

древесины, модифицированной синтетическими смолами на основе фурфурол-ацетонового мономера ФА. Сб.: Общая и прикладная химия, в. 2, Минск, 1970. [4] Г. М. Шутов. Физико-механические свойства древесины, модифицированной фурановыми соединениями. Сб.: Пластификация и модификация древесины, Рига, 1970. [5] А. А. Соснина, Б. С. Чудинов, Л. И. Куприенко. Стабилизация размеров древесины синтетическими смолами. Сб.: Древесина, ее защита и пластики, М., 1967. [6] Ю. В. Вихров. Определение проникающей способности синтетических смол в клеточные стенки древесины и изменение при этом ее физико-механических показателей. Минск, 1971.

**Макаревич С. С., Любецкий Д. И.**

### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЯ УПРУГОСТИ МОДИФИЦИРОВАННОЙ ДРЕВЕСИНЫ ПРИ СЖАТИИ**

Использование модифицированной древесины в качестве конструкционного материала значительно затрудняется из-за недостаточной изученности ее прочностных и деформативных свойств.

Рациональное применение в элементах конструкций модифицированной древесины возможно лишь при использовании инженерных расчетов, которые могут быть успешно разработаны после подробного анализа механических свойств натуральной древесины, применяемых для ее модификации полимеров и композиции в целом.

Таким образом, перед механикой модифицированной древесины возникают три задачи: — исследование закономерностей упругих, прочностных и деформативных свойств натуральной древесины; — исследование упругих, прочностных и деформативных свойств полимеров, используемых в качестве наполнителя; — исследование механических характеристик модифицированной древесины как композиционного материала. Решение этих задач даст возможность не только производить расчеты элементов конструкций из модифицированной древесины, но и создавать материалы на базе древесины и полимеров с заранее заданными свойствами, т. е. давать рекомендации по выбору полимеров для придания древесине желаемых механических характеристик.

В настоящей работе сделана попытка дать теоретические зависимости модуля упругости модифицированной древесины от упругих свойств исходных компонентов. Справедливость теоретических выводов проверена нами экспериментально.

Натуральная древесина рассматривалась как пространствен-

ная ажурная конструкция. У хвойных и лиственных кольцепородных пород эта ажурность конструкции связана с ярко выраженной слоистостью, или пластинчатостью, образуемой ранней и поздней древесиной, у рассеяннопоровых пород — распределения равномерно в пространстве [1].

Модифицированная древесина рассматривалась как композиционный анизотропный материал, имеющий три взаимно перпендикулярные плоскости симметрии. Такое допущение для древесины при рассмотрении упругих деформаций близко отвечает действительности [2].

Нами рассмотрены рассеяннососудистые породы и наполнители, которые заполняют только полости древесных волокон и сосудов, но не проникают в клетки древесины.

*Сжатие вдоль волокон.* При продольном сжатии древесину следует рассматривать, как пространственную трубчатую систему, состоящую из трубок разного диаметра [1].

У рассеяннососудистых пород, согласно микроскопическому строению древесины (по В. Е. Вихрову), распределение трубок в древесине можно считать равномерным.

При модификации древесины часть трубок заполняется наполнителем (полимером, сплавом металлов и др.).

Таким образом, при продольном сжатии модифицированную древесину можно рассматривать как систему, состоящую из параллельно соединенных стержней наполнителя и древесного вещества. При кратковременном нагружении (без учета фактора времени) деформирование древесного вещества подчиняется закону Гука:

$$\sigma_0 = \varepsilon_0 E_0. \quad (1)$$

Принятые для модификации древесины полимеры и сплавы металлов при кратковременном нагружении тоже подчиняются закону Гука

$$\sigma_n = \varepsilon_n E_n \quad (2)$$

В дальнейшем величины, относящиеся к древесному веществу, будем обозначать с индексом «О»; к наполнителю — с индексом «Н»; к натуральной древесине — без индекса и к композиции — со звездочкой. Для системы, состоящей из параллельных элементов древесного вещества и наполнителя, можно записать следующие уравнения статики и совместности деформаций

$$\varepsilon_0 E_0 F_0 + \varepsilon_n E_n F_n = E^*_a F^*, \quad (3)$$

где  $F_0$ ;  $F_n$ ;  $F^*$  — площади поперечного сечения соответственно древесного вещества, наполнителя и композиции;

$E^*_a$  — модуль упругости модифицированной древесины при сжатии вдоль волокон.

Из системы (3) находим

$$E^*_a = E_0 \frac{F_0}{F^*} + E_n \frac{F_n}{F^*}. \quad (4)$$

Для случая, когда наполнитель заполняет только пустоты древесных волокон и сосудов и не проникает в клетки древеси-

ны, т. е. не вызывает ее набухания, с достаточной точностью площадь поперечного сечения натуральной древесины мож- считать равной площади поперечного сечения композиции.

Тогда в выражении (4)

$$E_0 \frac{F_0}{F} = E_a \quad \text{— модуль упругости натуральной древесины при сжатии вдоль волокон.}$$

$$\frac{F_n}{F} = \frac{V_n}{V} = m_n \quad \text{— объемное содержание наполнителя в древесине по отношению ко всему объему композиции.}$$

С учетом этих обозначений формула (4) переписется в следующем виде:

$$E^*_a = E_a + m_n E_n. \quad (5)$$

Модули упругости натуральной древесины при растяжении и сжатии вдоль волокон практически должны быть одинаковыми [1, 3]. Наблюдаемая разница в модулях и деформативности древесины при растяжении и сжатии объясняется особенностью строения. При растяжении вдоль волокон деформативность древесины определяется, главным образом, деформативностью материала клеточных оболочек и связей между ними, при сжатии же вдоль волокон — в основном устойчивостью клеточных оболочек и систем, составленных из них [1].

Следовательно, если в древесине все пустоты после модификации заполнены твердым веществом, то потеря устойчивости клеточных оболочек при сжатии исключается, и они будут работать примерно так же как при растяжении.

Если же заполнены не все пустоты, а  $k$  пустот, то можно считать, что  $k$  клеточных оболочек древесины при сжатии не будут терять устойчивость. Поэтому модуль упругости этой части древесины при сжатии можно заменить модулем упругости при растяжении. Очевидно здесь  $k$  не что иное, как коэффициент качества пропитки древесины [4]. С учетом сказанного модуль  $E_a$  в формуле (5) можно заменить следующим выражением

$$E_a = kE_{ap} + (1-k)E_{ac}$$

или  $E_a = E_{ac} + k(E_{ap} - E_{ac})$ ,  
где  $E_{ap}$  — модуль упругости натуральной древесины при растяжении вдоль волокон;

$E_{ac}$  — модуль упругости натуральной древесины при сжатии вдоль волокон.

С учетом последнего формула (5) примет вид

$$E^*_a = E_{ac} + k(E_{ap} - E_{ac}) + m_n E_n. \quad (6)$$

Формула (6) позволяет определить модуль упругости модифицированной древесины при сжатии вдоль волокон. Коэффициенты  $k$  и  $m_n$  зависят от количества наполнителя, введенного в древесину, и определяются по формулам:

$$k = \frac{\gamma_0 (\gamma^* - \gamma)}{\gamma_n (\gamma_0 - \gamma)},$$

$$m_n = \frac{\gamma^* - \gamma}{\gamma_n} \quad (7)$$

где  $\gamma_0$ ;  $\gamma$ ;  $\gamma_n$   $\gamma^*$  — объемный вес соответственно древесного вещества, натуральной древесины, наполнителя и модифицированной древесины.

Коэффициент  $m_n$  может быть выражен через коэффициент качества пропитки  $k$  и пористости древесины  $m_n$ :

$$m_n = km_n, \quad (8)$$

где 
$$m_n = 1 - \frac{\gamma}{\gamma_0} \quad (9)$$

С учетом (8) формула (6) запишется следующим образом:

$$E_a^* = E_{ac} + k(E_{ap} - E_{ac}) + km_n E_n. \quad (10)$$

Анализ формулы (10) показывает, что наибольший модуль упругости при продольном сжатии получим тогда, когда все поры в древесине будут заполнены наполнителем, т. е. когда коэффициент качества пропитки равен единице.

$$\max E_a^* = E_{ap} + m_n E_n.$$

При коэффициенте качества пропитки  $k=0$ ,  $E_a^* = E_{ac}$ .

*Сжатие поперек волокон.* При поперечном сжатии древесину можно рассматривать как пластинчатую и как сетчатую системы [1]. Причем, схематически можно считать, что часть оболочек расположены примерно параллельно действию сил, часть — ориентированы перпендикулярно. В натуральной древесине при поперечном сжатии работают только клеточные оболочки, ориентированные параллельно сжимающей силе. Пусть клеточные оболочки с параллельной ориентацией в тангенциальном направлении составляют  $\eta_1$ , от всей древесины, а в радикальном направлении —  $\eta_2$ . С достаточной достоверностью можно считать, что древесное вещество клеточных оболочек работает одинаково как в тангенциальном, так и в радиальном направлениях. Тогда можно записать

$$\frac{E_t}{\eta_1} = \frac{E_r}{\eta_2}, \quad (11)$$

с другой стороны

$$\eta_1 + \eta_2 = 1 - m_n. \quad (12)$$

Решая совместно уравнения (11) и (12), получим

$$\eta_1 = \frac{1 - m_n}{1 + \frac{E_r}{E_t}}, \quad \eta_2 = \frac{1 - m_n}{1 + \frac{E_t}{E_r}}. \quad (13)$$

У модифицированной древесины при сжатии поперек волокон будут работать не только клеточные оболочки, ориентированные параллельно силе, но и частично клеточные оболочки, ориентированные перпендикулярно, а конкретнее те участки, под которыми пустоты заполнены наполнителем. Рассмотрим работу участков, ориентированных перпендикулярно сжимающей силе, при сжатии в тангенциальном направлении. Для этих

участков можно записать следующие уравнения статики и совместности деформаций:

$$\begin{aligned} N_0 &= N_n = P, \\ \Delta l_0 + \Delta l_n &= \Delta l, \end{aligned} \quad (14)$$

где  $N_0$ ;  $N_n$  — усилия, воспринимаемые древесным веществом и наполнителем;

$P$  — сжимающая сила;

$\Delta l_0, \Delta l_n$  — абсолютные деформации древесного вещества и наполнителя;

$\Delta l$  — абсолютная деформация композиции.

Абсолютные деформации равны

$$\Delta l = \frac{Pl}{E_1 F}; \quad \Delta l_0 = \frac{N_0 \eta_2 l}{E_0 F f(k)}; \quad \Delta l_n = \frac{P(1-\eta_2)l}{E_n F f(k)}. \quad (15)$$

В формуле для определения деформаций древесного вещества и наполнителя введены функции, зависящие от коэффициента качества пропитки. Это обусловлено тем, что деформация их будет зависеть от того, как распределен наполнитель в пустотах и какая часть его участвует в работе при данном виде деформации.

Решая совместно уравнения (14) и (15), получим

$$E_1 = \frac{E_0 E_n f(k)}{E_n \eta_2 + E_0 (1-\eta_2)}. \quad (16)$$

Модуль упругости древесного вещества  $E_0$  в формуле (16) — это модуль упругости клеточных оболочек в поперечном направлении, которые начинают работать в третьей фазе [1, 5]. Согласно диаграммам, приведенным в работах [1, 5], модуль упругости при сжатии в третьей фазе можно с достаточной достоверностью принять равным модулю упругости в первой фазе сжатия.

Тогда  $E_0 = \frac{E_t}{\eta_2}$  и формула (16) переписывается так

$$E_1 = \frac{E_t E_n f(k)}{\eta_2^2 E_n + (1-\eta_2) E_t}. \quad (17)$$

Теперь модифицированную древесину можно рассматривать как систему, состоящую из параллельных участков с модулями упругости  $E_1$  и  $E_0$ , где  $E_0 = \frac{E_t}{\eta_1}$  — модуль упругости древесного вещества клеточных оболочек, ориентированных параллельно сжимающей силе. Таким образом, мы получили случай, аналогичный сжатию вдоль волокон. Рассуждая таким же образом как при выводе формул (3), (4) и (5), найдем

$$E^*_t = E_t + (1-\eta_1) E_1.$$

Подставив в последнее выражение  $E_1$  согласно (17), получим

$$E^*_t = E_t + (1-\eta_1) \frac{E_n E_t f(k)}{\eta_2^2 E_n + (1-\eta_2) E_t}. \quad (18)$$

Аналогично получим модуль упругости композиции при сжатии в радиальном направлении

$$E^*_r = E_r + (1 - \eta_2) \frac{E_n E_r f(k)}{\eta_1^2 E_n + (1 - \eta_1) E_r} \quad (19)$$

Как видно из формул (18) и (19), модули упругости модифицированной древесины при сжатии в тангенциальном и радиальном направлениях, как и в случае продольного сжатия, выразились через модули упругости компонентов и коэффициент качества пропитки. Только в случае поперечного сжатия коэффициент качества пропитки входит не явно, а в виде некоторой функции. Это объясняется тем, что при поперечном сжатии участки древесного вещества, ориентированные перпендикулярно сжимающей силе, работают не все, а только те, которые расположены над наполнителем. Причем количество древесного вещества, включающегося в работу, не прямо пропорционально коэффициенту качества пропитки. Там, где наполнитель не заполнил все пустоты по направлению деформирования, поперечные клеточные оболочки работать не будут. С другой стороны, согласно принципу Сен-Венана будут частично работать участки древесного вещества, расположенные вблизи наполнителя. Таким образом, при неполной пропитке, объем поперечных участков, участвующих в деформировании, окажется очевидно меньше  $k$ , а при хорошем качестве пропитки — больше  $k$ . Как видно из решения задачи, функция  $f(k)$ , входящая в уравнения (18) и (19), должна удовлетворять следующим условиям:

$$f(k=0) = 0; \quad f(k=1) = 1.$$

В качестве первого приближения можно принять следующую функцию, удовлетворяющую изложенным требованиям:

$$f(k) = \sin \frac{\pi k^2}{2}. \quad (20)$$

При одних и тех же наполнителях наибольшее значение модули упругости  $E^*$ , и  $E^*_t$  будут иметь при коэффициентах качества пропитки, равных единице.

*Результаты экспериментов.* В качестве исследуемого материала для определения модуля упругости при сжатии выбрана древесина березы, модифицированная сплавом металлов, эпоксидной смолой ЭД-5 и стиролом. Сплав металлов с температурой плавления  $t^\circ = 185^\circ\text{C}$  состоит из свинца, олова и кадмия. С целью увеличения времени отверждения смолы ЭД-5 в качестве катализатора было взято 6% полиэтиленполиамина от веса смолы, вместо рекомендуемых 10%. Применение стирола, в котором предварительно было растворено 20% полистирола (от веса стирола), позволило несколько снизить его летучесть во время термообработки пропитанной древесины. В качестве катализатора использовалась перекись бензоила (1% от веса стирола).

Пропитка древесины и режимы термообработки осуществлялись по технологии, разработанной Проблемной научно-исследовательской лабораторией модификации древесины Белорусского технологического института имени С. М. Кирова.

Заготовка, разметка, маркировка и изготовление образцов

из натуральной древесины, часть которых в последующем подвергалась процессу модификации, производилась в соответствии с требованиями ГОСТ 11484-65, методическими указаниями, разработанными лабораторией деревянных конструкций ЦНИИС и литературными источниками [6, 7].

Образцы для определения модуля упругости при сжатии вдоль волокон, в радиальном и тангенциальном направлениях были изготовлены в форме прямоугольной призмы с основанием  $20 \times 20$  мм и высотой 60 мм. Эти размеры соответствуют ГОСТ 11499-65 для натуральной древесины.

Такие же размеры образцов были приняты и для определения модулей упругости модифицированной древесины.

Для обеспечения равновесной влажности все образцы после их подготовки высушивались до постоянного веса и выдерживались в лабораторных условиях при комнатной температуре  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  с относительной влажностью воздуха  $65 \pm 5\%$  до тех пор, пока их вес не стабилизировался.

Перед испытанием образцы шлифовались и измерялись микрометром с точностью до 0,01 мм.

Испытания проводились на машине ИМ-4А с автоматической записью диаграмм нагружения и разгрузки при тех условиях, в которых выдерживались образцы.

Нижняя опорная плита машины была дополнительно снабжена переносной шаровой опорой, на которую устанавливались образцы. Нагружение проводилось равномерно в течение всего времени испытания образцов, с постоянной скоростью деформации, при которой не успевает развиваться высокоэластическая составляющая, соизмеримая с упругой. Оценка пригодности принятой скорости проверялась путем сравнения линий нагрузки и разгрузки диаграмм сжатия образцов в координатах  $P, \Delta l$ .

Деформации замерялись механическим рычажным тензометром с базой 20 мм и ценой деления 0,001 мм.

До начала испытаний на сторонах образца наносились карандашом риски посередине длины образца и в местах крепления ножек тензомера [8].

Упругая деформация измерялась на каждой грани образца [9] со снятием 8—10 отсчетов по тензометру через определенные ступени нагружения и разгрузки.

Кроме испытаний натуральной и модифицированной древесины экспериментальным исследованиям подвергались материалы, применяющиеся для модификации (сплав металла, стирол, смола ЭД-5). Условия полимеризации указанных полимеров соответствовали термообработке модифицированной древесины. Результаты экспериментальных исследований натуральной древесины и модифицирующих агентов приведены в табл. 1.

Модуль упругости исследуемой натуральной древесины при растяжении вдоль волокон оказался равным  $E_{ар} = 2,247 \cdot 10^5$  кг/см<sup>2</sup>.

На основании полученных упругих характеристик компонентов были определены по формулам (10, 18, 19) модули упругости

Таблица 1

## Результаты экспериментальных исследований

Материал	$\gamma, \text{Г/см}^3$	Модуль упругости $E, 10^{-4}, \text{кг/см}^2$		
		$E_a$	$E_r$	$E_t$
Натуральная древесина	0,605	19,6	1,134	0,676
Сплав металла	9,241	20,0	—	—
Стирол	1,037	2,747	—	—
Смола ЭД-5	1,137	3,425	—	—

Таблица 2

## Модули упругости в различных направлениях

Древесина, модифицированная	$\gamma, \text{Г/см}^3$	$k$	Модуль упругости, $\text{кг/см}^2$		$\frac{E_{\text{опыт}}}{E_{\text{опыт.}}}$
			$E_{\text{опыт}} \cdot 10^{-4}$	$E_{\text{теор}} \cdot 10^{-4}$	
<i>Вдоль волокон</i>					
Сплавом металлов	3,68	0,548	28,214	27,852	-1,28
	3,755	0,561	28,296	28,053	-0,86
	4,48	0,755	29,994	30,970	+3,25
	5,016	0,786	30,350	31,437	+3,58
<i>В тангенциальном направлении</i>					
	2,37	0,315	1,906	1,707	-10,44
	4,57	0,707	5,599	5,410	-3,37
	4,99	0,781	6,053	6,153	+1,65
<i>Вдоль волокон</i>					
Стиролом	1,02	0,659	22,795	22,588	-0,91
	1,028	0,672	21,538	22,640	+5,12
	1,0814	0,756	22,297	23,027	+3,27
<i>В тангенциальном направлении</i>					
	1,033	0,679	2,410	2,228	-7,55
	1,037	0,686	2,490	2,254	-9,47
	1,057	0,718	2,588	2,371	-8,38
<i>В радиальном направлении</i>					
	1,032	0,678	2,737	2,651	-3,14
	1,044	0,697	3,308	2,714	-17,95
	1,095	0,778	3,535	2,996	-15,24
<i>Вдоль волокон</i>					
Смолой ЭД-5	0,863	0,374	20,951	21,490	+2,57
	0,838	0,337	20,840	21,260	+2,02
	0,899	0,426	21,074	21,710	+3,02
<i>В тангенциальном направлении</i>					
	0,795	0,275	0,998	1,004	+0,6
	0,841	0,342	1,061	1,178	+11,0
	0,866	0,378	1,180	1,282	+8,64
<i>В радиальном направлении</i>					
	0,809	0,296	1,645	1,515	-7,9
	0,842	0,343	1,648	1,645	-0,18
	0,873	0,403	2,069	1,840	-11,1

модифицированной древесины. Коэффициент качества пропитки, входящий в формулы, определялся исходя из объемного веса компонентов и композиций, полученных в абсолютно сухом состоянии.

В табл. 2 приведены модули при сжатии модифицированной древесины вдоль волокон, радиальном и тангенциальном направлениях. Здесь же приведены теоретические значения модулей упругости и дано сравнение с результатами, полученными экспериментальным путем ( $\delta = \frac{E_{\text{теор}} - E_{\text{опыт}}}{E_{\text{опыт}}} \cdot 100\%$ ).

Из табл. 2 видно, что для модулей упругости при сжатии вдоль волокон теоретические результаты хорошо согласуются с экспериментальными. Теоретические значения модулей упругости в тангенциальном и радиальном направлениях несколько хуже согласуются с опытными. Очевидно, принятая функция (20) недостаточно точно определяет количество древесного вещества, дополнительно включающегося в работу, в зависимости от коэффициента качества пропитки.

Приведенные результаты говорят о том, что полученные формулы (10, 18, 19) могут быть использованы для прогнозирования упругих характеристик древесины, модифицированной компонентами, свойства которых известны.

#### Литература

- [1] П. Н. Хухрянский. Прочность древесины. М.—Л., 1955. [2] А. Н. Митинский. Упругие постоянные древесины как ортотропного материала. Тр. Лесотехн. акад. им. С. М. Кирова, в. 63, Л., 1948. [3] Л. М. Перельгин. Древесиноведение. Изд. 2-е, переработанное и дополненное Б. Н. Уголевым. М., 1969. [4] В. Е. Вихров, С. И. Карпович. Оценка качества пропитки древесины жидкостями. «Деревообр. пром.», 1971, № 5. [5] Л. М. Перельгин, Б. Н. Уголев. Древесиноведение. М., 1971. [6] Е. К. Ашкенази и др. Анизотропия механических свойств древесины и фанеры. М.—Л., 1958. [7] Ю. М. Иванов. Сопротивление древесины сосны сжатию под разными углами к волокнам. Тр. Ин-та леса, АН СССР, т. IX, М., 1953. [8] Б. Н. Уголев. Испытания древесины и древесных материалов. М., 1965. [9] Н. Л. Леонтьев. Техника испытания древесины. М., 1970.