

УДК 677.052

## ПРОЧНОСТЬ НЕКРУЧЕНОЙ ОБВИТОЙ ЛЬНЯНОЙ РОВНИЦЫ

С.В. ПАЛОЧКИН

(Московский государственный текстильный университет им. А.Н. Косыгина)

Как показывает практика, разрыв ровницы при действии растягивающей нагрузки наступает в результате взаимного скольжения и расползания волокон [1]. Следовательно, прочность ровницы определяется не прочностью ее волокон, а исключительно величиной сил сцепления, трения и склеивания (для случая мокрой льняной ровницы), препятствующих их взаимному скольжению.

Определим прочность сухой ровницы, используя гексагональную модель упаковки волокон ее сердечника.

Для оценки прочности ровницы в первом приближении смоделируем ее в виде цилиндра радиусом  $R$ , состоящего из одинаковых параллельных между собой недеформируемых волокон с круглым поперечным сечением диаметром  $d_b$  и одинаковой в пределах ровницы длиной  $l$ .

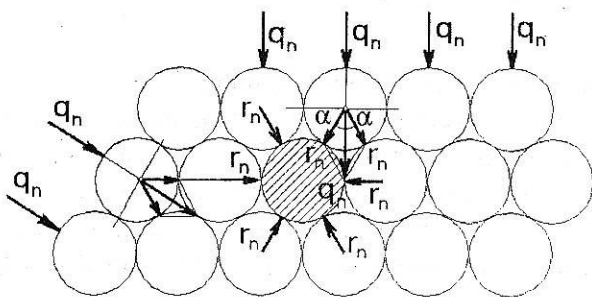


Рис. 1

Примем, что упаковка волокон в ровнице близка к наиболее плотной – гексагональной. Пусть на все поверхностные волокна ровницы действуют одинаковые по величине силы  $q_n$  нормального давления от ее обвивочного компонента (рис. 1), а си-

лы трения  $F_{тр}$ , препятствующие относительному скольжению волокон в ровнице, определяются в соответствии с обобщенным законом трения Кулона – Амонтона [1].

Основным критерием прочности ровницы является отсутствие в ней под действием силы продольного натяжения скрытой вытяжки, то есть неконтролируемого скольжения волокон ровницы друг относительно друга.

Математическая запись этого условия выглядит так:

$$T_{ровн} \leq T_{разр} / K = F_{тр} / K, \quad (1)$$

где  $T_{ровн}$  – допускаемая в ходе технологического процесса сила продольного натяжения ровницы;  $K$  – коэффициент запаса прочности;  $T_{разр}$  – разрывная продольная нагрузка, соответствующая началу скольжения волокон.

По закону Кулона – Амонтона сила трения в контакте двух соседних волокон рассчитывается следующим образом:

$$F_{тр} = N + \mu r_n, \quad (2)$$

где  $N$  – цепкость волокон в ровнице;  $\mu$  – коэффициент трения между ними;  $r_n$  – сила нормального давления в контакте между двумя волокнами.

Величину  $r_n$  найдем из анализа системы сил, показанной на рис. 1:

$$r_n = 0,5q_n / \cos \alpha = 0,5q_n / \cos 30^\circ = q_n / \sqrt{3}. \quad (3)$$

Поскольку силы трения действуют лишь при относительном скольжении соседних волокон, их величина зависит от суммарной силы нормального давления  $q_n$ , которая определяется числом шагов обвивки  $t$  на средней длине  $l_{ск}$  этого скольжения:

$$q_n = N l_{ск} / t, \quad (4)$$

где  $N$  – сила нормального давления обвивочного компонента на поверхностное волокно в пределах одного шага обвивки.

С учетом известной формулы профессора А.П. Минакова [2], определяющей величину распределенной силы  $q$  нормального давления нити на обвиваемую цилиндрическую поверхность,

$$q = (T/R) \sin^2 \beta, \quad (5)$$

где  $T$  – сила натяжения обвивочной нити, а  $\beta = \arcsin(2\pi R / \sqrt{t^2 + 4\pi^2 R^2})$  – угол подъема винтовой линии обвивки, значение  $N$  рассчитывается как

$$N = q \frac{d_v}{\sin \beta} = \frac{2\pi T d_v}{\sqrt{t^2 + 4\pi^2 R^2}}. \quad (6)$$

$$d_v = 0,0357 \sqrt{T_v / \delta_v}, \text{ мм и } 2R = 0,0357 \sqrt{T_p / \delta_p}, \text{ мм.} \quad (9)$$

Тогда для льняной ровницы с учетом средних значений удельных плотностей  $\delta_v = 1,5 \text{ мг/мм}^3$  и  $\delta_p = 0,6 \text{ мг/мм}^3$  материала волокна и самой ровницы; параметра  $T_v = 3 \text{ текс}$  [3] и малости величины  $N = h l_{ск}$ , где  $h = 0,0001 \text{ сН/мм}$  – цепкость волокна на единицу длины [1], окончательно получим

$$F_{тр} = 0,17 \mu l_{ск} \frac{T T_p}{t \sqrt{t^2 + 0,021 T_p}}. \quad (10)$$

Определим прочность сухой ровницы на базе моделирования ее в виде слоистого

Подставив (3) с учетом (4) и (6) в (2), получим

$$F'_{тр} = N + \mu \frac{2\pi T d_v l_{ск}}{t \sqrt{3(t^2 + 4\pi^2 R^2)}}. \quad (7)$$

Суммарную силу трения в ровнице можно, очевидно, рассчитать так:

$$F_{тр} = n_k F'_{тр}, \quad (8)$$

где  $n_k = K_k n_0$  – суммарное число неповторяющихся контактных линий всех волокон ровницы между собой;  $n_0 = T_p / T_v$  – общее число волокон в поперечном сечении сердечника ровницы;  $T_p$  и  $T_v$  – линейные плотности ровницы и льняного волокна;  $K_k = 2,8$  – коэффициент числа контактов по данным анализа структуры поперечного сечения ровницы с гексагональной моделью упаковки ее волокон.

Согласно [3] имеем

композиционного материала.

Представим сердечник ровницы в виде цилиндра радиусом  $R$ , но состоящего из множества концентрических относительно его оси тонкостенных цилиндрических слоев, образованных плотно прижатыми друг к другу льняными волокнами. Толщина одного такого слоя равна диаметру волокна  $d \ll R$ .

Такое моделирование материала ровницы в виде слоистого композита позволяет использовать для исследования его прочностных свойств основные допущения и методы теории упругости [4].

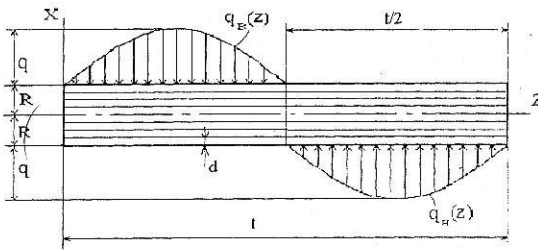


Рис. 2

$$q_B(z) = q \sin(2\pi z / t) \text{ при } 0 \leq z \leq t/2, \quad q_B(z) = 0 \text{ при } t/2 \leq z \leq t, \quad (11)$$

$$q_H(z) = 0 \text{ при } 0 \leq z \leq t/2, \quad q_H(z) = q \sin(2\pi z / t) \text{ при } t/2 \leq z \leq t. \quad (12)$$

Дальнейшее аналитическое решение плоской задачи теории упругости позволило установить, что сила давления  $N$ , действующая в пределах одного шага обвивки на одно волокно в их кольцевом ряду, удаленном на расстояние  $x$  от оси сердечника, принимает максимальное значение для волокон, расположенных на поверхности сердечника, и минимальна для его осевого волокна. При этом изменение величины силы  $N$  при переходе от поверхностного слоя волокон к центру сердечника не превышает 1% от ее наибольшего значения.

Следовательно, для практических расчетов силу  $N$  можно принять постоянной и равной по величине силе нормального давления обвивки на поверхностные волокна сердечника ровницы, которую можно рассчитать (рис. 2) по формуле

$$N = \int_0^{t/2} q \sin\left(\frac{2\pi}{t} z\right) dz = q \frac{t}{\pi}. \quad (13)$$

Тогда сила трения между двумя соседними слоями волокон сердечника в пределах одного шага обвивки вычисляется с помощью выражения

$$F''_{\text{тр}} = (N + \mu N) = \left(N + \mu q \frac{t}{\pi}\right). \quad (14)$$

Полная сила трения в ровнице с учетом числа  $n_{\text{КС}}$  концентрических слоев волокон в сердечнике, средней длины  $l_{\text{СК}}$  их относительного скольжения и малости величины  $N = h l_{\text{СК}}$  запишется так:

$$F_{\text{тр}} = n_{\text{КС}} F''_{\text{тр}} l_{\text{СК}} / t = n_{\text{КС}} \mu q l_{\text{СК}} / \pi, \quad (15)$$

где с учетом (9) и (5):

$$n_{\text{КС}} = R / d_B = 0,5 \sqrt{\frac{T_p \delta_B}{\delta_p T_B}} = 0,456 \sqrt{T_p}, \quad (16)$$

$$q = \frac{T}{R} \sin^2 \beta = T \frac{4\pi^2 R}{t^2 + 4\pi^2 R^2} = \frac{0,9T \sqrt{T_p}}{t^2 + 0,02T_p}. \quad (17)$$

Подставив (16) и (17) в (15), для льняной обвитой ровницы получим

$$F_{\text{тр}} = 0,13 \mu l_{\text{СК}} \frac{T T_p}{t^2 + 0,02 T_p}. \quad (18)$$

Анализ выражений (10) и (18) показывает их очевидное структурное сходство и одинаковое отражение влияния различных параметров ровницы на величину сил трения. Такое качественное совпадение результатов теоретических исследований при различных способах моделирования структуры ровницы подтверждает правомерность принятых подходов.

Для дальнейших исследований в качестве базовой расчетной зависимости целесообразно оставить лишь формулу (18), так как она более простая и дает результаты, близкие к экспериментальным данным.

Рассмотрим параметры этой расчетной зависимости. Если  $T_p$  и  $t$  можно отнести к

числу детерминированных величин, то  $\mu$ ,  $l_{ск}$  и  $T$  являются случайными факторами, аналитическое определение которых вызывает большие трудности. При этом максимальная величина силы  $T$  прямо пропорциональна пределу прочности материала обвивки, который по данным экспериментов с вязкими нитями напрямую зависит от ее линейной плотности  $T_{обв}$ .

В связи с этим преобразуем (18) к виду

$$F_{тр} = K_{рп} \frac{T_{обв} T_p}{t^2 + 0,02 T_p}, \quad (19)$$

где  $K_{рп} = 0,13 \mu l_{ск} T / T_{обв}$ ,  $H \cdot мм^2 / текс^2$  – коэффициент реализации прочности ровницы, определяемый в ходе экспериментальных исследований.

Для проведения прочностных испытаний ровницы был собран экспериментальный стенд, включающий разрывную машину марки 2166Р-5 и программно – аппаратный комплекс (ПАК) для автоматизированного проведения измерений и обработки их результатов. Эксперименты по определению разрывной прочности сухой ровницы проведены по стандартной методике при зажимной длине образцов 400 мм [5].

По опытным данным для всех видов ровницы с обвивочными компонентами из комплексных вязких нитей различной линейной плотности построены графики (рис. 3) зависимостей  $F_{тр} = F_{тр}(t, T_p)$ . Графики для  $T_{обв} = 8,4$  текс в виде пунктирных ломаных кривых представлены на рис. 3-а.

На базе полученных графиков путем совмещения с ними теоретических кривых (сплошные кривые линии – рис. 3-а), рассчитанных по формуле (19) с варьированием значения коэффициента  $K_{рп}$ , осуществлен поиск такого значения коэффициента  $K_{рп}$ , которое дает наиболее близкое совпадение теоретических и экспериментальных кривых (рис. 3: а – для сухой; б – для мокрой ровницы линейной плотности: кривая 1 – 1200; 2 – 1000; 3 – 800; 4 – 600; 5 – 400 текс).

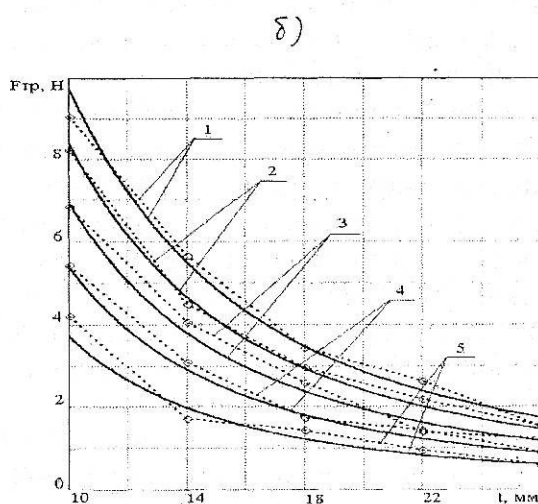
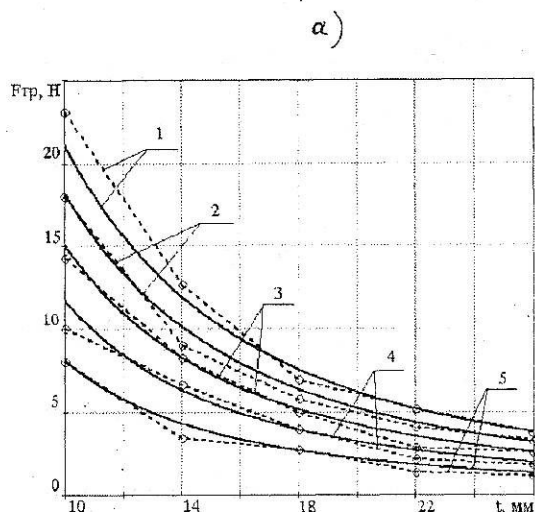


Рис. 3

В результате проведенного поиска для всех исследованных видов сухой ровницы искомое значение составило  $K_{рп} = 0,26$ .

Очевидно, что по своему характеру силы сопротивления относительно скольжению волокон в сердечнике мокрой обвитой ровницы отличны от сил, имеющих место в суровой ровнице. Здесь мы имеем дело не с сухим, а с жидкостным и полужидкостным трением между волокнами. Кроме трения имеет место склеивание льняных волокон между собой в силу наличия в их составе лигнина, который при увлажнении приобретает клеящие свойства.

Однако если предположить, что суммарные силы сопротивления относительно скольжению волокон в мокрой ровнице пропорциональны силам давления между ними или их слоями, и коэффици-

ент этой пропорциональности  $\mu$  назвать не коэффициентом трения, а коэффициентом суммарного сопротивления, то становится возможным применение для определения прочности мокрой ровницы расчетно-экспериментального подхода, использованного в случае с сухой ровницей. Принятое допущение было подтверждено качественным совпадением опытных диаграмм усилие – деформация для обоих видов ровницы.

В целях испытаний на прочность обвитой мокрой льняной ровницы нами использована известная методика [5]. Прочностные испытания на разрыв обвитой беленой ровницы проведены на описанном выше экспериментальном стенде при зажимной длине образцов 100 мм.

В результате искомое значение коэффициента реализации прочности для всех исследованных видов мокрой льняной ровницы составило  $K_{рп} = 0,12$ .

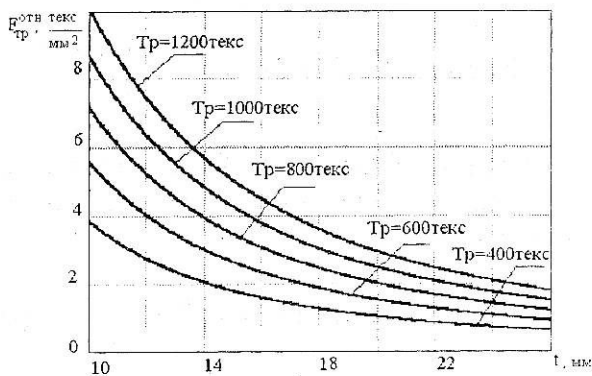


Рис. 4

Сравнительный анализ расчетных и экспериментальных данных проведенных исследований позволяет рекомендовать для оценки прочности проектируемой (как сухой, так и мокрой) некрученной обвитой льняной ровницы формулу (1), в которой

$$F_{тр} = K_{рп} T_{обв} F_{тр}^{отн}, \quad (20)$$

где  $K_{рп} = 0,26 \text{ Н}\cdot\text{мм}^2/\text{текс}^2$  и  $K_{рп} = 0,12 \text{ Н}\cdot\text{мм}^2/\text{текс}^2$  – коэффициенты реализации прочности соответственно сухой и мокрой ровницы;  $T_{обв}$  – линейная плот-

ность обвивочного компонента, текс;  $F_{тр}^{отн}$  – относительная прочность ровницы,  $\text{текс}/\text{мм}^2$ , определяемая по обобщенным графикам (рис. 4) в зависимости от ее линейной плотности и шага обвивки.

## ВЫВОДЫ

1. В результате проведенных исследований прочности некрученной ровницы, состоящей из льняного сердечника, обвитого вискозной комплексной нитью, установлено, что: прочность (разрывная нагрузка) ровницы зависит от сил трения (сцепления) между волокнами ее сердечника, а не от прочности самих волокон; прочность сухой ровницы более чем в 2 раза выше прочности мокрой ровницы аналогичной структуры; прочность как сухой, так и мокрой (беленой) ровницы увеличивается с ростом ее линейной плотности, линейной плотности обвивочного компонента и уменьшается с увеличением шага обвивки.

2. Разработана методика оценки прочности обвитой ровницы. Меняя значения влияющих на прочность проектируемой ровницы факторов, можно варьировать величину прочности в широком диапазоне ее значений, что особенно важно для дальнейшей переработки ровницы в вытяжном приборе прядильной машины.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Будников В.И., Будников И.В., Зотиков В.Е. и др. Основы прядения. – М.-Л.: Гизлегпром, 1945.
2. Минаков А.П. Основы теории наматывания и сматывания нити. – М.: Текстильная промышленность, 1944, № 10.
3. Кукин Г.Н., Соловьев А.Н. Текстильное материаловедение. – Ч. II – М.: Легкая индустрия, 1964.
4. Тимошенко С.П. Курс теории упругости. – Киев: Наукова думка, 1972.
5. Прядение льна и химических волокон: Справочник / Под ред. Л.Б. Карякина, Л.Н. Гинзбурга. – М.: Легпромбытиздат, 1991.

Рекомендована кафедрой механической технологии волокнистых материалов. Поступила 18.10.02.