Известия НАН Армении, Физика, т.59, №3, с.332–341 (2024)
УДК 539.3; 535.012; 535.2
DOI:10.54503/0002-3035-2024-59.3-332

АНИЗОТРОПНЫЕ МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПРОЗРАЧНОЙ ДРЕВЕСИНЫ

М.Л. САРГСЯН, Р.С. АКОПЯН*

Ереванский государственный университет, Ереван, Армения

*e-mail: rhakob@ysu.am

(Поступила в редакцию 14 августа 2024 г.)

Работа посвящена моделированию механических характеристик прозрачной древесины. В исследовании для упрощения математического моделирования образцов прозрачной древесины использовалось предположение о поперечной изотропии. Простые эксперименты по растяжению прозрачного древесного шпона были теоретически проанализированы с помощью выражения плотности упругой свободной энергии. В результате получены теоретические соотношения, связывающие основные упругие константы с коэффициентами упругости, входящими в выражение плотности свободной энергии. Затем были рассчитаны коэффициенты упругости прозрачного образца древесины на основе бальзы. Эти коэффициенты позволяют дать механическую характеристику материалов, что важно с точки зрения их потенциального применения.

1. Введение

Прозрачная древесина (TW) – это функционализированный древесный композит, который первоначально был создан для изучения морфологии древесины [1] и оказался материалом с удивительными анизотропными механическими и оптическими свойствами.

В последнее время исследования этих материалов возобновились [2, 3]. Прозрачные образцы древесины были изготовлены путем инфильтрации различных материалов, особенно различных полимеров (например, poly(methyl methacrylate) (PMMA) [2, 4], poly(vinyl alcohol) (PVA) [5] и т.д.), в первоначально делигнифицированные образцы древесины. В дополнение к анизотропным механическим свойствам, унаследованным от натуральной древесины, изучение этих различно изготовленных образцов выявило сильные анизотропные оптические свойства [2, 3, 5, 6]. Наблюдаемый высокий оптический коэффициент пропускания и мутность, относительно низкая теплопроводность и плотность, а также световодные свойства, среди прочего, вызвали интерес инженерной общественности, благодаря их перспективности для применения в современных умных зданиях в качестве альтернативы обычному стеклу [2–10]. Изготовление прозрачных образцов древесины только на биооснове открывает путь к новым применениям, таким как экологически чистая упаковка [6].

Функционализация прозрачной древесины открыла другие возможности применения [7, 8]. В работе [11] авторы сообщают, что включение квантовых точек в образец прозрачной древесины демонстрирует свойства диффузной люминесценции с потенциальным применением в качестве планарных источников света, дизайнерской мебели и так далее. В другом исследовании была продемонстрирована возможность создания «умного» окна с регулировкой мутности с использованием прозрачной древесины в качестве подложки [9]. На деревянную подложку был нанесен слой полимерно-дисперсной жидкокристаллической пленки. Свойства окна контролировались путем изменения ориентации жидкокристаллического слоя с помощью внешнего электрического поля. При приложении электрического поля структура становилась прозрачной, а без поля окно демонстрировало хорошие защитные свойства из-за высокой степени мутности. В работе [12] было показано, что образец прозрачной древесины, легированный молекулами органического красителя, может осуществлять генерацию излучения при соответствующих условиях накачки. Авторы работы [13] сообщили, что светорассеивающие свойства прозрачной древесины также связаны с состоянием поляризации света. Более того, полностью неполяризованный свет становится частично поляризованным после прохождения через образец прозрачной древесины. Несмотря на то, что прозрачная древесина привлекает большое внимание как новый оптический материал, выяснение взаимодействия света и древесины все еще требует дополнительных исследований.

Учитывая значительный прогресс, достигнутый в этой области, и огромный потенциал для инженерных применений, механическое моделирование образцов прозрачной древесины становится все более важным. В настоящей работе, предполагая, что рассматриваемые материалы являются поперечно изотропными, теория механических деформаций была применена к прозрачному древесному шпону для описания интересных анизотропных упругих свойств таких материалов.

2. Теоретический подход

Механические свойства различных видов прозрачной древесины, наряду с их захватывающими оптическими свойствами, описаны во многих работах [2, 3, 5, 6, 8]. Как и натуральная древесина, образцы прозрачной древесины демонстрируют механическую анизотропию. Хорошо известно, что натуральная древесина считается ортотропным материалом. Учитывая свойства симметрии этих материалов, для полного описания их упругих свойств требуются девять упругих постоянных [14]. В данном исследовании мы предполагаем, что прозрачный древесный шпон, представляющий собой композицию волокон в матрице, выровненной в одном направлении, может быть смоделирован как поперечно изотропный. Поэтому пяти упругих постоянных достаточно, чтобы полностью охарактеризовать относительно тонкие образцы прозрачной древесины в рамках этого предположения. Следует отметить, что такое предположение особенно хорошо работает, когда образцы натуральной древесины вырезаны на значительном расстоянии от центра дерева, что позволяет пренебречь кривизной колец роста [15]. Такое предположение принято делать для многих композитов на основе древесины [14, 16]. Например, его применимость для бальзовой древесины (рассматриваемой в данной работе) также подтверждена экспериментально в исследованиях [17].

В общем случае для линейно упругих материалов плотность свободной энергии может быть выражена в следующей форме [18]:

$$F_{\mathrm{el}} = \frac{1}{2}\lambda_{iklm}u_{ik}u_{lm}, \tag{1}$$

здесь λ_{iklm} является тензором модуля упругости, $u_{ik} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_k} + \frac{\partial u_k}{\partial x_i}\right)$, а $\mathbf{u}$ – вектором смещения. Учитывая симметрию тензоров деформаций и напряжений, тензор модуля упругости (λ_{iklm}) может быть определен как тензор, обладающий следующими свойствами симметрии: $\lambda_{iklm} = \lambda_{kilm} = \lambda_{ikml}$. Кроме того, существование функции плотности свободной энергии означает, что тензор модуля упругости обладает дополнительными свойствами симметрии: $\lambda_{ikml} = \lambda_{mlik}$. Четырехранговый тензор, обладающий указанными выше свойствами симметрии, в общем случае имеет 21 независимую компоненту. Если рассматриваемый материал также обладает симметрией, то тензор упругости будет иметь более простую структуру (число независимых компонент будет меньше 21).

Так, для материала с поперечной изотропией тензор модуля упругости должен быть построен из единичного тензора δ_{ik} и вектора $\mathbf{a}$, который в нашем случае является вектором вдоль направления волокон. Следующие пять комбинаций являются линейно независимыми:

$$\begin{gathered}\delta_{ik}\delta_{lm},\ \delta_{il}\delta_{km} + \delta_{kl}\delta_{im},\\ a_i a_k \delta_{lm} + a_l a_m \delta_{ik}, a_i a_l \delta_{km} + a_k a_l \delta_{im} + a_i a_m \delta_{kl} + a_k a_m \delta_{il}, a_i a_k a_l a_m.\end{gathered} \tag{2}$$

С учетом (2), для плотности упругой свободной энергии деформированного прозрачного древесного шпона имеем следующее выражение:

$$\begin{gathered}F_{\mathrm{el}} = \lambda_0 (u_{ik})^2 + \frac{1}{2}\lambda_1 (u_{ii})^2 + 2\lambda_2 a_i a_k u_{ip} u_{kp}\\ +\lambda_3 a_i a_k u_{ik} u_{pp} + \frac{1}{2}\lambda_4 a_i a_k a_l a_m u_{ik} u_{lm}.\end{gathered} \tag{3}$$

Соответствующий тензор напряжений может быть получен из уравнения (3) путем дифференцирования плотности свободной энергии по тензору деформаций:

$$\begin{gathered}\sigma_{ik} = \frac{\partial F_{\mathrm{el}}}{\partial u_{ik}} = 2\lambda_0 u_{ik} + \lambda_1 u_{pp}\delta_{ik} + 4\lambda_2 a_i a_f u_{fk} + \lambda_3 a_i a_k u_{pp}\\ + \lambda_3 a_q a_f u_{qf} \delta_{ik} + \lambda_4 a_i a_k a_l a_m u_{lm}.\end{gathered} \tag{4}$$

Для поперечно изотропных материалов соотношения между напряжением и деформацией могут быть представлены в следующем виде [14]:

$$\begin{pmatrix}\sigma_{xx}\\ \sigma_{yy}\\ \sigma_{zz}\\ \sigma_{xz}\\ \sigma_{zy}\\ \sigma_{yx}\end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2\lambda_0+\lambda_1 & \lambda_1 & \lambda_1+\lambda_3 & 0 & 0 & 0\\ \lambda_1 & \lambda_1+2\lambda_0 & \lambda_1+\lambda_3 & 0 & 0 & 0\\ \lambda_1+\lambda_3 & \lambda_1+\lambda_3 & 2\lambda_0+\lambda_1+4\lambda_2+2\lambda_3+\lambda_4 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & \lambda_0+2\lambda_2 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_0+2\lambda_2 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_0\end{pmatrix}\begin{pmatrix}u_{xx}\\ u_{yy}\\ u_{zz}\\ 2u_{xz}\\ 2u_{zy}\\ 2u_{yx}\end{pmatrix} \tag{5}$$

Ниже мы кратко рассмотрим простые эксперименты на растяжение. Проведя эти эксперименты, как описано, можно определить компоненты матрицы податливости. Поскольку матрицы податливости и жесткости взаимно обратны, можно получить компоненты матрицы жесткости, представленной в уравнении (5), что позволит определить пять коэффициентов упругости, входящих в выражение плотности свободной энергии.

2.1. Простое растяжение вдоль направления волокон древесины

В качестве первого эксперимента мы рассмотрим простое растяжение образца прозрачного древесного шпона (рис.1a), когда напряжение прикладывается вдоль направления волокон. Ось симметрии материала и единичный вектор вдоль направления волокон расположены вдоль оси *z* ($a_x = a_y = 0$, $a_z = 1$).

Используя соотношение между напряжением и деформацией (4) и процедуры, описанные в [19], основные постоянные упругости, характеризующие материал, могут быть определены через коэффициенты свободной энергии.

Так, модуль Юнга, который представляет собой отношение растягивающего напряжения к деформации, будет иметь следующий вид:

$$E_{\parallel} = \frac{p}{u_{zz}^{\parallel}} = \frac{\Lambda_{\parallel}}{\lambda_0+\lambda_1}, \tag{6}$$

где $\Lambda_{\parallel} = 2\lambda_0^2 + 3\lambda_0\lambda_1 + 4\lambda_0\lambda_2 + 4\lambda_1\lambda_2 + 2\lambda_0\lambda_3 - \lambda_3^2 + \lambda_0\lambda_4 + \lambda_1\lambda_4$, а сила, действующая на единицу площади, равна **p**. Что касается коэффициентов Пуассона (отношения поперечной деформации к продольной деформации), то они могут быть получены следующим образом:

$$\nu_{\parallel} = -\frac{u_{xx}^{\parallel}}{u_{zz}^{\parallel}} = -\frac{u_{yy}^{\parallel}}{u_{zz}^{\parallel}} = \frac{\lambda_1+\lambda_3}{2(\lambda_0+\lambda_1)}. \tag{7}$$

2.2. Простое растяжение, перпендикулярное направлению волокон древесины

На рис.1b показан простой эксперимент с растяжением, проведенный перпендикулярно направлению волокон древесины ($a_y = a_z = 0$, $a_x = 1$). В этом эксперименте основные упругие константы определяются аналогичным образом. Для модуля Юнга мы получаем следующее выражение:

$$E_{\perp} = \frac{p}{u_{zz}^{\perp}} = \frac{4\lambda_0\Lambda_{\parallel}}{\Lambda_{\perp}}, \tag{8}$$

где $\Lambda_{\perp} = 4\lambda_0^2 + 4\lambda_0\lambda_1 + 8\lambda_0\lambda_2 + 4\lambda_1\lambda_2 + 4\lambda_0\lambda_3 - \lambda_3^2 + 2\lambda_0\lambda_4 + \lambda_1\lambda_4$.

Коэффициенты Пуассона будут иметь следующий вид:

$$\nu_{\perp x} = -\frac{u_{xx}^{\perp}}{u_{zz}^{\perp}} = \frac{2\lambda_0(\lambda_1+\lambda_3)}{\Lambda_{\perp}}, \quad \nu_{\perp y} = -\frac{u_{yy}^{\perp}}{u_{zz}^{\perp}} = \frac{2\Lambda_{\parallel}-\Lambda_{\perp}}{\Lambda_{\perp}}. \tag{9}$$

Проведя два описанных выше эксперимента с растяжением, можно определить коэффициенты λ_0, λ_1, λ_3 и $\lambda = 4\lambda_2 + \lambda_4$. Для определения всех пяти коэффициентов упругости необходимо также провести третий эксперимент, чтобы

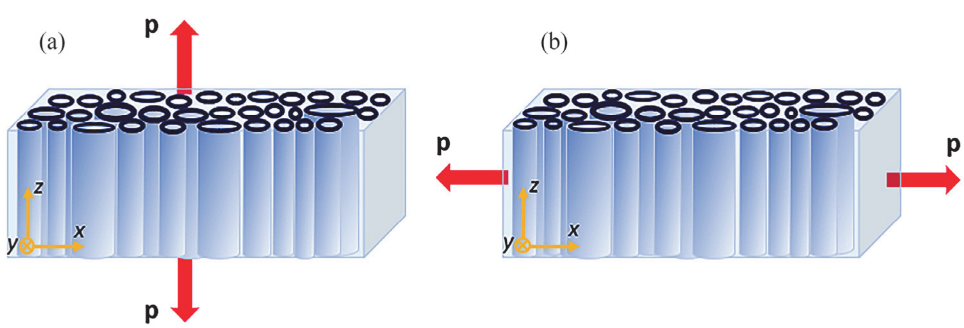

Рис.1. Схематическое изображение экспериментов. Силы приложены (a) параллельно и (b) перпендикулярно направлению волокон древесины.

получить оставшуюся главную постоянную упругости $G_{\parallel} = \lambda_0 + 2\lambda_2$ (модуль сдвига в плоскости, параллельной волокнам древесины). Она может быть определена из третьего эксперимента с растяжением, когда направление волокон древесины образует угол 45° с направлением нагрузки (путем измерения деформации вдоль направления нагрузки и использования соотношений преобразования модуля [14]).

2.3. Ограничения на постоянные упругости

Основной принцип положительной плотности энергии деформации [20] может быть использован для получения ограничений на упругие константы. Обобщая основные ограничения, для случая с поперечной изотропией мы получаем следующее:

$$\begin{cases} \nu_{\perp x} = \frac{E_{\perp}}{E_{\parallel}}\nu_{\parallel}, \\ \nu_{\parallel}^2 < E_{\parallel}/E_{\perp}, \\ \nu_{\perp y}^2 < 1, \\ \nu_{\perp y} < 1 - 2\nu_{\parallel}^2\left(\frac{E_{\perp}}{E_{\parallel}}\right). \end{cases} \tag{10}$$

Экспериментальные значения, полученные для различных типов прозрачной древесины, должны удовлетворять ограничениям, записанным в уравнении (10).

3. Применение подхода к образцу прозрачной древесины на основе бальзы

Прозрачная древесина – относительно новый материал, но её свойства привлекают большое внимание из-за потенциала применения в инженерии. Её механические свойства наряду с интересными оптическими характеристиками были изучены в ряде работ для различных образцов прозрачной древесины. Как и ожидалось, механические свойства прозрачной древесины зависят от свойств древесины, из которой она была изготовлена [7]. Кроме того, механические характеристики этих структур можно регулировать, изменяя объемную долю древесины/целлюлозы [2]. Есть несколько работ, свидетельствующих о том, что механические свойства таких функционализированных образцов древесины выше, чем у инфильтрованного полимера или у образца делигнифицированной древесины (например, для образца PMMA TW (объемная доля целлюлозы 19%); прочность при растяжении 90.1 МПа, модуль упругости 3.59 ГПа, в то время как для чистого PMMA прочность при растяжении 44.1 МПа, модуль упругости 1.8 ГПа, а для образца делигнифицированной древесины прочность при растяжении 3 МПа, а модуль упругости 0.22 ГПа) [2, 7]. Важно также отметить, что прочность при растяжении инфильтрованного полимера вносит значительный вклад в прочность образца TW [21]. Для сравнения стоит упомянуть, что существуют и другие образцы функционализированной древесины, которые также демонстрируют выдающиеся механические свойства. В частности, некоторые из них, такие как уплотненная древесина (с пределом прочности на растяжение 587 МПа) [22], демонстрируют даже более высокие механические свойства. Кроме того, при сравнении прозрачной древесины с обычным стеклом следует отметить, что прозрачная древесина демонстрирует потенциальные преимущества, особенно в вопросах безопасности, благодаря большей дуктильности и более высокой (на порядок) вязкости разрушения [5, 7].

До сих пор проводимые эксперименты по механической характеристике изготовленных образцов прозрачной древесины сводились к измерению кривых напряжение–деформация. Для данной работы этих экспериментальных данных недостаточно для расчета всех коэффициентов упругости, необходимых для полной характеристики механического поведения этих материалов. Некоторые недостающие данные были рассчитаны с помощью аналитических микромеханических моделей для однонаправленных композитных материалов [23, 24]. Из феноменологических моделей применялись модель правила смеси (rule of mixture) и модель обратного правила смеси (inverse rule of mixture), как описано в работах [23–25]. В этом случае основные постоянные упругости будут определяться из следующих соотношений:

$$E_{\parallel} = E_{\mathrm{f}\parallel} V_{\mathrm{f}} + E_{\mathrm{m}} V_{\mathrm{m}} \tag{11}$$

$$\nu_{\parallel} = V_{\mathrm{f}} \nu_{\mathrm{f}\parallel} + V_{\mathrm{m}} \nu_{\mathrm{m}}\ , \tag{12}$$

$$E_{\perp} = \frac{E_{\mathrm{f}\perp} E_{\mathrm{m}}}{E_{\mathrm{m}} V_{\mathrm{f}} + E_{\mathrm{f}\perp} V_{\mathrm{m}}}, \tag{13}$$

$$\nu_{\perp y} = \frac{\nu_{\mathrm{f}\perp y} \sigma_{\mathrm{m}}}{\nu_{\mathrm{m}} V_{\mathrm{f}} + \nu_{\mathrm{f}\perp y} V_{\mathrm{m}}}, \tag{14}$$

где V_{f} является объемной долей волокна, $E_{\mathrm{f}\parallel}$, $E_{f\perp}$ – модули Юнга волокна, $\nu_{f\parallel}$, $\nu_{\mathrm{f}\perp y}$ – коэффициенты Пуассона волокна, E_{m}, и ν_{m} представляют модуль Юнга и коэффициент Пуассона матрицы, а V_{m} – объемная доля матрицы.

В частности, в работе [8] были экспериментально определены модули Юнга ($E_{\parallel} = 4.3$ и $E_{\perp} = 2.4$ ГПа) для прозрачного древесного шпона на основе древесины бальзы. Используя экспериментально полученные значения модулей Юнга, измеренный модуль Юнга $E_{\mathrm{m}} = 2.3$ ГПа и коэффициент Пуассона $\nu_{\mathrm{m}} = 0.38$ для матрицы PMMA [8], а также объемные доли древесного волокна ($V_f = 12$ об%) и матрицы ($V_m = 88$ об%), из уравнений (11) и (12) можно оценить продольный (~18.97 ГПа) и поперечный (~3.52 ГПа) модули Юнга древесного волокна. Учитывая, что коэффициенты Пуассона бальзовой древесины существенно не зависят от плотности, и предполагая, что эти коэффициенты остаются неизменными после делигнификации [8], мы приняли результаты, представленные в [15] для коэффициентов Пуассона бальзовой древесины ($\nu_{\mathrm{f}\perp y} \approx 0.2, \nu_{\mathrm{f}\parallel} \approx 0.1$), для дальнейших оценок в рамках данного исследования. Таким образом, для коэффициентов Пуассона прозрачной древесины из бальзы, используя уравнения (13) и (14), получаем: $\nu_{\parallel} = 0.3464, \nu_{\perp y} = 0.343$.

Некоторые из основных упругих констант были оценены с помощью полуэмпирической микромеханической модели Чамиса [23, 24]. С помощью этой модели постоянные упругости могут быть определены из следующих соотношений:

$$E_{\parallel} = E_{\mathrm{f}\parallel} V_{\mathrm{f}} + E_{\mathrm{m}} V_{\mathrm{m}}, \tag{15}$$

$$\nu_{\parallel} = V_{\mathrm{f}} \nu_{\mathrm{f}\parallel} + V_{\mathrm{m}} \nu_{\mathrm{m}}, \tag{16}$$

$$E_{\perp} = \frac{E_{\mathrm{m}}}{1 - \sqrt{V_{\mathrm{f}}}\left(1 - \frac{E_{\mathrm{m}}}{E_{\mathrm{f}\perp}}\right)}, \tag{17}$$

$$\nu_{\perp \mathrm{y}} = \frac{E_{\perp}}{2G_{\perp y}} - 1, \tag{18}$$

$$G_{\perp y} = \frac{G_{\mathrm{m}}}{1-\sqrt{V_{\mathrm{f}}}\left(1-\frac{G_{\mathrm{m}}}{G_{\mathrm{f}\perp y}}\right)}, \tag{19}$$

где $G_{\perp y}$ представляет собой модуль сдвига прозрачной древесины, а $G_{\mathrm{f}\perp y} = \frac{E_{\mathrm{f}\perp}}{2(1+\nu_{\mathrm{f}\perp y})}$ – модуль сдвига древесины. В этом случае мы можем оценить продольный (~18.97 ГПа) и поперечный (~2.61 ГПа) модули Юнга древесного волокна из экспериментальных данных, используя уравнения (15) и (16). Используя заданные значения коэффициента Пуассона для бальзового сердечника ($\nu_{\mathrm{f}\perp y} \approx 0.2$, $\nu_{\mathrm{f}\|} \approx 0.1$), определяем коэффициенты Пуассона прозрачной бальзовой древесины с помощью уравнений (17)–(19): $\nu_{\|} = 0.3464$, $\nu_{\perp y} = 0.323$.

В табл.1 приведены подробные сведения о составе прозрачного образца древесины и суммированы экспериментальные и рассчитанные с помощью микромеханической моделей значения его основных упругих констант. Таким образом, применяя описанный выше теоретический подход и используя значения некоторых основных упругих констант из табл.1, можно оценить коэффициенты упругости λ_0, λ_1, λ_3 и $\lambda = 4\lambda_2 + \lambda_4$.

Табл.1. Основные упругие константы рассматриваемого материала

Название материала	Тип древесины	Метод производства	$E_{\|}$, ГПа	$E_{\perp}$, ГПа	${\nu_{\perp y}}^a$	${\nu_{\perp y}}^b$	${\nu_{\|}}^c$
Шпон PMMA TW [8]	бальза	$NaClO_2$	4.3	2.4	0.343	0.323	0.3464

Важно отметить, что полученные значения основных упругих констант хорошо удовлетворяют всем теоретическим неравенствам для материалов с поперечной изотропией, приведенным выше (уравнение (10)).

В табл.1 ${\nu_{\perp y}}^a$ рассчитано с использованием обратного правила смеси, ${\nu_{\perp y}}^b$ – с помощью модели Чамиса, а ${\nu_{\|}}^c$ – с использованием правила смеси.

В табл.2 приведены расчетные значения коэффициентов упругости для прозрачного образца древесины, изготовленного из бальзы. Это первые оценки коэффициентов упругости для подобных материалов. Для того, чтобы определить все пять коэффициентов, входящих в выражение плотности упругой свободной энергии, и, следовательно, провести полную характеристику упругих свойств материала, необходимо выполнить все описанные выше эксперименты. В результате все константы, необходимые для расчета коэффициентов, будут измерены

Табл.2. Результаты оценки для образца прозрачной древесины из бальзы

Образец	Примененные модели	Коэффициенты, ГПа			
		λ_0	λ_1	λ_3	λ
Шпон PMMA TW	Феноменологическая	0.8935	1.4	0.189	1.836
Шпон PMMA TW	Полуэмпирический метод Чамиса	0.907	1.3	0.228	1.787

экспериментально, что позволит произвести более точный расчет для данного образца. Ожидается, что значения коэффициентов упругости будут несколько отличаться в зависимости от состава образцов и процедур, использованных для их изготовления. В будущем материалы с определенными целевыми свойствами будут синтезироваться по аналогичным технологиям и станут доступны для промышленного применения. Можно ожидать, что в этом случае расчетные коэффициенты для разных образцов при одинаковых условиях (влажность, температура и т.д.) будут одинаковыми.

Следует также отметить, что для ряда перспективных применений необходимы толстые образцы с высоким оптическим коэффициентом пропускания. Однако развитие технологий изготовления более толстых (сантиметровых) образцов прозрачной древесины остается сложной задачей [9]. Известно, что, когда толщина древесины соответствует ее продольному направлению (свет распространяется вдоль волокон), можно получить относительно толстую прозрачную древесину с высоким коэффициентом пропускания по сравнению с образцами, где толщина древесины соответствует перпендикулярному направлению (свет распространяется в поперечной плоскости) [3, 7, 9, 26]. Но при этом прозрачная древесина с толщиной в продольном направлении имеет значительно худшие механические свойства, а также размеры образцов ограничены поперечным сечением древесины [3, 9]. Таким образом, структура (а не толщина) толстых образцов может оказать существенное влияние как на их свойства, так и на применение предположения о поперечной изотропии для этих материалов. После дальнейшего технологического прогресса в этой области можно будет изучить применимость этого предположения к образцам прозрачной древесины большей толщины – это направление для будущих исследований. Еще один важный момент: в отличие от натуральной древесины, которая является неоднородным материалом, а значит, эти постоянные будут отличаться от точки к точке, прозрачные образцы древесины, как показали эксперименты, имеют значительно более однородные поля деформации [27]. Таким образом, рассмотренная модель, полагающая образцы однородными, не является обычным упрощением.

4. Заключение

В данной работе, насколько нам известно, мы впервые сообщаем об оценке коэффициентов упругости, входящих в выражение упругой свободной энергии для образца прозрачной древесины. Во-первых, мы разработали связь между основными упругими константами и коэффициентами упругости на основе предположения о поперечной изотропии. Предположение о таких свойствах симметрии является обычным подходом для уменьшения количества коэффициентов при характеризации материала. Применимость этого предположения в случае более толстых образцов прозрачной древесины остается невыясненной, и это важная тема для будущих исследований, особенно с учетом того, что технологический прогресс будет способствовать изготовлению таких образцов. Затем эти коэффициенты были оценены для прозрачной древесины, изготовленной из бальзы, с использованием имеющихся экспериментальных данных. Некоторые недостающие данные были рассчитаны с помощью микромеханических моделей для однонаправленных композитных материалов. Определение коэффициентов упругости позволит охарактеризовать эти относительно новые материалы с точки зрения упругости, что важно для их моделирования и применения в технике, материаловедении и т.д.

Все подтверждающие данные можно получить у авторов по соответствующему запросу.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Комитета по высшему образованию и науке РА в рамках научного проекта № 21AG–1C088.

ЛИТЕРАТУРА

1. **S. Fink.** Holzforschung, **46**, 403 (1992).
2. **Y. Li, Q. Fu, S. Yu, M. Yan, L. Berglund.** Biomacromolecules, **17**, 1358 (2016).
3. **M. Zhu, J. Song, T. Li, A. Gong, Y. Wang, J. Dai, Y. Yao, W. Luo, D. Henderson, L. Hu.** Adv. Mater., **28**, 5181 (2016).
4. **J. Wu, Y. Wu, F. Yang, C. Tang, Q. Huang, J. Zhang.** Composites Part A, **117**, 324 (2019).
5. **R. Mi, T. Li, D. Dalgo, C. Chen, Y. Kuang, S. He, X. Zhao, W. Xie, W. Gan, J. Zhu, J. Srebric, R. Yang, L. Hu.** Adv. Funct. Mater., **30**, 1907511 (2020).
6. **L. Van Hai, R.M. Muthoka, P.S. Panicker, D.O. Agumba, H.D. Pham, J. Kim.** Carbohydr. Polym., **264**, 118012 (2021).
7. **Y. Li, E. Vasileva, L. Sychugov, S. Popov, L. Berglund.** Adv. Opt. Mater., **6**, 1800059 (2018).
8. **Q. Fu, M. Yan, E. Jungstedt, X. Yang, Y. Li, L.A. Berglund.** Compos. Sci. Technol., **164**, 296 (2018).
9. **Y. Li, X. Yang, Q. Fu, R. Rojas, M. Yan, L. Berglund.** J. Mater. Chem. A, **6**, 1094 (2018).
10. **T. Li, M. Zhu, Z. Yang, J. Song, J. Dai, Y. Yao, W. Luo, G. Pastel, L. Hu.** Adv. Energy Mater., **6**, 1601122 (2016).
11. **Y. Li, S. Yu, J.G.C. Veinot, J. Linnros, L. Berglund, I. Sychugov.** Adv. Opt. Mater., **5**, 1600834 (2017).
12. **E. Vasileva, Y. Li, L. Sychugov, M. Mensi, L. Berglund, S. Popov.** Adv. Opt. Mater., **5**, 1700057 (2017).
13. **E. Vasileva, A. Baitenov, H. Chen, Y. Li, I. Sychugov, M. Yan, L. Berglund, S. Popov.** Opt. Lett., **44**, 2962 (2019).
14. **J. Bodig, B.A. Jayne.** Mechanics of Wood and Wood Composites. Krieger Publishing Company: Malabar, FL, USA, 1993.
15. **V.L. Tagarielli, V.S. Deshpande, N.A. Fleck, C. Chen.** Int. J. Mech. Sci., **47**, 666 (2005).
16. **J.F. Davalos, J.R. Loferski, S.M. Holzer, V. Yadama.** J. Mat. Civil. Eng., **3**, 125 (1991).
17. **K.E. Easterling, R. Harrysson, L.J. Gibson, M.F. Ashby.** Proc. R. Soc. Lond. A: Math. Phys. Eng. Sci., **383**, 31 (1982).
18. **Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц.** Теория упругости. Москва, Наука, 1987.
19. **M.R. Hakobyan, R.S. Hakobyan.** J. Contemp. Phys. (Armenian Ac. Sci.), **52**(3), 295 (2017).
20. **B.M. Lempriere.** AIAA J, **6**, 2226 (1968).
21. **T.B. Jele, J. Andrew, M. John, B. Sithole.** Cellulose, **30**, 5447 (2023).
22. **J. Song, C. Chen, S. Zhu, M. Zhu, J. Dai, U. Ray, Y. Li, Y. Kuang, Y. Li, N. Quispe, Y. Yao, A. Gong, U.H. Leiste, H.A. Bruck, J.Y. Zhu, A. Vellore, H. Li, M.L. Minus, Z.

Jia, A. Martini, T. Li, L. Hu.** Nature, **554**, 224 (2018).
23. **M.A. Kaddaha, R. Younes, P. Lafon.** Eng, **2**, 416 (2021).
24. **R. Younes, A. Hallal, F. Fardoun, F.H. Chehade.** Comparative Review Study on Elastic Properties Modeling for Unidirectional Composite Materials. Comp. Prop., InTech. (2012).
25. **J. Lanteigne, C. de Tourreil.** Comput. Math. Appl., **11**, 1007 (1985).
26. **Y. Li, Q. Fu, X. Yang, L. Berglund.** Philos. Trans. A: Math. Phys. Eng. Sci., **376**, 182 (2018).
27. **E. Jungstedt, C. Montanari, S. Östlund, L. Berglund.** Compos. Part A: Appl. Sci. Manuf., **133**, 105853 (2020).

ԹԱՓԱՆՑԻԿ ՓԱՅՏԻ ԱՆԻԶՈՏՐՈՊ ՄԵԽԱՆԻԿԱԿԱՆ ՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ

Մ.Լ. ՍԱՐԳՍՅԱՆ, Ռ.Ս. ՀԱԿՈԲՅԱՆ

Սույն հոդվածը նվիրված է թափանցիկ փայտի հետաքրքիր մեխանիկական հատկությունների մոդելավորմանը: Տվյալ հետազոտության շրջանակում կիրառվել է լայնական իզոտրոպության ենթադրությունը՝ թափանցիկ փայտի նմուշների մաթեմատիկական մոդելավորման պարզեցման նպատակով: Իրականացվել է թափանցիկ փայտի նմուշի պարզ առաձգական փորձերի տեսական վերլուծություն՝ օգտագործելով առաձգական ազատ էներգիայի խտության արտահայտությունը: Արդյունքում ստացվել են տեսական արտահայտություններ, որոնք կապում են հիմնական առաձգական հաստատունները ազատ էներգիայի խտության արտահայտության մեջ մտնող առաձգականության գործակիցների հետ: Այնուհետև մենք գնահատել ենք առաձգականության գործակիցները բալզայի հիման վրա պատրաստված թափանցիկ փայտի նմուշի համար: Այս գործակիցները հնարավորություն են տալիս իրականացնել այդ նյութերի մեխանիկական բնութագրում, ինչը կարևոր է դրանց հնարավոր կիրառությունների տեսանկյունից:

ANISOTROPIC MECHANICAL PROPERTIES OF TRANSPARENT WOOD

M.L. SARGSYAN, R.S. HAKOBYAN

Transparent wood, which is a type of functionalized wood, is attracting increasing attention from the research community, given its enormous potential for applications in emerging technologies, as it combines high optical transmittance with impressive mechanical properties. The modelling of their interesting mechanical performance is the focus of this article. In this study, the assumption of transverse isotropy has been used to simplify the mathematical modeling of transparent wood samples. Simple tensile experiments of transparent wood veneer have been theoretically analyzed using elastic free energy density expression. As a result, theoretical relations are obtained linking the main elastic constants with the elasticity coefficients that enter the expression of the free energy density. Then we have estimated elasticity coefficients of a transparent wood sample based on balsa. These coefficients enable mechanical characterization of these materials, which is important from the perspective of their potential applications.