

УДК 674.048

Г. М. Хвесько

Белорусский государственный технологический университет

РЕОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ МОДИФИЦИРОВАННОЙ ДРЕВЕСИНЫ

Объектом исследования является древесина березы, пропитанная полиэфирной смолой ПН-1 и фенолоспиртами. Смола ПН-1 представляет наполнитель, не проникающий в стенки клеток древесины, фенолоспирты, наоборот, представляют класс наполнителей, которые проникают в стенки клеток. Степень пропитки древесины оценивается коэффициентом пропитки k . При пропитке смолой ПН-1 он равен 0,8, при пропитке фенолоспиртами – 0,2. Для изучения поведения модифицированной древесины при длительном нагружении реальное тело представляется как совокупность двух сред: идеально упругой, деформирующейся по закону Гука, и вязкой, подчиняющейся закону Ньютона. Как и для натуральной древесины, при описании ползучести модифицированной древесины березы использовано реологическое уравнение Максвелла – Томсона, иначе закон деформирования «типичного тела». Исследование натуральной древесины березы, на основе которой получена модифицированная древесина, выполнено с целью последующего сравнения реологических характеристик двух материалов. По экспериментальным кривым ползучести определены мгновенный и длительный модули упругости, время релаксации. Используя эти реологические характеристики, вычислены коэффициенты вязкости натуральной и модифицированной древесины березы. Реологические показатели модифицированной древесины оказались выше аналогичных показателей натуральной древесины.

Ключевые слова: древесина, пропитка, модификация, ползучесть, предел прочности, модуль упругости, время релаксации, коэффициент вязкости.

G. M. Hvesko

Belarusian State Technological University

RHEOLOGICAL CHARACTERISTICS OF MODIFIED WOOD

The object of the study is birch wood, impregnated with polyester resin PN-1 and phenolic alcohols. Resin PN-1 is a filler, which do not penetrate the cell walls of wood, and phenolic alcohols, on the contrary, represent a class of fillers, which penetrate the cell walls. The degree of impregnation of wood is estimated by coefficient k . When impregnated with resin PN-1, it is equal to 0.8, when impregnated with phenolic alcohols – 0.2. To study the behavior of modified wood in long-term loading the real body is represented as a set of two environments: perfectly elastic, deformable according to Hooke's law, and viscous, which obeys Newton's law. As with natural wood in the description of creep modified birch wood we use rheological equation of Maxwell – Thomson, otherwise, the law of deformation “typical body”. The study of natural birch wood on base of what the modified wood is obtained is accomplished for the subsequent comparison of the rheological characteristics of these two materials. According to the experimental creep curves are defined instant and long elastic moduli, the relaxation time. Using these rheological characteristics, the coefficients of viscosity and modified natural birch wood are calculated. Rheological characteristics of modified wood appeared higher than those of natural wood.

Key words: wood, impregnation, modification, creep, compression strength, elastic modulus, relaxation time, the coefficient of viscosity.

Введение. При исследовании упруго-вязких свойств модифицированной древесины ставилась цель получить кривые ползучести, показывающие ее поведение при длительном действии сжимающей нагрузки в главных направлениях, описать эти кривые, вычислить реологические характеристики. Кроме того, необходимо было произвести оценку влияния модификации как смолой ПН-1, не проникающей в стенки клеток древесины, так и фенолоспиртами, которые представляют класс наполнителей, проникающих в стенки клеток, на реологические свойства древесины. Количество

наполнителя в древесине оценивалось коэффициентом пропитки k [1]. Для древесины, пропитанной смолой ПН-1, $k = 0,8$, при пропитке фенолоспиртами $k = 0,2$. Для сравнения наряду с модифицированной исследованию подвергалась и натуральная древесина березы.

Основная часть. Испытания на сжатие при длительном действии нагрузки проводились на образцах размером $20 \times 20 \times 60$ мм. Длинная сторона образца соответствовала направлению действия сжимающей нагрузки (вдоль волокон, радиальное и тангенциальное). Изготовленные образцы выдерживались в лабораторных условиях

(температура воздуха $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$, относительная влажность $(75 \pm 5)\%$) до набора равновесной влажности 5–8%. В этих же условиях проводились опыты. Испытаниям на сжатие при длительном нагружении подвергались по три группы образцов, отличительным признаком которых являлся уровень напряженного состояния. Для образцов, нагруженных вдоль волокон, создавались напряжения, равные 15, 30 и 45% от предела прочности вдоль волокон, полученного при кратковременных испытаниях. При сжатии поперек волокон – 10, 16 и 22% от соответствующих пределов прочности. Длительность испытаний колебалась от 9 до 98 суток в зависимости от напряжения в образце и направления деформирования. Опыт прекращался, как правило, когда хорошо проявлялась картина затухания процесса деформирования образца. Во всех случаях наблюдается рост деформации во времени, но она по-разному проявляется для каждого деформируемого образца в зависимости от материала, направления деформирования, величины нагрузки. Результаты исследований ползучести различных композитных материалов показывают, что в одних случаях находит применение линейная теория вязко-упругости, в других – нелинейная. В зависимости от этого подход к определению реологических характеристик будет различным. Представление о линейности или нелинейности связи между напряжениями и деформациями дают изохронные кривые ползучести [2], перестроенные с кривых прямой ползучести. Для использованных нами материалов линейная зависимость деформаций от напряжения имеет место у натуральной и модифицированной смолой ПН-1 древесины при сжатии вдоль волокон, а у модифицированной фенолоспиртами – вдоль и поперек волокон. Следует заметить, что у натуральной древесины при сжатии поперек волокон характер нелинейности связи деформация – напряжение выражен слабо. Аналогичное замечание можно сделать для древесины, модифицированной смолой ПН-1 при напряжении до 16% от σ_b . При $\sigma = 16\text{--}22\%$ от σ_b имеет место нелинейная зависимость. Поэтому данную область напряженного состояния древесины, модифицированной смолой ПН-1, рассматривать не будем. Таким образом, поведение натуральной и модифицированной древесины березы рассматриваем как поведение линейного вязко-упругого материала.

Если принять [3] в интегральном уравнении Больцмана – Вольтерра

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{E} + \int_{-\infty}^t K(t-\theta)\sigma(\theta)d\theta,$$

которое используется в таких случаях, функцию влияния

$$K(t-\theta) = \frac{E-H}{nE^2} \exp\left(-\frac{Ht}{nE}\right),$$

то уравнение ползучести при $\sigma = \text{const}$, $\theta = 0$ имеет вид:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma}{H} + \sigma\left(\frac{1}{E} - \frac{1}{H}\right) \exp\left(-\frac{Ht}{nE}\right), \quad (1)$$

где E , H , n – мгновенный модуль упругости, длительный модуль упругости, время релаксации.

Это уравнение соответствует решению дифференциального уравнения Максвелла – Томсона:

$$nE\dot{\varepsilon} + H\varepsilon = \sigma + n\dot{\sigma},$$

описывающего поведение реологической модели «типичного тела» (рис. 1) при $\sigma = \text{const}$.

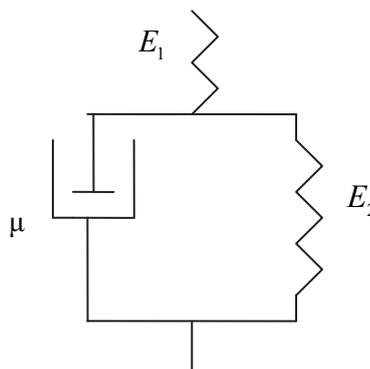


Рис. 1. Реологическая модель «типичного тела»

В реологической модели «типичного тела» реальное тело представляется как совокупность двух сред: идеально упругой, деформирующейся по закону Гука ($\sigma = E\varepsilon$), и вязкой, подчиняющейся закону Ньютона ($\sigma = \mu\dot{\varepsilon}$). Обоснование использования реологической модели «типичного тела» для описания деформирования древесины при длительном действии нагрузки дано в работе [4]. Реологические характеристики E , H , n в уравнении (1) находятся по кривым ползучести натуральной и модифицированной древесины по методике, изложенной в работе [5]:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon(0)} = \frac{\sigma}{\varepsilon_y};$$

$$H = \frac{\sigma}{\varepsilon(\infty)} = \frac{\sigma}{\varepsilon_y + \varepsilon_n} = \frac{\sigma}{\varepsilon_{\text{сум}}}.$$

Если опыт прекращен до полного затухания процесса ползучести, то определение $\varepsilon(\infty)$

связано с возможными грубыми ошибками. В этом случае лучше пользоваться формулой

$$H = \sigma \frac{2\varepsilon_1 - (\varepsilon_0 + \varepsilon_2)}{\varepsilon_1^2 - \varepsilon_0\varepsilon_2}; t_2 = 2t_1,$$

где ε_0 – деформация в момент $t = 0$; ε_1 и ε_2 – деформации в некоторые моменты времени, находящиеся в определенном соответствии.

Образец, оставленный под постоянной нагрузкой в течение времени $\tau = nE / H$, будет иметь деформацию, определяемую следующим уравнением ползучести (1):

$$\varepsilon(\tau) = \frac{\sigma}{H} + \sigma \left(\frac{1}{E} - \frac{1}{H} \right) e^{-1} = \varepsilon_y + 0,632\varepsilon_n.$$

По опытным кривым ползучести находится время τ , которое соответствует деформации $\varepsilon(\tau)$, и вычисляется время релаксации (табл. 1–3):

$$n = \frac{H\tau}{E}.$$

Таблица 1

Реологические характеристики натуральной древесины березы

σ_a , МПа	σ_r , МПа	σ_t , МПа	$E \cdot 10^{-2}$, МПа	$H \cdot 10^{-2}$, МПа	n , ч
11,17	–	–	193	149	131
22,34	–	–	188	154	118
33,51	–	–	186	146	75
–	1,11	–	10,58	5,98	41
–	1,77	–	10,29	5,19	32
–	2,44	–	10,09	4,31	31
–	–	0,69	5,92	3,82	40
–	–	1,10	5,94	3,14	32
–	–	1,51	5,90	3,04	28

Таблица 2

Реологические характеристики древесины березы, модифицированной смолой ПН-1

σ_a , МПа	σ_r , МПа	σ_t , МПа	$E \cdot 10^{-2}$, МПа	$H \cdot 10^{-2}$, МПа	n , ч
22,54	–	–	214,6	198,0	138
45,08	–	–	212,7	160,7	121
67,62	–	–	225,4	153,7	75
–	9,80	–	31,65	6,96	159
–	15,68	–	28,81	7,15	149
–	–	9,80	29,11	5,78	87
–	–	15,68	21,85	5,59	49

Таблица 3

Реологические характеристики древесины, модифицированной фенолоспиртами

σ_a , МПа	σ_r , МПа	σ_t , МПа	$E \cdot 10^{-2}$, МПа	$H \cdot 10^{-2}$, МПа	n , ч
21,56	–	–	198,74	173,85	314
43,12	–	–	204,13	189,14	215
64,68	–	–	206,00	175,71	85
–	3,23	–	16,56	10,39	74
–	6,57	–	16,17	10,49	64
–	9,80	–	15,39	11,16	62
–	–	1,96	11,17	5,88	25
–	–	3,92	10,49	6,08	24
–	–	5,88	11,27	6,76	15

Вычисленные реологические характеристики позволяют определить коэффициент вязкости μ натуральной и модифицированной древесины (табл. 4–6), так как исходя из принятой реологической модели, можно получить следующее:

$$H = \frac{E_1 E_2}{E_1 + E_2}, E_1 = E, n = \frac{\mu}{E_1 + E_2}.$$

$$\text{Тогда } E_2 = \frac{E_1 H}{E_1 - H}, \mu = n(E_1 + E_2).$$

Таблица 4

Коэффициенты вязкости натуральной древесины березы

σ_a , МПа	σ_r , МПа	σ_t , МПа	$\mu \cdot 10^{-10}$, МПа · с
11,17	–	–	3,992
22,34	–	–	4,428
33,51	–	–	2,472
–	1,11	–	0,036
–	1,77	–	0,024
–	2,44	–	0,019
–	–	0,69	0,024
–	–	1,10	0,015
–	–	1,51	0,012

Таблица 5

Коэффициенты вязкости древесины березы, модифицированной смолой ПН-1

σ_a , МПа	σ_r , МПа	σ_t , МПа	$\mu \cdot 10^{-10}$, МПа · с
22,54	–	–	13,8
45,08	–	–	3,78

Окончание табл. 5

σ_a , МПа	σ_r , МПа	σ_t , МПа	$\mu \cdot 10^{-10}$, МПа · с
67,62	–	–	1,91
–	9,8	–	0,23
–	15,68	–	0,21
–	–	9,8	0,11
–	–	15,68	0,05

Таблица 6

**Коэффициенты вязкости древесины березы,
модифицированной фенолоспиртами**

σ_a , МПа	σ_r , МПа	σ_t , МПа	$\mu \cdot 10^{-10}$, МПа · с
21,56	–	–	17,9
43,12	–	–	21,5
64,68	–	–	4,31
–	3,23	–	0,12
–	6,57	–	0,11
–	9,80	–	0,14
–	–	1,96	0,021
–	–	3,92	0,022
–	–	5,88	0,015

Заключение. Как и следовало ожидать, мгновенный и длительный модули упругости и время релаксации (табл. 1–3) зависят как от вида испытываемого материала, так и от направления действия и сжимающей нагрузки. Различие в значениях мгновенных и длительных модулей упругости при разных уровнях напряжений для одного направления сжатия следует рассматривать как статистический разброс результатов опытов, учитывая, что испытанию подвергался такой неоднородный материал, как древесина. Что касается времени релаксации, то эта величина изменяется в зависимости от уровня нагрузки в одном направлении более значительно, чем модули упругости. При этом заметна общая тенденция к уменьшению времени релаксации с увеличением нагрузки.

Для всех испытанных материалов длительные модули упругости меньше мгновенных модулей упругости, наибольшие значения E и H имеют вдоль волокон и наименьшие – в тан-

генциальном направлении. Это соответствует представлениям о поведении древесины под нагрузкой и подтверждает анизотропию механических свойств натуральной и модифицированной древесины при длительном действии нагрузки.

Сравнивая E и H , видим, что наименьшие различия имеют место вдоль волокон. Это можно объяснить строением древесины и различием реологических свойств древесины и полимеров. Смола ПН-1, заполняя только полости клеток, имея мгновенный модуль упругости на порядок, а длительный модуль упругости – на два порядка меньше [6], чем у натуральной древесины березы в направлении вдоль волокон, не может оказать существенного влияния на поведение древесины при длительном действии нагрузки вдоль волокон. В этом направлении реологические свойства определяются в основном волокнами древесины. В направлении поперек волокон эта древесина по указанной ранее причине проявляет повышенное свойство увеличивать деформацию ползучести. В результате H в радиальном и тангенциальном направлениях оказался почти в пять раз меньше E , хотя абсолютные значения H модифицированной древесины остались все же больше, чем у натуральной. Что касается модификации древесины фенолоспиртами, то они проникают в стенки клеток древесины и повышают тем самым их жесткость. В результате ползучесть такой древесины несколько уменьшается.

Коэффициенты вязкости, вычисленные для исследуемых материалов (табл. 4–6), также зависят от направления сжимающего усилия. В натуральной древесине березы коэффициент вязкости μ вдоль волокон оказался на два порядка выше этого показателя поперек волокон. В древесине, модифицированной смолой ПН-1, коэффициент вязкости вдоль волокон в среднем в 10 раз превышает μ в направлении поперек волокон, при этом он в два раза больше в радиальном направлении по сравнению с тангенциальным.

В древесине березы, модифицированной фенолоспиртами, коэффициент вязкости μ вдоль волокон имеет порядок 10^{11} МПа · с, в радиальном направлении – 10^9 МПа · с, в тангенциальном – 10^8 МПа · с.

Полученные данные могут быть использованы для прогнозирования поведения древесины при действии долговременных нагрузок.

Литература

1. Хвесько Г. М., Любецкий Д. И. О количественной оценке пропитки древесины // Механизация лесозаготовок и транспорт леса. 1974. Вып. 4. С. 20–22.
2. Работнов Ю. Н. Ползучесть элементов конструкций. М., 1966. 752 с.
3. Ржаницын А. Р. Теория ползучести. М.: Стройиздат, 1968. 419 с.

4. Уголев Б. Н. Определение реологических показателей древесины // *Деревообрабатывающая промышленность*. 1963. № 2. С. 17–19.
5. Малмейстер А. К., Тамуж В. П., Тетерс Г. А. Сопrotивление жестких полимерных материалов. Рига: Зинатне, 1967. 500 с.
6. Скудра А. М., Булавс Ф. Я., Роценс К. А. Ползучесть и статическая усталость армированных пластиков. Рига: Зинатне, 1971. 238 с.

References

1. Hvesko G. M., Lyubetsky D. I. About quantifiable wood impregnation. *Mehanizacija lesozagotovok i transport lesa* [Tion-mechanical harvesting and transport of wood], 1974, iss. 4, pp. 20–22 (in Russian).
2. Rabotnov Y. N. *Polzuchest' elementov konstrukcij* [Creep of structural elements]. Moscow, 1966. 752 p.
3. Rzhantsyn A. R. *Teorija polzuchesti* [Creep theory]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1968. 419 p.
4. Ugolev B. N. Determination of rheological parameters of wood. *Derevoobrabatyvajushhaja promyshlennost'* [Sawmilling-processing industry], 1963, no. 2, pp. 17–19 (in Russian).
5. Malmeyster A. K., Tamuzs V. P., Teters G. A. *Soprotivlenie zhestkih polimernyh materialov* [Resistance rigid polymeric materials]. Riga, Zinatne Publ., 1967. 500 p.
6. Skudra A. M., Bulavs F. Ya., Rotsens K. A. *Polzuchest' i staticheskaja ustalost' armirovannyh plastikov* [Creep and static fatigue reinforced plastics]. Riga, Zinatne Publ., 1971. 238 p.

Иформация об авторах

Хвесько Геннадий Михайлович – кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической механики. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: tm@belstu.by

Information about the authors

Hvesko Gennady Mikhailovich – Ph. D. Engineering, associate professor, Department of Theoretical Mechanics. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: tm@belstu.by

Поступила 10.03.2015