжи).

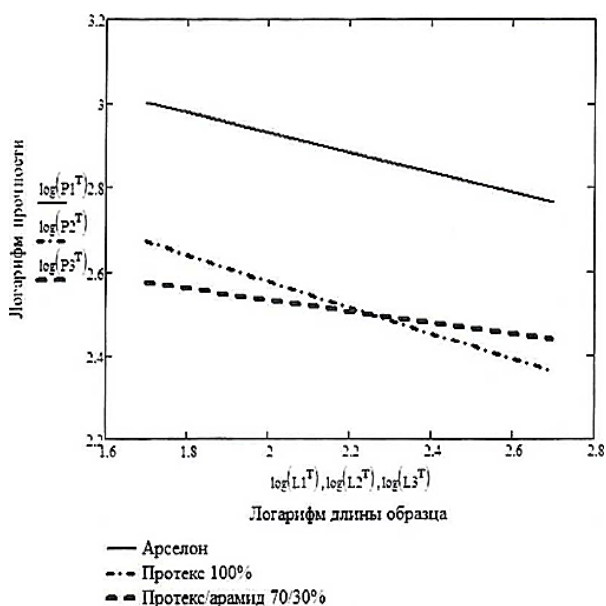
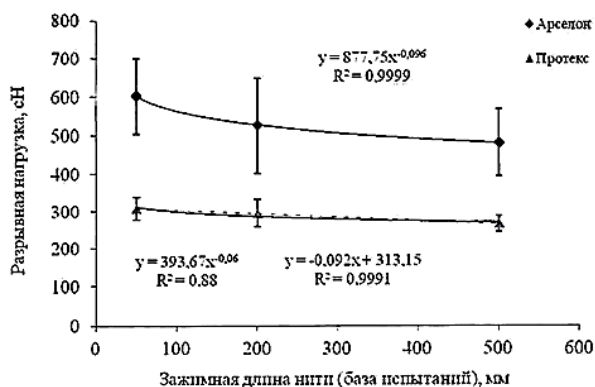
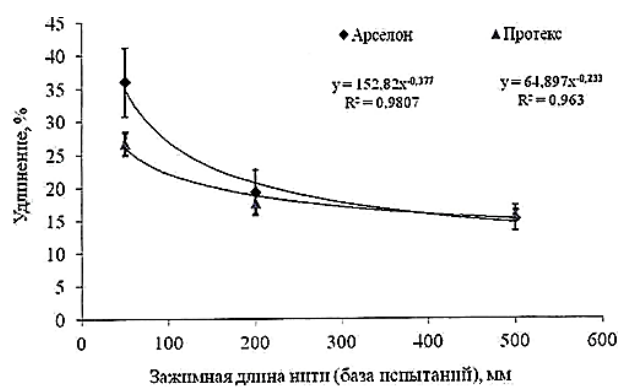


Рис. 4

Можно сделать вывод о том, что средняя прочность пряжи Протекс 100% выше



а)



б)

Рис. 5

средней прочности смесовой пряжи Протекс/Арамид 70/30%. Но так как параметр α смесовой пряжи больше, чем у 100%-ной пряжи, то масштабный эффект у 100%-ной пряжи Протекс выражен сильнее и поэтому для более коротких образцов такой пряжи средняя прочность оказывается выше.

Далее определим коэффициент реализации средней прочности волокон в пряже:

$$k = \frac{(\alpha_0)^{\frac{1}{\alpha}}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right)} \quad (6)$$

Для пряжи Арселон имеем $k = 0,62$, для 100%-ной пряжи Протекс $k = 0,57$ и для смесовой пряжи Протекс/Арамид 70/30% имеем максимальное значение коэффициента реализации прочности $k = 0,71$. Таким образом, установлено, что добавление 30% параарамидных волокон в смесь к модифицированным полиакрилонитрильным волокнам Протекс позволяет увеличить коэффициент реализации средней прочности на 24,5%.

С целью более детального исследования масштабного эффекта прочности синтетической пряжи проведены испытания пряжи Протекс и Арселон на разрывной машине при различной зажимной длине (базе), а именно при 50, 200 и 500 мм. Результаты исследований разрывной нагрузки и удлинения от базы испытания приведены на рис. 5 (разрывная нагрузка (а) и удлинение (б) пряжи в зависимости от зажимной длины).

Установлено, что разрывная нагрузка и удлинение пряжи Арселон уменьшаются с увеличением базы испытаний в соответствии со степенным законом, разрывная нагрузка пряжи Протекс также уменьшается с увеличением базы, но происходящие изменения лучше описываются линейной зависимостью, чем степенной. Интересно, что удлинения Арселона и Протекса на базе 500 мм практически совпадают, хотя на базе 50 мм удлинение пряжи Арселон было на 35% выше, чем пряжи Протекс. Это означает, что масштабный эффект по удлинению у Арселона выражен больше, чем у Протекса.

Для экспресс-оценки масштабного эффекта прочности пряжи Арселон и Протекс и их степени дефектности воспользуемся коэффициентами $k_p = P_2^*/P_1^*$ и $k_\varepsilon = \varepsilon_2^*/\varepsilon_1^*$, которые равны отношению средней прочности и среднего удлинения, соответственно, при различной базе испытаний [4]. Если использовать произведение данных коэффициентов $k_p k_\varepsilon$, то можно охарактеризовать изменение работы разрушения при различной базе.

Так, для пряжи Арселон получены значения $k_p k_\varepsilon = 0,341$, а для пряжи Протекс $k_p k_\varepsilon = 0,513$. Из полученных результатов можно сделать вывод о том, что дефектность у пряжи Арселон проявляется больше в разрывной нагрузке, удлинении и работе разрыва, чем у пряжи Протекс.

ВЫВОДЫ

1. Для параарамидных нитей малой линейной плотности 2,2...6,3 текс и пряжи из синтетических термо- и огнестойких волокон впервые получены параметры распределения Вейбулла, описывающего разрывную нагрузку.

2. Исследован характер изменения средней разрывной нагрузки нитей и пряжи в зависимости от базы испытаний. Сделаны вы-

воды о степени дефектности параарамидных нитей малой линейной плотности и пряжи из синтетических волокон.

3. Предложено использовать полученные результаты для оценки напряженности технологического процесса переработки нитей или пряжи, в частности, устанавливать уровень заправочного натяжения на ткацком станке исходя из средней прочности, рассчитанной для конкретной длины нити основы в заправке.

ЛИТЕРАТУРА

1. Щербаков В.П., Скуланова Н.С. Основы теории деформирования и прочности текстильных материалов. – М.: МГТУ имени А.Н. Косыгина, 2008.
2. Скуланова Н.С. Проектирование технологии и сформированной из нетрадиционных видов сырья аппаратной шерстяной пряжи: Дис...докт. техн. наук. – М.: МГТУ имени А.Н. Косыгина, 2008.
3. Денисова Е.В. Разработка структуры и технологии получения неоднородных нитей для технических изделий: Дис...канд. техн. наук. – М.: МГУДТ, 2015.
4. Перепелкин К.Н. Армирующие волокна и волокнистые полимерные композиты. – СПб.: Научные основы и технологии, 2009.

REFERENCES

1. Shcherbakov V.P., Skulanova N.S. Osnovy teorii deformirovaniya i prochnosti tekstil'nykh materialov. – M.: MGTU imeni A.N. Kosygina, 2008.
2. Skulanova N.S. Proektirovanie tekhnologii i sformirovannoy iz netraditsionnykh vidov syr'ya apparatnoy sherstyanoy pryazhi: Dis....dokt. tekhn. nauk. – M.: MGTU imeni A.N. Kosygina, 2008.
3. Denisova E.V. Razrabotka struktury i tekhnologii polucheniya neodnorodnykh nitey dlya tekhnicheskikh izdeliy: Dis....kand. tekhn. nauk. – M.: MGUDT, 2015.
4. Perepelkin K.N. Armiruyushchie volokna i voloknistye polimernye kompozity. – Spb.: Nauchnye osnovy i tekhnologii, 2009.

Рекомендована кафедрой проектирования и художественного оформления текстильных изделий РГУ имени А.Н. Косыгина. Поступила 21.01.19.