

Технология производства полимеризованной древесины, разработанная в Институте механической технологии древесины Сельскохозяйственной академии, дает возможность (пока еще в ограниченных пределах) сознательно создавать заранее определенные свойства полимеризованной древесины в зависимости от ее назначения. Изобретение, на основании которого разработана рассматриваемая технология, обусловило возможность превращения лесопильной промышленности из изготовителя древесных полуфабрикатов с натуральными свойствами в производителя материалов с сознательно формируемыми свойствами в зависимости от требований будущего потребителя, как это имеет место, например, в металлургии. Разработанная технология позволяет также модифицировать такие изделия, как шпалы, которые также подвергаются пропитке синтетическими мономерами.

С.С. Макаревич, М.И. Губич, А.М. Волк

УСТОЙЧИВОСТЬ СЖАТЫХ СТЕРЖНЕЙ ИЗ МОДИФИЦИРОВАННОЙ ДРЕВЕСИНЫ

В настоящей работе приведены результаты испытаний на устойчивость сжатых стержней из древесины березы, модифицированной смолой ПН-1, а также некоторые теоретические исследования. Образцы для эксперимента были заготовлены из здоровой прямослойной березы.

Пропитка древесины и режим термообработки осуществлялись по технологии, разработанной проблемной научно-исследовательской лабораторией модификации древесины БТИ им. С.М. Кирова. Модифицированные ламельки распиливались на заготовки размером $17 \times 10 \times 340$ мм, из которых в дальнейшем вырезались образцы для испытаний на устойчивость.

Прежде, чем приступить к испытаниям на устойчивость, были определены плотности натуральной древесины (ρ) и смолы ПН-1 (ρ); модули упругости при сжатии вдоль волокон натуральной древесины (E) и смолы ПН-1 (E), а также установлено изменение коэффициента пропитки $k[I^H]$ по длине реек. Методика определения модулей упругости описана в работе [1]. В результате испытаний получены следующие данные: $\rho = 0,625 \text{ г/см}^3$;

$\rho_n = 1,25 \text{ г/см}^3$; $E_a = 20,5 \cdot 10^4 \text{ кгс/см}^2$; $E_n = 2,6 \cdot 10^4 \text{ кгс/см}^2$. Для определения изменения коэффициента пропитки по длине заготовки она размечалась по длине вправо и влево от середины на образцы по 10 мм и распиливалась. Торцы образцов шлифовались. Образцы замерялись с точностью 0,001 мм и взвешивались на аналитических весах с точностью до 0,001 г. По результатам измерений определялась плотность ρ^* образцов, вырезанных из модифицированной заготовки. Зная плотности, определяли коэффициенты пропитки k образцов по формуле (1)

$$k = \frac{\rho(\rho^* - \rho_0)}{\rho_n(\rho_0 - \rho)}, \quad (1)$$

где ρ_0 - плотность древесного вещества ($\rho_0 = 1,54 \text{ г/см}^3$).

Таким образом, с интервалом в 10 мм были получены коэффициенты пропитки по длине для шести реек и определены средние значения коэффициентов пропитки. Результаты приведены в табл.1.

Как видно из табл.1, изменение количества полимера, введенного в древесину, имеет примерно симметричный характер. Такой характер изменения коэффициента пропитки k , очевидно, будет наблюдаться во всех случаях модификации стержней. Ближе к торцам количество полимера будет больше, к середине - меньше. Только в некоторых случаях перепад коэффициента пропитки k между серединой стержня и его концами будет меньше, в некоторых - больше. Это зависит от технологии пропитки, состава полимера или олигомера, а также режимов термообработки.

Исследования показали, что для описания изменения коэффициента пропитки по длине стержня можно принять функцию

$$k_x = k_0 \left[1 + \frac{\alpha_0}{k_0} \left(\frac{x}{b} \right)^n \right], \quad (2)$$

Таблица 1.

x , см	k	x , см	k	x , см	k	x , см	k
- 17	0,836	- 8	0,239	1	0,096	10	0,183
- 16	0,730	- 7	0,155	2	0,091	11	0,274
- 15	0,721	- 6	0,125	3	0,107	12	0,352
- 14	0,625	- 5	0,111	4	0,100	13	0,454
- 13	0,596	- 4	0,100	5	0,109	14	0,496
- 12	0,553	- 3	0,089	6	0,109	15	0,553
- 11	0,538	- 2	0,095	7	0,111	16	0,636
- 10	0,488	- 1	0,097	8	0,134	17	0,783
- 9	0,351			9	0,151		

где k_0 - коэффициент пропитки посередине стержня; x - текущая координата по длине стержня (начало координат выбрано посередине стержня); α_0, n - постоянные, зависящие от характера изменения коэффициента пропитки; b - половина длины стержня.

При $x = b$ получим коэффициент пропитки на конце стержня,

$$\text{т.е. } k_b = k_0 \left(1 + \frac{\alpha_0}{k_0} \right), \quad (3)$$

откуда $\alpha_0 = k_b - k_0$.

Показатель степени "n" можно определить путем статистической обработки кривой изменения коэффициента пропитки по длине стержня. Зная, как изменяется коэффициент пропитки по длине стержня, найдем изменение модуля упругости вдоль волокон при сжатии [1]

$$E_x = E_a + k_x m_{\Pi} E_n, \quad (4)$$

где E_a - модуль упругости натуральной древесины при сжатии вдоль волокон; E_n - модуль упругости полимера (наполнителя); m_{Π} - пористость древесины,

$$m_{\Pi} = 1 - \frac{\rho}{\rho_0}. \quad (5)$$

Подставляя в выражение (4) значение k_x , согласно (2) получим

$$E_x = E_0 \left[1 + \alpha \left(\frac{x}{b} \right)^n \right]. \quad (6)$$

Здесь

$$\alpha = \frac{\alpha_0 m_{\Pi} E_n}{E_0}; \quad (7)$$

$$E_0 = E_a + k_0 m_{\Pi} E_n.$$

Рассмотрим устойчивость сжатого стержня (рис.1), у которого модуль упругости меняется согласно выражению (6).

Модификации подвергался стержень ВВ₁ длиной L. В результате неравномерной пропитки полимером модуль упругости стержня заготовки ВВ₁ изменяется по закону (6). Эпюра изменения модуля упругости показана на рис.1 справа. Из заготовки ВВ₁ вырезали стержень АС длиной l, отбросив по концам одинаковые участки а. Стержень АС подвергается сжатию силой Р. Концы стержня закреплены шарнирно. Когда сила Р достигнет критической величины $P = P_{кр}$, прямолинейная форма

стержня перестанет быть устойчивой и стержень начнет искривляться. Запишем дифференциальное уравнение изогнутой оси стержня AC:

$$E_x I y'' + P_{кр} y = 0.$$

Подставляя E_x , согласно выражению (6) получим

$$E_0 \left[1 + \alpha \left(\frac{x}{b} \right)^n \right] I y'' + P_{кр} y = 0. \quad (8)$$

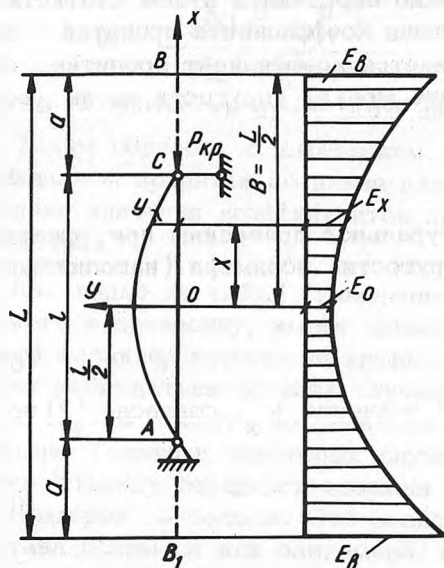


Рис. 1. Схема сжатого стержня.

Введем новую переменную $u = \frac{x}{b}$. Тогда $\frac{d^2 y}{dx^2} =$

$$= \frac{d^2 y}{du^2} \cdot \frac{1}{b^2}, \text{ и уравнение (8) перепишется так:}$$

$$(1 + \alpha u^n) y'' + K_1 y = 0, \quad (9)$$

где

$$K_1 = \frac{P_{кр} b^2}{E_0 I} = \frac{P_{кр} l^2}{E_0 I (2\beta)^2}. \quad (10)$$

Здесь длина стержня l выражается в долях длины заготовки т.е. $l = \beta L = 2\beta b$.

В нашем случае при результатах, приведенных в табл.1, показатель степени $n \approx 3$.

Тогда уравнение (9) примет вид

$$(1 + \alpha u^3) y'' + K_1 y = 0. \quad (11)$$

Граничные условия в данной задаче следующие:

$$\text{при } u = 0 \quad y' = 0; \quad \text{при } u = \beta \quad y = 0. \quad (12)$$

Так как уравнение (11) не интегрируется в конечном виде, то $P_{кр}$ находилось путем численного интегрирования [3]. Были определены значения K_1 и $K = K_1 (2\beta)^2$ для различных значений β и α при граничных условиях (12). Зная коэффициенты K , можно определить критическую силу

$$P_{кр} = \frac{KE_o \Gamma}{12} \quad (13)$$

и критическое напряжение

$$\sigma_{кр} = \frac{P_{кр}}{F} = \frac{KE_o \Gamma}{12 F} = \frac{KE_o}{\lambda^2} \quad (14)$$

Здесь $\lambda = 1/\sqrt{\frac{E}{I}} = \frac{1}{i}$, Γ - момент инерции; F - площадь поперечного сечения стержня; i - радиус инерции.

Результаты вычисления K_1 и K приведены в табл.2.

Экспериментальные исследования на устойчивость сжатых стержней из древесины березы, модифицированной смолой ПН-1, проводились на прямоугольных образцах сечением 10 x 17 мм (последний размер в тангенциальном направлении). Чтобы испытания соответствовали схеме, показанной на рис.1, при изготовлении образцов разной длины от заготовки отрезали по концам одинаковые участки "а". Таким образом, сохранялась симметрия изменения жесткости образца относительно его середины. Испытания проводились при шарнирном креплении концов образца на трехтонном гидравлическом прессе, специально переоборудованном для таких целей. Скорость нагружения составляла 200 кгс/см²·мин. Шарнирное крепление осуществлялось с помощью ножевых опор.

Образцы крепились в металлических подпятниках, снабженных подвижными гнездами для ножей. Ножи устанавливались на опорных плитах испытательной машины. Центрирование образцов

Таблица 2.

β	$\lambda = 0$		$\lambda = 0,052$		$\lambda = 5$		$\lambda = 10$		$\lambda = 20$		$\lambda = 50$	
	K_1	K	K_1	K	K_1	K	K_1	K	K_1	K	K_1	K
0,1	247,7	9,87	251,7	10,070	251,8	10,074	252,0	10,080	252,1	10,084	252,6	10,104
0,2	81,68	9,87	62,94	10,071	63,12	10,089	63,30	10,128	63,64	10,182	64,60	10,336
0,3	27,42	9,87	27,98	10,073	28,24	10,170	28,49	10,260	28,95	10,422	30,15	10,854
0,4	15,42	9,87	15,74	10,074	16,08	10,291	16,38	10,483	16,91	10,822	18,16	11,622
0,5	9,87	9,87	10,08	10,080	10,47	10,47	10,81	10,810	11,36	11,360	12,56	12,560
0,6	6,85	9,87	7,01	10,094	7,42	10,645	7,76	11,174	8,34	12,010	9,45	13,608
0,7	5,04	9,87	5,15	10,094	5,63	11,035	5,97	11,701	6,49	12,720	7,52	14,739
0,8	3,86	9,87	3,95	10,110	4,45	11,392	4,79	12,262	5,26	13,467	6,22	15,923
0,9	3,05	9,87	3,12	10,112	3,64	11,794	3,96	12,840	4,42	14,321	5,26	17,042
1,0	2,47	9,87	2,53	10,120	3,06	12,240	3,37	13,840	3,79	15,160	4,589	18,956

Таблица 3.

λ	$\sigma_{оп}^2$ кгс/см ²	$\sigma_{кр}^2$ кгс/см ²	$\sigma_{кр}$ при $\alpha = 0$	
			$k = 0$	$k = 1$
30,4	974,9	2250,5	2189,3	2354,2
40,5	831,4	1268,0	1293,5	1326,5
51,4	731,6	787,5	765,8	823,5
59,8	516,2	582,1	565,8	608,4
70,0	371,4	425,3	412,9	444,0
82,3	295,0	307,7	298,7	321,2
92,2	232,1	245,3	238,0	256,0
101,5	204,5	202,7	196,4	211,2
112,4	174,3	165,3	160,2	172,2
119,6	157,5	146,1	141,5	152,1

производилось под нагрузкой по методике, изложенной в работе [2]. Влажность испытываемых образцов составляла 6–8%.

В процессе испытаний определены критические силы для стержней различных гибкостей и подсчитаны критические напряжения. Результаты испытаний приведены в табл. 3.

Здесь же приведены результаты теоретических подсчетов критических напряжений согласно формуле (14) для стержней тех же гибкостей и с теми же характеристиками, что и испытываемые образцы, т.е. $E = 20,5 \cdot 10^4$ кгс/см²; $E = 2,6 \cdot 10^4$ кгс/см²; $k_0 = 0,096$; $m_n = 0,594$; $\alpha_0 = 0,69$; $\alpha = 0,052$; $b = 17$ см; $l = 3b$; $E_n = 20,65 \cdot 10^4$ кгс/см².

В табл. 3 приведены также значения критических напряжений для тех же гибкостей при $\alpha = 0$, $k_0 = 0$, т.е. для натуральной древесины и $\alpha = 0$, $k_0 = 1$, т.е. при равномерной пропитке по всей длине заготовки и 100%-ном заполнении пустот.

Как видно из табл. 3, для стержней большой гибкости разница между опытными и теоретическими значениями критического напряжения невелика (не превышает 10%). И только начиная с гибкости $\lambda \approx 60$ –70 и меньше расхождения увеличиваются.

Поэтому дальнейшие усилия должны быть направлены на более детальное изучение устойчивости сжатых стержней из модифицированной древесины малой и средней гибкости.

Л и т е р а т у р а

1. Макаревич С.С., Любецкий Д.И. Определение модуля упругости модифицированной древесины при сжатии. – В сб.: Модификация древесины синтетическими смолами. Минск, 1973.
2. Макаревич С.С. Устойчивость центрально сжатых стержней из стеклопластика при заданном законе сближения концов

стержня. - 25-я научн.- техн. конф. Белорусск. политехн. ин-та. Мат-лы секции строительной механики. Минск, 1969. 3. Набор программ для ЭЦВМ "Мир". Под ред. В.М. Глушкова и др. Т. II. кн.1У. Киев, 1973.

С.С. Макаревич, Г.М. Хвесько

АНИЗОТРОПИЯ МОДУЛЯ УПРУГОСТИ ПРИ СЖАТИИ МОДИФИЦИРОВАННОЙ ДРЕВЕСИНЫ

В настоящее время ведутся широкие исследования по модификации древесины различных пород полимерами, не проникающими в стенки клеток древесины. Для разных отраслей народного хозяйства требуется модифицированная древесина с определенными физико-механическими свойствами, которые в значительной степени зависят от количества введенного в древесину полимера. Экспериментальное изучение анизотропии упругих свойств модифицированной древесины при различных коэффициентах пропитки k [4] является очень трудоемким.

В данной работе показана возможность теоретических исследований анизотропии упругих свойств модифицированной древесины с использованием метода структурного анализа. В практике наиболее часто встречаются случаи, когда направление сжимающего усилия расположено в продольно-радиальной и продольно-тангенциальной плоскостях структурной симметрии древесины. В соответствии с этим в настоящей работе рассматривается изменение модуля упругости, когда происходит сжатие модифицированной древесины при отклонении сжимающего усилия от продольного направления именно в этих плоскостях.

Для указанных случаев формулы, определяющие зависимость $E^* = f(\alpha)$, имеют следующий вид [1]:

$$\frac{1}{E_{ar}^*(\alpha)} = \frac{\cos^4 \alpha}{E_a^*} + \left(\frac{1}{G_{ar}^*} - \frac{2\mu_{ar}^*}{E_a^*} \right) \sin^2 \alpha \cdot \cos^2 \alpha + \frac{\sin^4 \alpha}{E_r^*}; \quad (1)$$

$$\frac{1}{E_{at}^*(\alpha)} = \frac{\cos^4 \alpha}{E_a^*} + \left(\frac{1}{G_{at}^*} - \frac{2M_{at}^*}{E_a^*} \right) \sin^2 \alpha \cos^2 \alpha + \frac{\sin^4 \alpha}{E_t^*} \quad (2)$$

Звездочка (*) при величинах, входящих в формулы, означает, что они являются характеристиками модифицированной древесины. Модули упругости модифицированной древесины, пропитанной полимером, не проникающим в стенки клеток, в главных направлениях определяются по характеристикам исходных компонентов [2, 5]:

$$E_a^* = E_{ac} + k(E_{ap} - E_{ac}) + m_{\Pi} E_H k; \quad (3)$$

$$E_r^* = E_r + \frac{2,63(1-\eta_2)(1-\sqrt{1-k})E_H E_r}{(1-\eta_1)(1,85+0,78\sqrt{1-k})E_r + 1,42\eta_1\eta_2 E_H} \quad (4)$$

$$E_t^* = E_t + \frac{2,63(1-\eta_1)(1-\sqrt{1-k})E_H E_t}{(1-\eta_2)(1,85+0,78\sqrt{1-k})E_t + 1,42\eta_1\eta_2 E_H} \quad (5)$$

где E_{ac} , E_{ap} - модули упругости натуральной древесины вдоль волокон при сжатии и растяжении; E_r , E_t , E_H - модули упругости натуральной древесины в радиальном и тангенциальном направлениях и наполнителя; k - коэффициент пропитки древесины [4]; η_1 , η_2 - коэффициенты, равные [5]:

$$\eta_1 = \frac{E_r + E_t - \sqrt{(E_r - E_t)^2 + 4E_r E_t m_{\Pi}}}{2E_r};$$

$$\eta_2 = \frac{E_r + E_t - \sqrt{(E_r - E_t)^2 + 4E_r E_t m_{\Pi}}}{2E_t}.$$