

УДК 630*812:666.974

В.И. Харчевников, Т.Н. Стородубцева

Харчевников Виталий Иванович родился в 1934 г., окончил в 1957 г. Воронежский инженерно-строительный институт, заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой сопротивления материалов и теоретической механики Воронежской государственной лесотехнической академии. Имеет более 200 печатных работ по проблеме использования композиционных материалов на основе отходов древесины.



Стородубцева Тамара Никаноровна родилась в 1955 г., окончила в 1980 г. Воронежский лесотехнический институт, кандидат технических наук, доцент кафедры сопротивления материалов и теоретической механики Воронежской государственной лесотехнической академии. Имеет около 30 печатных работ по проблеме использования композиционных материалов на основе отходов древесины.



УПРУГИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДРЕВЕСИНЫ СОСНЫ – АРМИРУЮЩЕГО ЗАПОЛНИТЕЛЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИМЕРНОГО И ЦЕМЕНТНОГО СВЯЗУЮЩИХ

Приведены результаты определения упругих характеристик древесины сосны – армирующего заполнителя композиционных материалов – и толщины оболочки, защищающей от действия воды.

древесина, композиционный материал.

Для изготовления железнодорожных шпал общего назначения и брусьев стрелочных переводов разработаны древесностекловолокнистые композиционные материалы (ДСВКМ), для шпал лесовозных узкоколейных железных дорог и блоков покрытий колеиных автомобильных дорог – древесноцементнобетонные композиционные материалы (ДЦБКМ) [1–4]. В качестве армирующих заполнителей в ДСВКМ и ДЦБКМ используют древесину в виде кусковых отходов лесоперерабатывающих производств длиной 150 ... 200 мм, низкосортные необработанные доски или их сочетание, в качестве матриц – полимерный (на фурфуролацетоновой смоле ФАМ) или цементный бетон.

Расчет перечисленных выше элементов был основан на обеспечении прочности и жесткости шпал и блоков при различных видах механических нагрузок: кратковременных, длительно действующих и динамических. В этом расчете не учтено воздействие целого ряда физических факторов: тем-

пературы, усадки, набухания под действием воды и др. Вместе с тем, роль этих воздействий в нарушении монолитности структуры композиционных материалов (КМ) может оказаться первичной и определяющей, а механические нагрузки лишь ускоряют начавшийся процесс разрушения. Сложными и совершенно неизученными являются напряженное и деформированное состояния в окрестности произвольной точки объема элемента конструкции из КМ, возникающие под действием названных выше факторов.

Цель статьи – определить упругие характеристики древесины сосны (армирующего заполнителя композиционных материалов) и толщины защитной оболочки.

В качестве объекта исследований был принят малый объем древесины в виде куба, выпиленного из ствола сосны в соответствии с тремя взаимно перпендикулярными плоскостями упругой симметрии и заключенного в полимерную оболочку из стекловолоконистого КМ (СВКМ) на ФАМ. Это позволило, в виду малого объема куба, пренебречь кривизной годичных слоев и приписать древесине свойства ортогональной анизотропии, т.е. считать ее ортотропным телом, имеющим три взаимно перпендикулярных плоскости упругой симметрии: две – продольные по отношению к годичным слоям (радиальная и тангенциальная), третья – перпендикулярная к направлению волокон. Направления, нормальные к плоскостям упругой симметрии, называют главными направлениями упругости [1, 11]. Их совмещают с направлениями координатных осей, обозначая: a – вдоль волокон, r – радиальное поперек волокон, t – тангенциальное поперек волокон.

Запишем обобщенный закон Гука для главных направлений ортотропного тела:

$$\begin{aligned}\varepsilon_r &= \frac{\sigma_r}{E_r} - \frac{\mu_{ra}}{E_a} \sigma_a - \frac{\mu_{rt}}{E_t} \sigma_t; & \gamma_{ra} &= \frac{1}{G_{ra}} \tau_{ra}; \\ \varepsilon_a &= \frac{\sigma_a}{E_a} - \frac{\mu_{ar}}{E_r} \sigma_r - \frac{\mu_{at}}{E_t} \sigma_t; & \gamma_{at} &= \frac{1}{G_{at}} \tau_{at}; \\ \varepsilon_t &= \frac{\sigma_t}{E_t} - \frac{\mu_{tr}}{E_r} \sigma_r - \frac{\mu_{ta}}{E_a} \sigma_a; & \gamma_{tr} &= \frac{1}{G_{tr}} \tau_{tr}.\end{aligned}\quad (1)$$

В этих равенствах принято:

ε_r , ε_a и ε_t – полные относительные упругие деформации в направлении осей r , a и t ;

E_r , E_a и E_t – модули упругости древесины в направлении тех же осей;

G_{ra} , G_{ta} и G_{tr} – модули сдвига в плоскостях $0ar$, $0ta$ и $0tr$ (двойные индексы соответствуют направлениям осей, между которыми происходит изменение прямых углов на углы сдвига γ_{ra} , γ_{at} и γ_{tr});

μ_{ra} , μ_{ar} , μ_{rt} , μ_{tr} , μ_{at} и μ_{ta} – коэффициенты Пуассона древесины (первые индексы указывают направление поперечной деформации, вторые – направление действия нор-

мальных напряжений σ_r , σ_a и σ_t по осям r , a , t ;
 τ_{ra} , τ_{at} и τ_{tr} – касательные напряжения (первые индексы указывают параллельно какой оси направлено напряжение, вторые – обозначают нормаль к площадке, на которой оно действует).

К равенствам (1) добавим три соотношения, связывающие между собой постоянные упругости древесины:

$$\frac{\mu_{ra}}{E_a} = \frac{\mu_{ar}}{E_r}; \quad \frac{\mu_{tr}}{E_r} = \frac{\mu_{rt}}{E_t}; \quad \frac{\mu_{ta}}{E_a} = \frac{\mu_{at}}{E_t}. \quad (2)$$

Значения модулей упругости и коэффициентов Пуассона определены целым рядом ведущих в области древесиноведения ученых [5–9]. Однако полученные ими характеристики, внесенные в руководящие документы, не доказывают, что древесине, в частности сосне, можно приписать свойства ортогональной анизотропии.

Действительно, модули упругости имеют следующие значения: при растяжении вдоль волокон

$$E_a = (1,05 \dots 1,34) \cdot 10^4 \text{ МПа};$$

при растяжении поперек волокон

$$E_r = (0,042 \dots 0,062) \cdot 10^4 \text{ МПа} \text{ и } E_t = (0,038 \dots 0,051) \cdot 10^4 \text{ МПа}.$$

При сжатии эти характеристики имеют следующие значения:

$$E_a = (1,07 \dots 1,42) \cdot 10^4 \text{ МПа};$$

$$E_r = (0,051 \dots 0,077) \cdot 10^4 \text{ МПа};$$

$$E_t = (0,031 \dots 0,058) \cdot 10^4 \text{ МПа}.$$

Для коэффициентов Пуассона также наблюдается значительный разброс значений: $\mu_{ra} = 0,10 \dots 0,83$; $\mu_{ar} = 0,01 \dots 0,09$; $\mu_{ta} = 0,11 \dots 0,67$; $\mu_{at} = 0,01 \dots 0,09$; $\mu_{tr} = 0,47 \dots 1,25$; $\mu_{rt} = 0,10 \dots 0,90$.

Приведенные в табл. 1 наиболее близкие соотношения постоянных упругости не позволяют считать древесину сосны ортотропным телом.

Для доказательства обратного нами были определены перечисленные выше характеристики древесины сосны, срубленной в Левобережном лесничестве г. Воронежа, и проведена соответствующая статистическая обработка результатов экспериментов (табл. 2). Число образцов в сериях составляло 25 шт.

Из приведенных в табл. 3 соотношений коэффициентов Пуассона и соответствующих модулей упругости древесины сосны (влажность $(12 \pm 1) \%$) при растяжении и сжатии видно, что эти соотношения равны или близки между собой.

Таким образом, нами показано, что при выпиливании образцов в соответствии с плоскостями упругой симметрии и использовании стволов одной конкретной вырубki можно считать древесину сосны ортотропным телом и использовать полученные соотношения в соответствующем обобщенном законе Гука.

Таблица 1

Выявленные по данным научных публикаций величины соотношений постоянных упругости древесины сосны, необходимые при использовании обобщенного закона Гука

Публикация	μ_{ra} / E_a^p	μ_{ar} / E_r^p	μ_{tr} / E_r^p	μ_{rt} / E_t^p	μ_{ta} / E_a^p	μ_{at} / E_t^p
	$\times 1/10^4, 1/\text{МПа}$					
Н.Л. Леонтьев [5]	$\frac{0,490}{1,050} = 0,467$	$\frac{0,030}{0,042} = 0,714$	$\frac{0,790}{0,042} = 18,809$	$\frac{0,380}{0,038} = 10,000$	$\frac{0,410}{1,050} = 0,390$	$\frac{0,037}{0,038} = 0,974$
	0,467 \neq 0,714		18,809 \neq 10,000		0,390 \neq 0,974	
А.М. Боровиков[8], Б.Н. Уголев[7]	$\frac{0,504}{1,190} = 0,424$	$\frac{0,078}{0,054} = 1,444$	$\frac{0,527}{0,054} = 9,759$	$\frac{0,306}{0,041} = 7,518$	$\frac{0,465}{1,190} = 0,391$	$\frac{0,045}{0,047} = 0,957$
	0,424 \neq 1,444		9,759 \neq 7,518		0,391 \neq 0,957	
Е.К. Ашкенази [9]	$\frac{0,490}{1,170} = 0,419$	$\frac{0,030}{0,051} = 0,588$	$\frac{0,790}{0,051} = 15,490$	$\frac{0,380}{0,043} = 8,837$	$\frac{0,410}{1,170} = 0,350$	$\frac{0,037}{0,043} = 0,860$
	0,419 \neq 0,588		15,490 \neq 8,837		0,350 \neq 0,860	
Средние значения по данным [5–9]	$\frac{0,470}{1,200} = 0,392$	$\frac{0,050}{0,052} = 0,962$	$\frac{0,860}{0,052} = 16,538$	$\frac{0,500}{0,038} = 13,158$	$\frac{0,110}{1,200} = 0,092$	$\frac{0,010}{0,045} = 0,222$
	0,392 \neq 0,962		16,538 \neq 13,158		0,092 \neq 0,222	

Таблица 2

Характеристики упругости древесины сосны (влажность (12±1) %)

Характеристика	$\bar{X} = \frac{\sum V_i}{n}$	$\sigma = \pm \sqrt{\frac{X^2}{n-1}}$	$\sigma_{\bar{X}} = \pm \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$	$V_{\sigma} = \pm \frac{100\sigma}{\bar{X}}$	$P = \pm \frac{100\sigma_{\bar{X}}}{\bar{X}}$
$E_a^p \cdot 10^{-4}$, МПа	1,00	0,0724	0,0145	7,24	1,45
$E_r^p \cdot 10^{-4}$, МПа	0,06	0,0127	0,0025	21,17	4,23
$E_t^p \cdot 10^{-4}$, МПа	0,05	0,0074	0,0015	14,51	2,94
$E_a^{\bar{n}\bar{a}e} \cdot 10^{-4}$, МПа	1,20	0,0920	0,0180	7,67	1,50
$E_r^{\bar{n}\bar{a}e} \cdot 10^{-4}$, МПа	0,07	0,0099	0,0020	14,14	2,83
$E_t^{\bar{n}\bar{a}e} \cdot 10^{-4}$, МПа	0,06	0,0067	0,0013	11,17	2,23
μ_{ra}	0,50	0,0690	0,0138	13,80	2,76
μ_{ar}	0,03	0,0060	0,0012	20,00	4,00
μ_{ta}	0,59	0,0980	0,0196	16,61	3,32
μ_{at}	0,03	0,0056	0,0011	18,67	3,67
μ_{tr}	0,53	0,0420	0,0084	7,92	1,58
μ_{rt}	0,45	0,0343	0,0069	7,62	1,53

Таблица 3

Напряженное состояние	μ_{ra} / E_a^p	μ_{ar} / E_r^p	μ_{tr} / E_r^p	μ_{rt} / E_t^p	μ_{ta} / E_a^p	μ_{at} / E_t^p
	$\times 1 / 10^{-4}$, 1 / МПа					
Растяжение	$\frac{0,50}{1,00} = 0,50$	$\frac{0,03}{0,06} = 0,50$	$\frac{0,53}{0,06} = 8,83$	$\frac{0,45}{0,05} = 8,82$	$\frac{0,59}{1,00} = 0,59$	$\frac{0,03}{0,05} = 0,59$
	0,50 = 0,50		8,83 ≈ 8,82		0,59 = 0,59	
	Принимаем 0,50		Принимаем 8,82		Принимаем 0,59	
Сжатие	$\frac{0,50}{1,20} = 0,42$	$\frac{0,03}{0,07} = 0,43$	$\frac{0,53}{0,07} = 7,57$	$\frac{0,45}{0,06} = 7,50$	$\frac{0,59}{1,20} = 0,49$	$\frac{0,03}{0,06} = 0,50$
	0,42 ≈ 0,43		7,57 ≈ 7,50		0,49 ≈ 0,50	
	Принимаем 0,42		Принимаем 7,54		Принимаем 0,50	

Значения модулей сдвига древесины сосны определяли выборочно по ГОСТ 16483.30–73. Судя по научным публикациям, они достаточно стабильны: $G_{ra} = 0,114 \cdot 10^4$ МПа, $G_{tr} = 0,005 \cdot 10^4$ МПа, $G_{ta} = 0,07 \cdot 10^4$ МПа.

Следует отметить, что материал оболочки – полимерный раствор ФАМ, армированный во всех плоскостях тремя слоями стеклоткати СВКМ, принят условно изотропным [10].

Предложенный подход позволил выявить возможные причины возникновения трещин на поверхности, например, железнодорожных шпал из ДСВКМ и пути их устранения.

Используя данные табл. 3, формулу (1) и численные значения соотношений (для древесины – д) $1/E_{\text{д}}^{\text{др}} = 1/0,06 \cdot 10^4 = 16,66/10^4$; $1/E_{\text{д}}^{\text{да}} = 1/10^4$ и $1/E_{\text{д}}^{\text{дт}} = 1/0,05 \cdot 10^4 = 19,61/10^4$, а также считая, что все главные напряжения положительны, получили рабочую систему уравнений обобщенного закона Гука для ортотропного материала – древесины сосны:

$$\begin{cases} 16,66\sigma_r - 0,50\sigma_a - 8,82\sigma_t = \varepsilon_r \cdot 10^4; \\ -0,50\sigma_r + 1,00\sigma_a - 0,59\sigma_t = \varepsilon_a \cdot 10^4; \\ -8,82\sigma_r - 0,59\sigma_a + 19,61\sigma_t = \varepsilon_t \cdot 10^4. \end{cases} \quad (3)$$

Значения главных напряжений σ_r , σ_a и σ_t при известных ε_r , ε_a и ε_t (или наоборот) могут быть получены в результате решения системы этих уравнений с использованием определителей и ЭВМ.

Применим формулу (3) для нахождения нормальных напряжений по направлению нормалей a , r и t с целью определить теоретическую толщину δ полимерной оболочки из СВКМ. Будем считать, что относительные удлинения ее ребер под действием нормальных напряжений, возникающих в образце под действием различных физических факторов, не должны превышать предельного растяжения отвержденной полимерной мастики, равного 0,0006 (т.е. $\varepsilon_r = \varepsilon_a = \varepsilon_t = 0,0006$).

Найдем определители системы (3):

$$\Delta = 233,30; \quad \Delta_{\sigma_r^{\text{др}}} = 260,32; \quad \Delta_{\sigma_a^{\text{да}}} = 1724,42; \quad \Delta_{\sigma_t^{\text{дт}}} = 238,59.$$

Следовательно, напряжения

$$\sigma_a^{\text{др}} = \Delta_{\sigma_r^{\text{др}}} / \Delta = 260,32 / 233,30 \approx 1,12 \text{ МПа};$$

$$\sigma_a^{\text{да}} = \Delta_{\sigma_a^{\text{да}}} / \Delta = 1724,42 / 233,30 \approx 7,40 \text{ МПа} \quad (\text{опасное напряжение});$$

$$\sigma_a^{\text{дт}} = \Delta_{\sigma_t^{\text{дт}}} / \Delta = 238,59 / 233,30 \approx 1,02 \text{ МПа}.$$

Если принять, что внутреннее усилие в деревянном образце равно усилию, растягивающему полимерную оболочку (п.о) по направлению нормали a , то получим $P_a^{\text{да}} = P_{i.i}^{\text{да}}$. Перейдем от усилий к напряжениям:

$$P_a^{\text{да}} = \sigma_a^{\text{да}} b_1^2 = P_{i.i}^{\text{да}} = \sigma_{i.i}^{\text{да}} A_{i.i}^{\text{дд}}, \text{ т.е. } \sigma_a^{\text{да}} b_1^2 = \sigma_{i.i}^{\text{да}} A_{i.i}^{\text{дд}},$$

где b_1 – длина ребра куба, $b_1 = 4,5$ см;

$\sigma_{i.i}^{\text{дд}}$ – предел прочности при растяжении оболочки из СВКМ;

$A_{i,i}^{\delta}$ – площадь отрыва полимерной оболочки, $A_{i,i}^{\delta} = 4\delta(b_1 + \delta)$.

Подставляя в уравнение равновесия (4) выражение для $A_{i,i}^{\delta}$ и решая квадратное уравнение

$$\delta^2 + b_1\delta - \sigma_{i,i}^{pa} b_1^2 / 4\sigma_{i,i}^{pa} = 0,$$

находим

$$\delta = \frac{b_1}{2} \left[\left(\sqrt{1 + \sigma_{i,i}^{pa} / \sigma_{i,i}^{pa}} \right) - 1 \right] = \frac{4,5}{2} \left[\sqrt{1 + 7,4/5,3} - 1 \right] = 1,24 \text{ м}. \quad (4)$$

Здесь $\sigma_{i,i}^{\delta} = 5,3$ МПа.

В дальнейших теоретических расчетах и экспериментальных исследованиях принимали $\delta = 1,25$ см. Это значение затем было уточнено на основании эксплуатационных факторов. Например, если вместо предела прочности СВКМ будем использовать расчетное сопротивление отвержденного полимерного раствора ФАМ при растяжении $R_{i,\delta}^{\delta} = 3,75$ МПа [11] с учетом, что трещинообразование может начаться именно в полимерной оболочке, то получим реальную толщину защитной оболочки ДСВКМ и ДЦБКМ для шпал и блоков покрытий лесовозных железных дорог и колеевых автомобильных дорог:

$$\delta = \frac{b_1}{2} \left[\left(\sqrt{1 + \sigma_{i,i}^{\delta} / R_{i,\delta}^{\delta} K_{\text{ст}}} \right) - 1 \right] = \frac{4,5}{2} \left[\sqrt{1 + 7,4/3,75 \cdot 0,48} - 1 \right] = 2,25 \left[\sqrt{2,26} - 1 \right] \approx 3,0 \text{ м}. \quad (5)$$

Здесь $K_{\text{ст}}$ – коэффициент стойкости полимерной оболочки в воде, $K_{\text{ст}} = 0,48$.

Шпалы из ДСВКМ и блоки лесовозных автодорог из ДЦБКМ, в технологии отливки которых использованы результаты наших исследований, прошли стендовые и эксплуатационные испытания и рекомендованы для внедрения на объектах лесного комплекса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ашкенази Е.К. Анизотропия древесины и древесных материалов. – М.: Лесн. пром-сть, 1978. – 224 с.
2. Боровиков А.М., Уголев Б.Н. Справочник по древесине / Под ред. Б.Н. Уголева. – М.: Лесн. пром-сть, 1989. – 236 с.
3. Зобов С.Ю. Древесностекловолокнистый композиционный материал с заданными свойствами для шпал различного назначения: Автореф. дис ... канд. техн. наук. – Воронеж, 1997. – 23 с.
4. Леонтьев Н.Л. Упругие деформации древесины. – Л.: Гослесбумиздат, 1952. – 120 с.
5. Перельгин Л.М. Древесиноведение. – М.: Лесн. пром-сть, 1969. – 316 с.
6. Плужникова О.П. Составы и технология древесностекловолокнистого полимербетона на фурфуролацетоновой смоле ФАМ для железнодорожных шпал: Автореф. дис ... канд. техн. наук. – Воронеж, 1994. – 21 с.
7. Стородубцева Т.Н. Обеспечение трещиностойкости композиционного материала на основе древесины для железнодорожных шпал при отверждении и

всестороннем увлажнении: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Воронеж, 1999. – 20 с.

8. *Стородубцева Т.Н.* Определение толщины слоя полимерного раствора, защищающего древесный армирующий наполнитель композиционного материала от воздействия воды // Сб. науч. тр. / ВГЛТА. – Воронеж, 1998. – С. 222–225.

9. *Уголев Б.Н.* Древесиноведение с основами лесного товароведения. – М.: Лесн. пром-сть, 1986. – 368 с.

10. *Харчевников В.И., Бондарев Б.А.* Композиционные материалы для шпал лесовозных и общего назначения железных дорог / Под ред. Харчевникова В.И. – Липецк: ЛГТУ, 1996. – 256 с.

11. *Харчевников В.И.* Стекловолокнистые полимербетоны – коррозионно-стойкие материалы для конструкций химических производств: Дис. ... д-ра техн. наук. – Воронеж, 1982. – 424 с.

Воронежская государственная
лесотехническая академия

Поступила 11.04.01

V.I. Kharchevnikov, T.N. Storodubtseva

Elastic Characteristics of Pine Wood – Reinforcing Aggregate of Composite Materials on Base of Plastic and Concrete Binders

The outcomes of determining elastic characteristics of pine wood - reinforcing aggregate of composite materials – and thickness of tunic protecting from water are given.

