

**ОПИСАНИЕ, АНАЛИЗ И РАСЧЕТ НА ПРОЧНОСТЬ
СМЕШАННОЙ ШЕРСТЯНОЙ ПРЯЖИ
С РЕГЕНЕРИРОВАННЫМИ ПЭТ-ВОЛОКНАМИ**

**DESCRIPTION, ANALYSIS AND STRENGTH ANALYSIS
OF MIXED WOOL YARN WITH REGENERATED PET FIBERS**

*Н.С. СКУЛАНОВА, Н.С. ЗУБКОВА, Т.В. ПОДОЛЬНАЯ,
С.А. ГОЛАЙДО, Т.И. ПОЛЯКОВА, С.Л. ХАЛЕЗОВ*

*N.S. SKULANOVA, N.S. ZUBKOVA, T.V. PODOLNAYA,
S.A. GOLAYDO, T.I. POLYAKOVA, S.L. KHALEZOV*

(Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство),
АО "ФПГ Энергоконтракт",
Ивановский государственный политехнический университет)

(Russian State University named after A.N. Kosygin (Technologies. Design. Art),
АО "FPG Energokонтракт",
Ivanovo State Polytechnical University)

E-mail: pryadenieskulanova@mail.ru

Показана безопасность волокон из вторичного бутылочного сырья (ПЭТ-флекс). Установлена эффективность текстильных волокон из бутылочных отходов, являющихся новым техническим и технологическим решением в сырьевой базе текстильной промышленности. Доказана возможность переработки слабых ПЭТ-волокон в ткацком и трикотажном производстве. Обосновано уменьшение разрывной нагрузки смешанной пряжи при увеличении вклада ПЭТ-волокон.

Safety of fibers from recycled bottle raw materials (PET flex) is shown. The efficiency of textile fibers from bottle waste, which is a new technical and technological solution in the raw material base of the textile industry, has been established. The possibility of processing weak PET fibers in weaving and knitting industries has been proven. The reduction of the breaking load of mixed yarn with an increase in the contribution of PET fibers is substantiated.

Ключевые слова: нить, пряжа, кручение, прочность, напряжение, деформация, растяжение, сжатие, модуль упругости, коэффициент Пуассона.

Keywords: thread, yarn, torsion, strength, tension, deformation, stretching, compression, modulus of elasticity, Poisson's ratio.

Полиэфирные нити и волокна на основе полиэтилентерефталата (ПЭТ) всегда были и остаются одним из основных видов текстильного сырья. Полиэфирные волокна из первичного ПЭТ давно и широко применяют для изготовления пряж, смешанных с шерстью, хлопком, вискозным волокном и др. Проектирование любой пряжи представля-

ет собой задачу условной оптимизации, где в качестве целевой функции принимается стоимость пряжи. На целевую функцию наложены ограничения, например, прочность пряжи, доленое участие компонентов и пр. Для снижения стоимости пряжи и повышения экономичности производства начинает применяться процесс получения волокон из

вторичного бутылочного сырья (ПЭТ-флексов). Для волокон из ПЭТ-флексов требуется оборудование с новыми техническими возможностями и решениями. В [1] отмечается, что получение текстильных волокон из бутылочных отходов является технологическим прорывом.

Сразу же возникает вопрос о вредности и безопасности ПЭТ-сырья. В соответствии с прогнозом на 2019 г. производство ПЭТ бутылок составит около 50% общего объема упаковок в мире (1500 млрд. ед.) [2]. Роспотребнадзор и независимые эксперты опровергли данные о вредности ПЭТ-бутылок для здоровья. В 2014 г. Институт технологии и упаковки "Fraunhofer" YVV (Германия) – головной европейский институт, ответственный за безопасность упаковки пищевых продуктов в ЕС, – провел масштабное исследование российских образцов и подтвердил полную безопасность ПЭТ-бутылок. В исследованиях образцов из России не были обнаружены фталаты, бис-фенол, метанол и формальдегид. По заключению института образцы соответствуют всем требованиям безопасности ст. 3 Рамочного положения ЕС №1935/2004 при контакте со всеми типами пищевых продуктов, при любых условиях контакта, включая повышение температуры до 260° и при любом уровне наполнения.

В соответствии с межгосударственными стандартами ГОСТ 32085–2013 Волокна химические (синтетические). Требования безопасности, ГОСТ 32075–13 Материалы текстильные. Методы определения токсичности, ГОСТ 29332–2006 Волокна химические. Методы определения массовой доли замасливателя проведено исследование свойств ПЭТ-волокон из вторичного бутылочного сырья. Определены индекс токсичности (нормативное значение 70...120) и массовая доля замасливателя (нормативное значение 3%). Для образцов стандартного полиэфирного волокна, которое используется при переработке в смесях с шерстяными и хлопковыми волокнами, и образцов полиэфирного волокна из вторичного бутылочного сырья индекс токсичности и массовая доля замасливателя не превысили нормативных показателей и составили соответственно 83 – 84; 0,12 – 0,14%.

Сейчас в России регенерированные ПЭТ-волокна из ПЭТ-флексов изготавливают на АО "Втор-Ком", "РБ-групп", "Комитекс", "Спецгазстрой", "Селена" и др. [3]. Эти волокна широко используются при производстве геотекстильных материалов, основ для линолеума и тафтинговых материалов, гидроизоляционного полотна, утеплителей швейных изделий.

Ниже приведены основные характеристики ПЭТ-волокна из ПЭТ-флексов.

Волокно круглого сечения из вторичного полиэтилентерефталата белого, коричневого, голубого, зеленого, черного цвета. Длина 35...75 мм. Линейная плотность 0,2...1,5 текс. Линейная плотность титра – 0,6 текс; отклонение титра 9,06 CV%, ГОСТ 10213.1. Длина резки 64...32 мм; отклонение от средней длины резки 0,43 CV%, ГОСТ 10213.4. Температура плавления 256...260°С, ГОСТ 21553–76. Прочность волокна 2,52 сН/текс; отклонение по прочности 16,83 CV%. Разрывная деформация 19,5 %; отклонение деформации при разрыве 17,53 CV%, ГОСТ 10213.2–2002. Усадка в горячем воздухе 110°С 15 мин, отклонение 1,82%, ГОСТ 13481–2001.

Количество извитков 5,65 см⁻¹; стабильность извитков 71,39%, ГОСТ 13411–90. Процент замасливателя на волокне с учетом влажности 0,3...0,4 %, ГОСТ 29332–92.

Изготовление пряжи 80 текс проведено по аппаратной системе прядения с вложением 25% ПЭТ-волокон и пряжи 90 текс с вложением 45% по следующим технологическим переходам (табл. 1).

Т а б л и ц а 1

№	Наименование переходов	Марка машины
1	Трепание	АРТ-120 III
2	Хранение в лабазах	ЛРМ-40-III
3	Крашение	АКД –У6
4	Отжим	ФМК-1521К-1
5	Сушка	ЛС-5III
6	Хранение в лабазах	ЛРМ-40-III
7	Расщипывание	ЩЗ-140-IIIЗ
8	Парозамасливание	ПЗУ-III2
9	Смешивание в замкнутом цикле	С-12-III2
10	Кардочесание	СР-643
11	Прядение	ПБ-114-III

В начале статьи сказано, что пряжа должна иметь наименьшую стоимость при наличии некоторых условий, наложенных на целевую функцию. Ясно, что включение волокон из бутылочных отходов снижает стоимость многокомпонентной пряжи с полиэфирными волокнами из первичного ПЭТ. Конечно, при этом пряжа не становится лучше в отношении других свойств, в первую очередь надо иметь в виду прочность. Возникает вопрос о возможности переработки ослабленной пряжи на ткацких и трикотажных машинах. Другими словами, достаточно ли прочность исследуемой пряжи в ткачестве и трикотажном производстве. Здесь известные регрессионные формулы расчета разрывной нагрузки шерстяной пряжи непригодны, так как имеем дело с совершенно новым волокном. Тогда воспользуемся универсальным методом проектирования нити и пряжи, разработанным В.П. Щербаковым и Н.С. Скулановой [4], [5].

Рассматриваем следующие варианты аппаратных смесей: 1) 1-й компонент – волок-

на из ПЭТ-флексов, доленое участие 0,25; 2-й компонент – волокна трех видов шерсти – а) группа 2.1-С – шерсть мериносковая 64^к (М21Шмз); б) группа 3.1-С – шерсть полутонкая помесная 58^к-56^к (Пт/П26-28Шмз); в) группа 4.1-С – шерсть кроссбредная 50^к-48^к (К30-33Шмз). 2) Во втором варианте доленое участие 1-го компонента увеличивается до 0,45; состав второго компонента в смеси остается неизменным при уменьшении доли до 0,55. Следовательно, проводим расчет для 6 видов смесей: 25% волокон из ПЭТ-флексов + 0,75% волокон шерсти мериносковой 64^к (М21Шмз); ... 45% волокон из ПЭТ-флексов + 55% волокон шерсти кроссбредной 50^к-48^к (К30-33Шмз). Перечисленные группы шерсти являются наиболее распространенными в промышленности. Для примера характеристики одной из групп исходных данных волокон и пряжи приведены в табл. 2 (геометрические и механические параметры волокон компонентов) и табл. 3 (геометрические и механические параметры пряжи).

Т а б л и ц а 2

№	Параметры волокна	1-й компонент	2-й компонент
1		ПЭТ	Шерсть
2	L – длина, мм	64	50
3	T – линейная плотность, мтекс	600	456
4	P – разрывная нагрузка, сН	1,512	6,76
5	C _{рв} – квадратическая неровнота прочности, %	16,83	42
6	ε – разрывная деформация, %	17,53	33
7	μ – коэффициент трения по волокну	0,2	0,5
8	γ – плотность, г/см ³	1,38	1,32
9	β – массовая доля, %	25	75
10	v _в – коэффициент Пуассона	0,3	0,3

Т а б л и ц а 3

№	Параметры	Значение
1	T _{пр} – линейная плотность, текс	80
2	C _{T 500} – неровнота линейной плотности, %	8,2
3	γ _{пр} – плотность пряжи, г/см ³	0,55
4	K – крутка пряжи, м ⁻¹	320
5	v _{пр} – коэффициент Пуассона	0,5

Теория прочности пряжи с подробными примерами изложена в [4...8]. Поэтому при-

ведем лишь результаты вычислений: 1) по приближенной теории, описывающей разрушение пряжи без учета взаимодействия волокон, когда удельное напряжение $\bar{\sigma}_y(\beta)$, представляющее собой отношение предела прочности (разрывного напряжения) пряжи к пределу прочности волокна удвоенной длиной $2\ell_s$, равно $\cos^2 \beta$; 2) по уточненной теории, в соответствии с которой:

$$\tilde{\sigma}_y(\beta, v_f, v_y) = \frac{2 \cos^2 \beta}{(1 + 2v_f)(1 - \cos^2 \beta)} \times \left\{ (1 + v_y) \left[\ln \cos \beta + \frac{2(1 + v_f)}{1 + 2v_f} (1 - (\cos \beta)^{2v_f+1}) \right] - \left[-\frac{v_y}{2} \left[\frac{3(1 + 2v_f)}{2v_f - 1} - \frac{4(1 + v_f)}{2v_f - 1} (\cos \beta)^{2v_f-1} - \frac{1}{\cos^2 \beta} \right] \right] \right\}; \quad (1)$$

3) Удельное напряжение определяется по формуле:

$$\tilde{\sigma}_y(\beta; v_f = 0,5; v_y = 0,5) = \frac{1}{4} + \frac{9}{4} \cos^2 \beta + \frac{3 \cos^2 \beta}{1 - \cos^2 \beta} \ln \cos \beta.$$

Это существенно упрощает интерпретацию проводимых расчетов. В приведенных выражениях β – угол кручения, v_f – коэффициент Пуассона волокна, v_y – коэффициент Пуассона пряжи. Вычисляется напряжение в разрывающемся шерстяном волокне и далее напряжение в пряже. Переходим от напряжений к силам; прочность разрывающегося шерстяного компонента становится рав-

ной P_y . Умножим P_y на коэффициенты реализации, скольжения и множитель $(1+e)$, учитывающий как разрывающиеся, так и остальные, еще неразорванные, ПЭТ-волокна, воспринимающие внешнюю нагрузку, и вычислим прочность пряжи. Результаты вычислений сведены в табл. 4 (прочность пряжи с ПЭТ-волокнами).

Т а б л и ц а 4

Группа смеси	Состав смеси	Вариант 1 (25% ПЭТ)			Вариант 2 (45% ПЭТ)		
		$P_{\cos^2 \beta}$	$P_{\text{точное}}$	$P_{v=0,5}$	$P_{\cos^2 \beta}$	$P_{\text{точное}}$	$P_{v=0,5}$
2.1-С	Шерсть мериносковая 64 ^к , Шдл., сорн., (М21ШМз)	619,3	575,8	566,3	575,5	535,5	526,7
	ПЭТ-волокна						
3.1-С	Шерсть полутонкая помесная 58 ^к -56 ^к , Ш дл., сорн. (Пт/П26-28ШМз)	495,7	460,9	453,3	477,4	444,2	436,9
	ПЭТ-волокна						
4.1-С	Шерсть кроссбредная 50 ^к -48 ^к , Ш дл., сорн. (К30-33ШМз)	411,9	383,0	376,6	400,5	372,7	366,5
	ПЭТ-волокна						

Из таблицы следует, во-первых, уменьшение разрывной нагрузки смешанной пряжи при увеличении вклада ПЭТ-волокон; во-вторых, точное решение $P_{\text{точное}}$ дает снижение прочности $P_{\cos^2 \beta}$, предсказанной упрощенной теорией. Объяснение первого явления сравнительно просто. ПЭТ-волокно существенно слабее шерстяного: $P_{\text{ПЭТ}} = 1,51$ сН, $P_{\text{шерсть}} = 6,76$ сН. Увеличение содержания ПЭТ-волокон с 25 до 45% при соответствующем уменьшении числа прочных волокон шерсти приводит к снижению прочности пря-

жи. Сложнее обстоит дело с объяснением уменьшения прочности с учетом взаимодействия волокон $P_{\text{точное}}$ по сравнению $P_{\cos^2 \beta}$. Здесь надо обратиться к известным положениям сопротивления материалов. В условиях растягивающего σ_f и сжимающего g напряжений деформация волокна равна $\epsilon_f = \frac{\sigma_f}{E_f} + \frac{2v_f}{E_f} g$, где v_f – коэффициент Пуассона волокна. Сжимающее напряжение g увеличивает деформацию волокна ϵ_f , и для

достижения предельной деформации требуется меньшее растягивающее напряжение σ_f , которое и определяет прочность пряжи. Тогда с увеличением крутки K возрастает сжимающее напряжение g (рис. 1 – удельные растягивающие и поперечные напряжения в пряже), что приводит к уменьшению растягивающего σ_f , то есть прочность пряжи снижается [9].

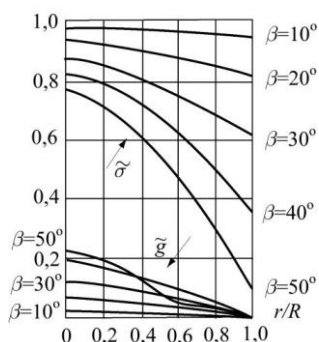


Рис. 1

На первый взгляд здесь наблюдается явное противоречие, так как именно кручение придает пряже необходимую прочность. Объяснение следует искать в механизме явления при кручении. В пряже, образованной волокнами конечной длины l , возникает скольжение волокон, начинающееся от их концов, которые не закреплены и натяжение которых должно равняться нулю. Благодаря взаимодействию с соседними волокнами натяжение возрастает от нуля до уровня, при котором проскальзывания нет, то есть до максимального напряжения σ_f в волокне. Длина $l_{кр} = 2l_s$, передающая усилие соседним волокнам, является критической длиной. Для $l \geq l_s$ система волокон является самоуплотняющейся, то есть чем сильнее натяжение, тем сильнее поперечное обжатие. Если же $l < l_s$ то защемление волокон отсутствует, и волокна скользят одно относительно другого. Именно в этом смысле нужно понимать "скользящие волокна". Длина скольжения в пряже вычисляется по формуле [6...8]:

$$l_s = \sqrt{\frac{2 \cdot 1000 r_f}{K \mu (1 - \cos^2 \beta)}}, \quad (2)$$

где r_f – радиус волокна; K – крутка пряжи; μ – коэффициент трения между волокнами; β – угол кручения. При расчете длины скольжения на скользящее волокно действует суммарная сила трения, препятствующая скольжению на расстоянии s от конца волокна. При этом есть основание предполагать, что контакт между волокнами происходит не по всей поверхности волокна длиной l и радиусом r_f . Любое волокно контактирует с окружающими соседними волокнами в точках соприкосновения. Конечно, контакт происходит по некоторой поверхности, но, скорее всего, его можно признать почти точечным из-за малых поперечных напряжений g_i . Величина площади контакта неизвестна. Во всяком случае, для приближения расчетов к реальным можно существенно уменьшить коэффициент трения μ по сравнению с принимаемым в обычных условиях. В случае малых величин крутки K и коэффициента трения μ длина скольжения l_s становится настолько большой, что для коротких волокон выполняется условие $l < l_s$. Эти волокна в нагружении не участвуют. В расчете разрывной нагрузки пряжи всегда присутствует произведение прочности волокна r_f на число волокон m . Поэтому при небольшой крутке из m волокон надо исключить волокна m_s длиной $l < l_s$. Прочность пряжи $(m - m_s)r_f$ значительно меньше $m r_f$. По мере увеличения крутки длина скольжения в соответствии с (2) уменьшается, число волокон длиной $l_{кр} = 2l_s$ тоже снижается, в результате прочность пряжи растет. Дальнейшее поведение кривой "прочность пряжи – крутка" требует дополнительного исследования, выходящего за рамки нашей статьи. Впрочем, материалы по описанию упомянутой зависимости опубликованы в наших ранних работах.

ВЫВОДЫ

1. Показана безопасность волокон из вторичного бутылочного сырья (ПЭТ-флексов). Получение текстильных волокон из бутылочных отходов является новым техническим и технологическим решением в сырьевой базе текстильной промышленности.

2. Основываясь на расчетах прочности пряжи с ПЭТ-волокнами, доказана возможность переработки слабых ПЭТ-волокон в ткацком и трикотажном производствах.

3. Установлено уменьшение разрывной нагрузки смешанной пряжи при увеличении вклада ПЭТ-волокон; точное решение $P_{\text{точное}}$ с учетом взаимодействия волокон дает снижение прочности $P_{\cos^2\beta}$, предсказанной упрощенной теорией.

ЛИТЕРАТУРА

1. Геллер И.Э. Полиэфирные волокна и нити // Вестник Текстильлегпрома. – 2019. С. 88...90.
2. Керницкий В.И. Вопросы по бутылочному ПЭТ. Крайности и реальности // Вестник химической промышленности. – 2016.
3. Рубин Р.И., Мухамеджанов Г.К. Производство ПЭТ-волокон из пластмассовых бутылок и нетканых полотен на их основе // Легкая промышленность. Курьер. – 2017, № 3. С. 8...9.
4. Щербakov В.П. Прикладная и структурная механика волокнистых материалов. – М.: "Тисо Принт", 2013.
5. Щербakov В.П., Скуланова Н.С. Основы теории деформирования и прочности текстильных материалов. – М.: МГТУ им. А.Н. Косыгина, 2008.
6. Скуланова Н.С. Аналитическое описание явлений при разрушении пряжи // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2007, № 4. С.104...109.
7. Скуланова Н.С. Аналитическое описание явлений при разрушении пряжи // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2007, № 5. С.79...83.

8. Скуланова Н.С. Аналитические методы проектирования нити и пряжи. – М.: МГТУ им. А.Н. Косыгина, 2007.

9. Hearle J.W.S., Grosberg P., Backer S. Structural Mechanics of Fibers // Yarns and Fabrics. – New York, 1969.

REFERENCES

1. Geller I.E. Poliefirnye volokna i niti // Vestnik Tekstil'legproma. – 2019. S. 88...90.
2. Kernitskiy V.I. Voprosy po butylochnomu PET. Krainosti i real'nosti // Vestnik khimicheskoy promyshlennosti. – 2016.
3. Ruzbin R.I., Mukhamedzhanov G.K. Proizvodstvo PET-vozkon iz plastmassovykh butylok i netkanykh poloten na ikh osnove // Legkaya promyshlennost'. Kur'er. – 2017, № 3. S. 8...9.
4. Shcherbakov V.P. Prikladnaya i strukturnaya mekhanika voloknistykh materialov. – М.: "Tiso Print", 2013.
5. Shcherbakov V.P., Skulanova N.S. Osnovy teorii deformirovaniya i prochnosti tekstil'nykh materialov. – М.: МГТУ им. А.Н. Косыгина, 2008.
6. Skulanova N.S. Analiticheskoe opisanie yavleniy pri razrushenii pryazhi // Izv. vuzov. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti. – 2007, № 4. S.104...109.
7. Skulanova N.S. Analiticheskoe opisanie yavleniy pri razrushenii pryazhi // Izv. vuzov. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti. – 2007, № 5. S.79...83.
8. Skulanova N.S. Analiticheskie metody proektirovaniya niti i pryazhi. – М.: МГТУ им. А.Н. Косыгина, 2007.
9. Hearle J.W.S., Grosberg P., Backer S. Structural Mechanics of Fibers // Yarns and Fabrics. – New York, 1969.

Рекомендована кафедрой текстильных технологий РГУ имени А.Н. Косыгина. Поступила 20.05.19.