

УДК 677.11.014.022.35

**РЕЛАКСАЦИОННЫЙ ХАРАКТЕР ПРОЦЕССА ВЫТЯГИВАНИЯ  
ЛЬНЯНОЙ РОВНИЦЫ В МОКРОМ ПРЯДЕНИИ ЛЬНА***Е.А. ПЕСТОВСКАЯ, А.Н. ИВАНОВ***(Костромской государственной технологической университет,  
Научно-внедренческий центр "Блеск" (г. Кострома))**

В предыдущих статьях [1]...[3] нами теоретически и экспериментально была показана функциональная зависимость обрывности льняной ровницы от величины сдвига технических комплексов волокон, длины активной зоны вытягивания и времени вытягивания в зоне вытяжного прибора. Процесс перемещения технических комплексов волокон друг относительно друга осуществляется в результате необратимой деформации вязкого течения высокомолекулярных нецеллюлозных компонентов срединных пластинок (пектинов и лигнина), носящей вязкоупругий релаксационный характер. В данной статье с позиций представлений о релаксационном характере вязкоупругой деформации течения полимеров исследованы релаксационные свойства льняных волокон в процессе вытягивания и их влияние на характер кривых утонения льняной ровницы в вытяжном приборе прядильной машины.

Вязкоупругий характер деформаций полимеров определяется цепным строением макромолекул полимеров и наличием флуктуационной сетки межмолекулярных связей [4]. Особенностью вязкого течения полимеров является то, что их длинные гибкие цепные молекулы не могут перемещаться как единое целое, поэтому деформация вязкого течения осуществляется путем последовательного перемещения сегментов макромолекул. В процессе деформации под действием силы происходит

переход макромолекулы из одного равновесного состояния в другое, сопровождающийся перестройкой флуктуационной сетки, которая определяет внутреннюю вязкость полимерной системы. Вследствие этого деформация реальных полимеров в любом физическом состоянии имеет неравновесный характер. Переход системы из неравновесного состояния в равновесное под действием внутренних сил называется релаксацией. Если при этом состояние системы характеризуют по изменению деформации, то говорят о релаксации деформации; если по изменению напряжения – то о релаксации напряжения.

Скорость релаксационных процессов характеризуют временем релаксации  $\tau$ , которое зависит от энергии межмолекулярных взаимодействий для линейных полимеров и концентрации поперечных химических связей для сетчатых полимеров. Однако протекание релаксационных процессов зависит от продолжительности действия силы. Поэтому реакция полимера на механическое воздействие определяется отношением между временем релаксации и временем деформации –  $\tau/t$ . На рис. 1 показано влияние скорости деформации  $v$  на релаксацию напряжения (а) и деформации (б) сшитых полимеров: 1 – низкая скорость,  $\tau/t \ll 1$ ; 2 – средняя скорость,  $\tau/t \rightarrow 1$ ; 3 – высокая скорость,  $\tau/t \gg 1$ .

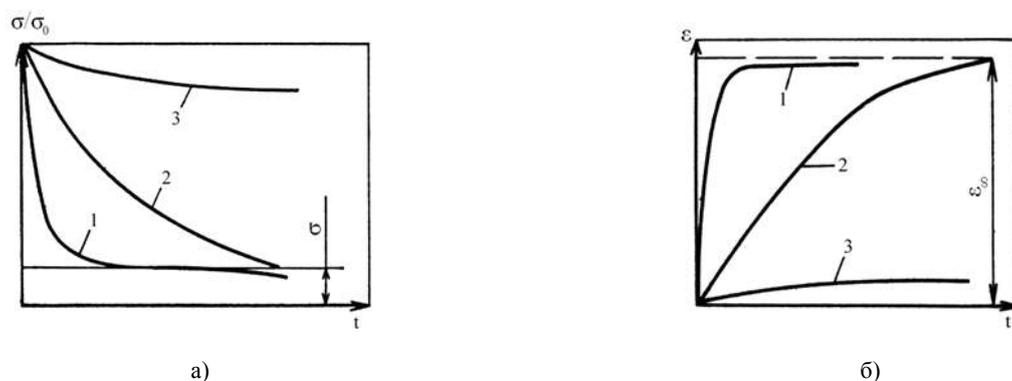


Рис. 1

Если  $\tau/t \ll 1$ , то система очень быстро релаксирует и приходит в равновесие. Это условие может быть реализовано или при очень малых значениях  $\tau$ , или высоких значениях  $t$ . При  $\tau/t \gg 1$  релаксация протекает очень медленно, что может быть следствием или высоких значений  $\tau$  (система малоподвижна, например, в стеклообразном или кристаллическом состоянии), или высоких скоростей механического воздействия. При  $\tau/t \rightarrow 1$  релаксационные процессы развиваются за какой-то определенный промежуток времени и оказывают наибольшее влияние на деформационные свойства материала. С позиций вышеизложенных представлений о релаксационном характере вязкоупругой деформации течения полимеров кривые утонения льняной ровницы в вытяжном приборе прядильной машины мокрого прядения представляют собой кривые релаксации деформации растяжения при действии растягивающих напряжений, возникающих из-за разной скорости вращения питающих и вытяжных пар цилиндров.

Рассмотрим влияние содержания нецеллюлозных компонентов в срединных пластинках технических комплексов льняных волокон на характер кривых утонения льняной ровницы линейной плотности 666 текс (№1,5) в вытяжном приборе прядильной машины ПМ-88-Л5 при выработке пряжи 46 текс (№21,7). Изменение содержания нецеллюлозных компонентов в срединных пластинках, не затрагивая клеточные стенки элементарных волокон, проводили с помощью сульфитной варки в щелочной среде. Результаты исследования процесса дробления технических комплек-

сов льняных волокон, структурной неровности и обрывности в прядении были приведены ранее [1]...[3].

Процесс вытягивания льняной ровницы с различным содержанием пектинов и лигнина в срединных пластинках волокон осуществлялся при постоянной вытяжке – 12,2 (предельная деформация растяжения,  $\epsilon_{\text{вытяжки}}$ ) и постоянной скорости деформирования (скорость питающей пары  $V_1=14,26$  мм/с, скорость выпускной пары  $V_2=174,00$  мм/с). Время действия растягивающей силы  $t_{\text{деф}}$ , постоянно и равно  $t_{\text{деф}}=L_{\text{разводки}}/V_1=140$  (мм)/14,26 (мм/с)=9,82 (с) (длина разводки цилиндров в вытяжном приборе  $L_{\text{разв}}=140$  мм). В данных условиях вытягивания в исследуемых образцах льняной ровницы с различным содержанием пектинов и лигнина в срединных пластинках волокон изменяется время релаксации деформации вязкого течения технических комплексов волокон и возникающего в процессе деформации напряжения. Время релаксации деформации определяет длину активной зоны вытягивания в вытяжном приборе  $L_{\text{акт.выт}}=\tau V_1$ , откуда  $\tau=L_{\text{акт.выт}}/V_1$ . Длина активной зоны вытягивания для исследуемых образцов льняной ровницы была определена нами ранее [3] экспериментально по сдвигу технических комплексов волокон в пряже и параметрам средней линейной плотности  $\bar{T}_{\text{компл}}$  и средней длины  $\bar{l}$  комплексов в пряже и ровнице по данным спектрального анализа КЛА-2. Отношение  $L_{\text{разв}}/L_{\text{акт.выт}}$  позволяет определить важнейшую характеристику вытягиваемой льняной ровницы –  $t_{\text{деф}}/\tau$ . В таблице 1 приведены данные об изменении

содержания нецеллюлозных компонентов в срединных пластинках (пектинов и лигнина) волокон, длины активной зоны вытягивания, времени релаксации деформации  $\tau$ , отношения  $t_{\text{деф}}/\tau$  и обрывности в прядении в зависимости от продолжительности сульфитной варки ровницы.

Т а б л и ц а 1

Время варки, мин	0	10	30	60	90	120
Степень одревеснения срединных пластинок S, %	34	30	25	20	15	10
Пектины, %	2,2	0,1	0,05	0,02	0,01	0,01
$L_{\text{акт.выт}}$ , мм	152,2	111,2	93,9	78,1	69,8	60,5
Время релаксации $\tau$ , с	10,67	7,79	6,58	5,48	4,89	4,25
Отношение $t_{\text{деф}}/\tau$	0,9198	1,2590	1,4910	1,7930	2,0060	2,3130
Обрывность, обр/100 вер.ч	250	80	60	40	20	2

Из данных табл. 1 видно, что через 10 мин варки пектиновые вещества удаляются из волокна практически полностью и далее релаксационные характеристики процесса вытягивания ровницы определяются изменением содержания лигнина в срединных пластинках волокон, которое оценивается по степени одревеснения. При отсутствии пектинов снижение степени одревеснения с 30 до 10% приводит к уменьшению времени релаксации с 7,79 до 4,25 с при времени действия растягивающей силы в вытяжном приборе, равном 9,82 с, при этом отношение  $t_{\text{деф}}/\tau$  линейно возрастает с уменьшением степени одревеснения срединных пластинок волокон в указанном диапазоне. Кривые утонения льняной ровницы при степени одревеснения 30 и 10% (это кривые релаксации деформации вытягивания) приведены на рис. 2 (кривые релаксации деформации вытягивания льняной ровницы при степени одревеснения  $S=10\%$  (1) и  $S=30\%$  (2)).

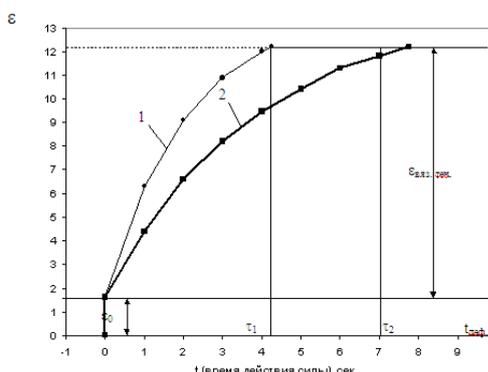


Рис. 2

Анализ этих кривых показывает, что общая деформация вытягивания  $\epsilon_{\text{выт}}$  скла-

дывается из мгновенной деформации  $\epsilon_0$  и замедленной деформации вязкого течения  $\epsilon_{\text{вяз.теч}}$ . Мгновенная деформация равна 1,65 и составляет 13,6% общей деформации вытягивания. Эта деформация не связана со сдвигом технических комплексов волокон и определяется, по-видимому, распрямлением волокон и обратимым растяжением полимерного вещества срединных пластинок (лигнина) в результате перемещения "свободных" сегментов, не входящих в состав узлов физической сетки вещества.

Деформация вязкого течения равна 10,55 и составляет 86,4% общей деформации вытягивания. Эта деформация связана с необратимым сдвигом технических комплексов волокон, имеет вязкоупругий релаксационный характер и определяет длину зоны активного вытягивания ровницы в вытяжном приборе. Кривые релаксации деформации вытягивания льняной ровницы имеют вид, характерный для растяжения сетчатых полимеров. Независимо от величины времени релаксации общая деформация за время действия силы (9,82 сек) достигает предельного значения, равного 12,2. Это обусловлено тем, что релаксационные свойства приведенных на рис. 2 образцов льняной ровницы определяются содержанием лигнина в срединных пластинках волокон, который имеет сетчатое строение [5] и ограничивает деформацию вязкого течения.

Релаксацию деформации растяжения полимерного материала обычно исследуют при постоянной нагрузке  $\sigma$ ; такой процесс в механике полимеров называют ползучестью. Ползучесть сетчатого полимера,

обусловленная релаксацией вязкоупругой деформации, хорошо описывается механической моделью Кельвина-Фойхта [6], где упругая и необратимая вязкая деформации развиваются одновременно. Согласно этой модели кривые ползучести сетчатого полимера подчиняются уравнению

$$\varepsilon_t = \varepsilon_\infty (1 - e^{-t/\tau}), \quad (1)$$

где  $\varepsilon_t$  – деформация растяжения при времени  $t$ ;  $\varepsilon_\infty$  – предельное значение;  $t$  – время действия силы;  $\tau$  – время релаксации.

Кривые ползучести сетчатого полимера приведены ранее на рис. 1. Следует отметить, что в процессе вытягивания льняной ровницы ее поперечное сечение уменьшается по закону релаксации деформации (1), следовательно, по этому же закону увеличивается напряжение в процессе вытягивания, что приводит к увеличению скорости релаксации деформации, так как  $\varepsilon_t = \sigma_t/E$ , где  $E$  – модуль деформации. Таким образом, кривые релаксации деформации вытягивания льняной ровницы в вытяжном приборе должны описываться уравнением

$$\varepsilon_t = \varepsilon_0 + \varepsilon_{\text{выт}} (1 - e^{-2t/\tau}). \quad (2)$$

Для исследуемой ровницы уравнение (2) имеет следующий вид:

$$\varepsilon_t = 1,65 + 12,2(1 - e^{-2t/\tau}). \quad (3)$$

По уравнению (3) были рассчитаны приведенные на рис. 2 кривые релаксации деформации льняной ровницы со степенью одревеснения волокон 10 и 30%. Подставляя в уравнение (3) значения времени релаксации 4,25 и 7,79 с, определенные по сдвигу технических комплексов волокон в пряже с помощью КЛА-2, были получены кривые релаксации деформации вытягивания, в которых длина активного вытягивания полностью совпадает со значениями, определенными по сдвигу комплексов волокон в пряже. При использовании уравнения Кельвина-Фойхта расчетная длина активного вытягивания увеличивается в 2 раза.

В технологии прядения определяют кривые утонения ровницы по уменьшению линейной плотности вытягиваемого продукта (мычки) –  $T$  (текс). Так как  $\varepsilon_{\text{выт}} = T_{\text{ровн}}/T_{\text{пряжи}}$ , а  $\varepsilon_t = T_{\text{мычки}}/T_{\text{пряжи}}$ , то:

$$T_{\text{мычки (ровн)}} = \varepsilon_0 T_{\text{пряжи}} + \varepsilon_{\text{выт}} T_{\text{пряжи}} (1 - e^{-2t/\tau}). \quad (4)$$

Результаты расчета кривых релаксации деформации льняной ровницы при степени одревеснения волокон 10 и 30% приведены в табл. 2 (степень одревеснения волокна  $S=10\%$ , время релаксации  $\tau=4,25$  с;  $t_{\text{деф}}=9,92$  с) и табл. 3 (степень одревеснения волокна  $S=30\%$ ,  $\tau=7,79$  с;  $t_{\text{деф}}=9,82$  с).

Т а б л и ц а 2

$t, c$	$L_{\text{зоны вытягивания}}, \text{ мм}$	$2t/\tau$	$\varepsilon_t$	$T_{\text{мычки (ровн)}}, \text{ текс}^*$
0	0	0	1,65	74,4
1	14,25	0,4705	6,23	280,9
2	28,5	0,9411	9,09	409,9
3	42,8	1,4117	10,88	490,5
4	57,0	1,8823	11,99	540,8
4,25	60,6 ( $L_{\text{акт. выт.}}$ )	2,0000	12,20	550,2

П р и м е ч а н и е. \*При продолжительности сульфитной варки 120 мин потеря массы составляет 17,5%, поэтому  $T_{\text{пряжи}}=45,1$  текс;  $T_{\text{ровницы}}=550$  текс.

Т а б л и ц а 3

$t, c$	$L_{\text{зоны вытягивания}}, \text{ мм}$	$2t/\tau$	$\varepsilon_t$	$T_{\text{мычки (ровн)}}, \text{ текс}^*$
0	0	0	1,65	85,63
1	14,25	0,2567	4,41	228,8
2	28,5	0,5135	6,55	339,9
3	42,8	0,7702	8,20	425,6
4	57,02	1,0269	9,48	492,0
5	71,3	1,2837	10,47	543,4
6	85,5	1,5404	11,23	582,8
7	99,8	1,7972	11,83	613,9
7,79	111,2	2,0000	12,20	633,1

П р и м е ч а н и е. \*При продолжительности сульфитной варки 10 мин потеря массы составляет 5,0%, поэтому  $T_{\text{пряжи}}=51,9$  текс;  $T_{\text{ровницы}}=633$  текс.

При отсутствии химической варки при содержании пектиновых веществ 2,2% и степени одревеснения срединных пластинок 34% в суровой льняной ровнице время релаксации деформации вытягивания льняной ровницы в мокром прядении становится больше времени действия силы  $t_{\text{деф}}/\tau=0,9198$ . Это приводит к резкому увеличению обрывности в прядении. При удалении пектиновых веществ время релаксации становится меньше времени действия силы и  $t_{\text{деф}}/\tau=1,259$ . При этом обрывность резко снижается со 250 до 80 обр. на 100 вер.ч. Таким образом, обязательным условием мокрого прядения льна является  $t_{\text{деф}}/\tau > 1$ .

## ВЫВОДЫ

1. С позиций представлений о релаксационном характере вязкоупругой деформации течения полимеров кривые утонения льняной ровницы в вытяжном приборе прядильной машины мокрого прядения представляют собой кривые релаксации деформации растяжения при действии растягивающих напряжений, возникающих вследствие разной скорости вращения питающих и вытяжных пар цилиндров.

2. В результате проведенных исследований процесса вытягивания льняной ровницы в мокром прядении льна и характера дробления технических комплексов волокон (определение толщины, длины и сдвига комплексов в пряже) были определены релаксационные характеристики данного процесса: время релаксации деформации вытягивания и отношение времени дейст-

вия растягивающей нагрузки ко времени релаксации  $t_{\text{деф}}/\tau$ , которые определяют характер кривых утонения и обрывность в прядении льна. Обязательным условием мокрого прядения льна является  $t_{\text{деф}}/\tau > 1$ . Отношение  $t_{\text{деф}}/\tau$  линейно возрастает с уменьшением степени одревеснения срединных пластинок волокон.

3. На основе модели Кельвина-Фойхта для вязкоупругой деформации сетчатых полимеров предложено уравнение релаксации деформации вытягивания мокрой льняной ровницы, которое адекватно описывает кривые утонения ровницы в вытяжном приборе прядильной машины.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Пестовская Е.А., Иванов А.Н. // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2008, №5. С.45...49.
2. Пестовская Е.А., Иванов А.Н. // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2009, №1. С.44...48.
3. Пестовская Е.А., Иванов А.Н. // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2009, №2. С.24...27.
4. Кулезнев В.Н., Шершнев В.А. Химия и физика полимеров: Учебник для вузов. – М.: Высшая школа, 1988.
5. Иванов А.Н. Физико-химические основы технологии приготовления льнотресты: Дис...докт. техн. наук. – Кострома, КТИ, 1989.
6. Казале А., Портер Р. Реакции полимеров под действием напряжений. – Л.: Химия, 1983.

Рекомендована кафедрой прядения натуральных и химических волокон КГТУ. Поступила 02.02.09.