

УДК 677.017.463:531.43

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ПРОГНОЗА, ОЦЕНКИ ПРОЧНОСТИ ТЕКСТИЛЬНЫХ НИТЕЙ И ПРЯЖ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ. ОБЗОР. ЧАСТЬ II

К.С.Султанов, С.И.Исмаилова

Annotatsiya: Maqolada iplarning mustahkamligini tajribaviy va nazariy tadbiqlariga bag'ishlangan xorijda nashr etilgan fundamental ishlar sharxi keltirilgan. R.L.Steinberger, J.D.Collins, W.E.Morton, J.W.S.Hearle, B.S.Gupta, L.Van Langenhove, Oxenham W., V.P.Sherbakov, A.M.Stalevich, G.M.Barteleev va boshqalarni iplarning mustahkamlik muammolariga, cho'zilishda, deformatsiyalanishi, tolalarning migratsiyasi, tarkibiy tuzilishlari haqidagi ishlarining qisqacha tasnifi keltirilgan. Iplar mexanikasi bo'yicha ko'rib chiqilgan ishlarning taxlili asosida to'qimachilik jarayonlarining xususiyatlarini hisobga olgan holda iplarning mustahkamligi masalalarini echish yo'llari aniqlangan.

Аннотация: В статье приведен обзор научных работ, посвященных экспериментальному и теоретическому исследованию прочности нитей и пряжи на основе зарубежных публикаций. Приведены краткие сведения о фундаментальных работах Р.Л.Штейнбергера, Дж.Д.Коллинза, У.Е.Мортон, Дж.У.С.Хёрла, Б.С.Гупта, Л.Ван Лангенхова, У.Оксенхама, В.П.Щербакова, А.М.Сталевича, Г.М.Бартенева и других, посвященных проблемам деформирования нитей при растяжении и миграции волокон, структурных особенностей. На основе анализа рассмотренных работ по механике нитей и пряжи, определены пути решения основных проблем прочности текстильных нитей с учетом особенностей текстильного производства.

Abstract: A review of scientific papers in experimental and theoretical research of yarn and thread strength is given on the basis of foreign literature sources. Brief data on fundamental works by R.L.Stainberger, J.D.Collins, W.E. Morton, J.W.S.Hearle, B.S.Gupta, L.Van Langenhove, W.Oxenham, V.P.Scherbakov, A.M.Stalevich, G.M.Bartenev and others, devoted to the problems of yarns deformation under extension and fiber migration, structural specific features are presented. On the basis of analysis of discussed works in mechanics of yarns and threads, the ways to solve basic strength problems of textile yarns are determined with consideration of specific features of textile production.

В настоящее время экспериментально установлено, что модуль Юнга одинарной нити зависит еще от скорости растяжения. В [22] проведены замечательные эксперименты по динамическому растяжению углеродной нити. При различных скоростях деформирования определены значения модуля Юнга. Установлено, что для хрупкой практически упругой при растяжении до обрыва углеродной нити, модули Юнга при

скоростях деформирования отличающихся в 7,8 раз ($ds/dt = 61 \text{ с}^{-1}$ и $ds/dt = 9 \text{ с}^{-1}$), равняется $2,7 \cdot 10^5$ МПа и $2,2 \cdot 10^5$ МПа.

Можно отметить, что динамический модуль Юнга E_D отличается от статического E_S в 1,23 раза, т.е. $E_D/E_S=1,23$. Разумеется, для менее упругих, вязкоупругих или вязкопластических нитей это отношение может быть намного больше чем 1,23.

В опытах [22] обнаружена также независимость критического значения продольной деформации ε_k , при которой обрывается нить, от скорости деформирования $d\varepsilon/dt$, т.е. при всех скоростях динамического растяжения нити, она обрывается при одном и том же значении деформации $\varepsilon = \varepsilon_k = 12,9\%$. Это тоже является очень важным результатом.

В [24] экспериментально определены значения динамического модуля Юнга в закрученных нейлоновых, дакроновых, вискозных, ацетатных нитях, как функция угла закручивания при низком (акустическом) уровне напряжений. Здесь модуль динамической деформации определяется как $E_D = C_0^2 \rho_0$ с использованием техники импульсного распространения акустической волны, где C_0 – скорость распространения плоских волн деформации, ρ_0 – начальная плотность материала нити. Установлено, что значение динамического модуля закрученной филаментной нити E_D больше или равно динамическому модулю одинарной нити E_D^0 , т.е. $E_D/E_D^0 = 1 - 4$. Другими словами, закрученная нить может иметь более высокую прочность, чем одинарная из этого же исходного материала.

В процессах современного текстильного производства нити и с усовершенствованием технологических процессов, интенсивность динамических нагружений и скорость деформирования при растяжении растет. Исходя из этого, результаты экспериментов [22–24] также необходимо учитывать при разработке законов деформирования нити при растяжении.

В [23] филаментные нити из полиэстера, полипропилена и нейлона экспериментально растягивались под действием циклических нагрузок изменяющихся в пределах деформации растяжения ε от 0 до 0,2%. На основе ре-

зультатов опытов предложено двухмодульное уравнение для определения напряжения в нити. При этом эти модули считаются составными частями модуля Юнга нити, т.е. состоят из реальной части E_r и воображаемой части E_f . Можно считать, что эти модули в определенной степени характеризуют статические и динамические модули Юнга нити.

В производстве текстильных материалов, особенно тканей, значительным образом используется пряжа. При этом, особое место в текстильном производстве занимают хлопковые, шерстяные, синтетические и другие пряжи полученные как из природных, так и из синтетических волокон.

Необходимо отметить, что структурный состав (строение) пряжи существенно сложнее, чем у волокон и филаментных нитей.

Пряжа состоит из волокон длиной 2–5 см с особым расположением этих волокон относительно оси пряжи. Данное расположение каждого волокна вокруг оси пряжи зависит от способа прядения. Данное особое расположение волокон в пряже в процессе прядения называется «миграцией волокон». Этот термин «миграция волокон» впервые введен В.Е.Мортоном [25]. В процессе прядения волокно располагается относительно оси пряжи винтообразно на различных радиальных расстояниях вдоль длины. В результате таких расположений образуется сложное переплетение волокон, и они образуют пряжу. Полученная сложная структура пряжи обуславливает все механические свойства пряжи.

Определению и оценке миграции волокон в пряже после прядения с использованием различных технологий посвящены работы [26–32].

В [26] введено понятие частоты и коэффициента миграции, обсужден подробно процесс миграции волокон в прядении. После прядения каждое во-

локно относительно оси пряжи располагается волнообразно, т.е. разные точки волокна находятся от оси пряжи на различных расстояниях (радиусах). Если волокно после прядения расположилось по оси пряжи, то коэффициент миграции равняется нулю, если оно расположилось на поверхности пряжи, этот коэффициент равняется единице. Во всех остальных случаях данный коэффициент меняется от 0 до 1.

В [29] предложены математические выражения для определения и оценки миграции волокон по радиусу пряжи и амплитуды, скорости, частоты миграции на основе результатов экспериментов проведенных с использованием окрашенных (меченых) волокон [27,28].

В работе [30] миграция волокон в пряже исследовано с геометрической точки зрения. Предложены формулы расчета геометрии расположения волокон в пряже.

В [31,32] экспериментально и теоретически рассмотрены параметры миграции волокон из синтетических материалов и сделаны выводы о том, что предложенные в [29–31] математические формулы описывают процесс миграции различных волокон в пряже.

В [33] предложена семислойная модель миграции волокон в пряже. Расчет механизмов миграции на основе семислойной модели проведены в [34]. Процессы трения между волокнами в процессе миграции волокон в пряже экспериментально исследованы в работах [35–37], где установлено влияние геометрического механизма на процесс миграции с учетом трения между волокнами под некоторым углом.

В [38] экспериментально исследован разрыв одинарного хлопкового волокна, и процесс закручивания части волокна после разрыва. Показано значение этого процесса закручивания в прядении хлопковой пряжи. На основе экспериментальных исследований по формированию пряжи из хлопковых штапельных

волокон и затем канатов, установлен процесс «вторичной миграции» волокон при растяжении этих канатов.

Фундаментальные результаты работы [25–39] показывают, что пряжа имеет сложнейшую структуру и этим обусловлены проявление нелинейных механизмов процесса деформирования при их растяжении. Из-за сложности процесса деформирования пряжи, в настоящее время отсутствуют общепризнанные законы деформирования с учетом сложных структур пряжи, а также нитей и изменения этих структур при их растяжении.

В работах [40–42] используя модифицированный метод конечных элементов (МКЭ), пряжа рассматривается как пучок, состоящий из конечных элементов-волокон, т.е. здесь пряжа моделируется как механическая конструкция, состоящая из элементов-волокон. Модифицированный МКЭ приводит задачу статики к задаче динамики с использованием метода динамической релаксации. Пряжа считается по радиусу анизотропным, а по длине изотропным. В [40] приведен алгоритм вычислений и принципы расчета напряжений и деформаций при растяжении и кручении. В [41] приведены результаты вычислений для четырех сортов хлопковой пряжи полученной кольцевым и роторным способами прядения. Определено влияние параметров принятой модели на значения растягивающей силы и на момент кручения. Произведена оценка этого влияния. В [42], используя специальный метод, задано спиралевидное расположение волокон в пряже. На основе этого определены траектория волокна в пряже, изменения радиальных координат волокна, регрессия закрутки в пряже. Построены зависимости растягивающей силы P от относительной деформации ε для четырех разновидностей хлопковой пряжи полученных кольцевым и роторным способами прядения. Сопоставлены опытные и расчетные кривые $P(\varepsilon)$ и

получено хорошее их соответствие. Предложенная в [40] модель, конечно, не является законом деформирования или уравнением состояния пряжи, она является, конечно-элементной моделью хлопковой пряжи. Как утверждает автор работ [40–42], данная модель еще не описывает механизм разрыва или обрыва пряжи при растяжении.

В работах [43,44] методом конечных элементов определены напряженно-деформированное состояние пряжи, считая ее линейно [43] и нелинейно [44] упругой. При этом диаметр пряжи (нерегулярность) считается переменной, т.е. изменяющимся по синусоидальному закону. Здесь также сопоставления опытных и расчетных диаграмм $\sigma(\varepsilon)$ дает хорошее их согласие.

В [45] приведены результаты экспериментов по определению влияния угла закрутки на механические характеристики пряжи имеющей закрученную структуру, полученную кольцевым прядением. На основе опытных данных предложена формула для определения влияния закрученности нити на предел прочности. Здесь отмечается, что закручивание создает трение внутри пряжи между волокнами и это определяющим образом влияет на механические характеристики пряжи.

В [46] экспериментально и теоретически исследовано влияние способов прядения – кольцевых, роторных и фрикционных на структуру пряжи, на плотность упаковки волокон, значение удлинения, разрыв и ворсистость. Установлено, что механические свойства пряжи тесно связаны со структурой и сама структура зависит от технологии прядения.

В [47] на современном ткацком станке экспериментально исследована обрывность нити основы. Для обнаружения обрывности использованы акселерометры MEMS (микроэлектромеханические системы). Как здесь отмечается, проблема обрывности нити не нашла

решения до настоящего времени и она существенно влияет на производительность текстильной промышленности.

Решение проблемы обрывности непосредственно упирается в вопросы прочности нити и пряжи. Определение с требуемой точностью прочностной характеристики нити и пряжи и их оценка, а также их прогноз существенно зависит от закона деформирования нити и пряжи. Закон деформирования также должен в определенной степени прояснить или объяснить механизмы деформирования и разрушения нити и пряжи. Как показывает вышеприведенный краткий обзор работ, в настоящее время не имеется более или менее отвечающего современным требованиям закона деформирования нити и пряжи при их растяжении. Далее встает вопрос получения решения прикладных задач механики нити с использованием законов деформирования нити.

В [48] для описания экспериментальных деформационных свойств пучков хлопковых волокон при сжатии, использована сложная вязко-упругопластическая модель Nishihara. Данный закон включает упругую модель Гука, вязкоупругую модель Кельвина и модель Бингама. На основе опытных данных определены параметры модели Nishihara. Показано, что рекомендованная модель описывает процесс сжатия пучков волокон капка при сжатии. Однако, предложенную модель использовать при решении задач механики нитей достаточно сложно.

С использованием существующих линейных и нелинейных законов деформирования твердых тел решены ряд теоретических задач механики нитей в [49–57]. В этих работах получен ряд результатов, имеющих как теоретическое, так и практическое значение для текстильного производства без учета сложных структурных особенностей нити и пряжи.

Как отмечается в [58], волокнистые

нити и пряжа - единственные в своем роде текстильные материалы, которые соединены силами трения, а их деформация происходит в результате деформаций самих волокон и в результате их обратимого и необратимого взаимного перемещения. Следовательно, свойства волокнистых материалов зависят как от свойств волокон, так и от их расположения, а также от взаимодействия между волокнами. В настоящее время законы деформирования, учитывающие эти обстоятельства, не разработаны.

Развитие уравнений состояния описывающие процесс деформирования нитей и пряжи с учетом упругого восстановления и обратного явления релаксации, с использованием теории вязкоупругости, получили в работах [60–62].

Работы, посвященные проблемам прочности и разрушения текстильных нитей и пряжи, далеко не исчерпываются рассмотренными выше трудами. Но эти работы являются в определенной степени фундаментальными в этом направлении. На основании анализа этих работ можно сформулировать основные требования к закону деформирования нитей и пряжи при их растяжении.

На наш взгляд они следующие:

1. Текстильные нити и особенно пряжа имеют сложную многоуровневую структуру, включающую молекулярный (микромолекулы), надмолекулярный (фибриллы) уровни, микроуровень (волокна) и макроуровень (волокнистый материал). В силу сложнейшей структуры нити и пряжа являются и по длине и по радиальному направлению неоднородными и анизотропными.

2. При деформировании структурное строение нити и пряжи изменяется, следовательно, изменяются физико-механические, геометрические и прочностные характеристики нити и пряжи при растяжении.

3. Модули упругости или модуль деформации, и можно считать, что все механические характеристики нити и пряжи зависят от изменения структуры при деформировании и от уровня закрученности волокон в пряже, а также от скорости нагружения или скорости деформирования.

4. Природные и синтетические нити и пряжа, безусловно, проявляют вязкие свойства на всех стадиях деформирования. Упругие свойства нити и пряжи проявляются в начальных стадиях деформирования.

5. Пластически свойства нити и пряжи проявляются также на самых ранних стадиях деформирования. Необратимые пластические деформации начинают возникать сразу после упругих стадий деформирования.

6. При повторных растяжениях нити и пряжа после разгрузки, нагружение происходит, как во многих упруго-пластических материалах по линии разгрузки, до уровня напряжения достигнутой в момент разгрузки. Далее процесс деформирования идет по линии растяжения.

7. Нелинейность диаграммы растяжения или нелинейное изменение напряжения нити и пряжи, в зависимости от значений деформации при растяжении, связано с изменениями механических характеристик материала в результате деформирования.

Как отмечается в [58], сегодняшняя задача механики нити – создание современных методов прогнозирования эксплуатационных свойств волокнистых материалов и их изменений при внешних воздействиях. Решение этой задачи упирается на создание закона деформирования с учетом физических нелинейных свойств волокнистых материалов при растяжении [1]. Однако, с учетом всех факторов, перечисленных выше, построить закон деформирования нити и пряжи сложная проблема.

Данная проблема, т.е. разработка законов деформирования хлопковой пряжи при растяжении рассмотрены в работах [63–70]. Следуя работам [71,72], где раньше были разработаны законы деформирования структурно-неустойчивых материалов при сжатии, считается, что экспериментальная диаграмма $\sigma(\varepsilon)$ полученная при растяжении пряжи

$$E_D^{-1}(\varepsilon) \frac{d\sigma}{dt} + E_S^{-1}(\varepsilon) \mu(\varepsilon) \sigma = \frac{d\varepsilon}{dt} + \mu(\varepsilon) \varepsilon$$

$$E_R^{-1}(\varepsilon) \frac{d\sigma}{dt} = \frac{d\varepsilon}{dt}$$

В отличие от уравнения (2) в (3), коэффициенты E_D , E_S , μ и модуль разгрузки E_R считаются функциями текущей деформации. Функции $E_D(\varepsilon)$, $E_S(\varepsilon)$, $E_R(\varepsilon)$, и $\mu(\varepsilon)$ должны определяться из результатов опытов по растяжению пряжи. В работах [63–70] приведена методика определения этих функций и их математические выражения, также показано соответствие законов деформирования (3), (4) результатам экспериментов.

Необходимо отметить, что физически нелинейный закон (3), (4) основывается на простейшей модели стандартно-линейного тела (2). Преимущества этой модели перед другими механическими моделями отмечено выше. Даже в этом случае, решение прикладных задач механики нити, как показано в [69], приводит к рассмотрению существенно нелинейных задач механики деформируемого твердого тела. С другой стороны, законы (3), (4) содержат минимальное количество функций, которые описывают нелинейные процессы деформирования при растяжении пряжи. При этом,

является фактическим законом деформирования хлопковой пряжи [68].

Экспериментальная диаграмма $\sigma(\varepsilon)$ существенно нелинейная [63–65,68]. Для описания нелинейной зависимости $\sigma(\varepsilon)$ следуя работам [1,61,62] воспользуемся моделью стандартно-линейного тела с переменными коэффициентами и с учетом разгрузки в виде [63–65]

$$\text{при } \frac{d\varepsilon}{dt} \geq 0 \quad (3)$$

$$\text{при } \frac{d\varepsilon}{dt} < 0 \quad (4)$$

нелинейные функции $E_D(\varepsilon)$, $E_S(\varepsilon)$, $E_R(\varepsilon)$, и $\mu(\varepsilon)$ отражают структурные изменения пряжи, а также и нитей при их растяжении. Предложенный в [63–70] физически нелинейный закон деформирования хлопковой пряжи является наименее сложным. Используя методологию построения физически нелинейных законов деформирования [63–65], можно разработать более сложные законы, основанные на теории наследственной вязкоупругости и более сложных реологических моделей деформирования материалов.

Таким образом, проведенный выше краткий обзор научных работ дает представление о фундаментальных основах прочности и разрушения текстильных нитей и пряжи, а также о дальнейших путях развития механики волокнистых материалов. Данный обзор, надеемся, поможет исследователям в области основы технологии текстильного производства при оценке и прогнозе прочности текстильных материалов.

Литература (продолжение)

22. Jounes A., Sonkarn V., Seidel A., Waldmann M., Cherif Ch., Hausding J. Stress-Strain Behavior of carbon Filament Yarns under high Strain Rates//Textile Research Journal. 2012, Vol.82. №7. PP.685-699.
23. Nosraty H., Jeddi Ali A.A., Avanaki Jamshidi M. Fatigue Behavior of Filament Warp Yarns under Cyclic Loads during Weaving Process//Textile Research Journal. 2009, Vol.79. №2. PP.154-165.