

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 620.179.1

DOI: 10.17223/00213411/65/12/146

**АКУСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДРЕВЕСИНЫ,
ВЫЯВЛЯЕМЫЕ МЕТОДОМ НАНОИНДЕНТИРОВАНИЯ С НАЛОЖЕНИЕМ
МАЛОЙ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ОСЦИЛЛИРУЮЩЕЙ НАГРУЗКИ***

В.В. Коренков¹, А.А. Гусев^{1,2}, И.А. Васюкова¹, Ю.И. Головин^{1,3}

¹ Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина, г. Тамбов, Россия

² Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, г. Воронеж, Россия

³ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

Ключевые слова: *наноиндентирование, модуль упругости, модуль потерь, акустическая древесина.*

Помимо прочностных, тепловых, трибологических, биохимических характеристик различных видов древесины зачастую требуется знание и ее акустических свойств (при звукоизоляции помещений, придании им заданных акустических качеств, в создании музыкальных инструментов и т.д.). К настоящему времени не существует общепринятых методов оценки и отбора образцов древесины для акустических применений кроме экспертных оценок качества готового продукта. Поэтому весьма актуальны поиски и адаптация физических методов характеристики древесных и деревосодержащих материалов, планируемых к использованию в качестве акустических. В физическом материаловедении для решения подобных задач широко используют методы внутреннего трения, динамического механического анализа и другие колебательные и акустические подходы. Но они носят макроскопический характер и не позволяют определять необходимые характеристики в нано- и микрошкале размеров структурных элементов сильно гетерогенных материалов (в частности, древесины). Кроме того, эти методы требуют подготовки специальных образцов, вырезанных из массива.

Для характеристики упругих и вязких свойств структурных компонентов различного масштабного уровня (от нано- до макро-) в работе применен модифицированный протокол нагружения и регистрации откликов материала при наноиндентировании, который носит название Continuous Stiffness Measurement (CSM) [1, 2]. Эпизодически метод CSM привлекался для изучения вязкоупругих свойств клеточных стенок древесины [3, 4]. Он предусматривает наложение на основную квазистатическую нагрузку $P(t)$, вызывающую погружение индентора в материал, дополнительных малоамплитудных тестирующих гармонических осцилляций (обычно с амплитудой 2–8 нм и частотой от нескольких десятков до нескольких сотен герц). Синхродетектор непрерывно фиксирует осцилляции приложенной гармонической силы $F(t) = F_0 \sin(\omega t)$ и вызываемых ею осцилляций индентора $h(t) = h_0 \sin(\omega t - \delta)$, а также угол фазового сдвига δ между ними. Программа обработки первичных данных, регистрируемых наноиндентометром, позволяет получить значения комплексного числа жесткости $E^* = E_S + iE_L$ и его компонент – модуля упругости E_S и модуля потерь E_L , а также тангенса угла механических потерь $\tan \delta$ при текущем значении основной нагрузки $P(t)$ [4–6]. Соотношение упомянутых векторов в комплексной плоскости показано на вставке рис. 1, а. Согласно [1, 5],

$$\frac{E_S}{(1-v^2)} = \frac{S\sqrt{\pi}}{2\sqrt{A_c}}, \quad \frac{E_L}{(1-v^2)} = \frac{\omega D\sqrt{\pi}}{2\sqrt{A_c}}, \quad (1)$$

где S – жесткость в контакте индентор – образец; A_c – площадь контакта; ω – круговая частота; D – коэффициент демпфирования; v – коэффициент Пуассона. Отсюда непосредственно вычисляются

$$E_S = (1-v^2) \frac{\sqrt{\pi}}{2\sqrt{A_c}} \frac{|P_0|}{|h_0|} \cos \delta \quad \text{и} \quad E_L = (1-v^2) \frac{\sqrt{\pi}}{2\sqrt{A_c}} \frac{|P_0|}{|h_0|} \sin \delta. \quad (2)$$

В работе исследованы вязкоупругие свойства микроструктуры древесины сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*) столетнего возраста, произраставшей в условиях Центрально-Черноземного региона России. Пробоподготовка поверхности поперечного спила заключалась в высушивании образцов размерами 30×30×10 мм в естественных условиях до влажности 12%, шлифовке поперечного среза и последующем

* Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 21-14-00233) и Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках проекта по соглашению № 075-15-2021-709 о поддержке ЦКП, уникальный идентификатор проекта RF-2296.61321X0037.

удалении приповерхностного слоя микротомом. Наноиндентирование производилось в слой ранней (весенней) и поздней (летней) древесины годового кольца роста, соответствующего 2012 г.

Экспериментальные данные получены на наноиндентометре G200 («Agilent», USA). Возможность исследования разномасштабных структур древесины обеспечивалась широким диапазоном основной квазистатической испытательной нагрузки $P(t)$ с трапециевидальным профилем и P_{\max} от 0.1 до 2000 мН, чему соответствовала область деформации глубиной $h \approx 0.05\text{--}25$ мкм и латеральными размерами $D \approx 7h \approx 1\text{--}100$ мкм.

При малых нагрузках ($P_{\max} < 1$ мН) величина D была значительно меньше толщины клеточной стенки W (обычно $W = 3\text{--}5$ мкм), так что полученные данные относятся к материалу стенки без влияния на них ее границ. При больших нагрузках ($P_{\max} > 100$ мН) в деформацию вовлекалась клеточная архитектура, состоящая из 10–25 клеток. В результате мода деформации менялась, и помимо внутренних свойств материала клеточной стенки большую роль начинала играть потеря устойчивости высокопористой структуры древесины. Эти обстоятельства сближали условия испытания с макроскопическими. Во избежание влияния на процесс деформации и механические свойства объекта дополнительной нагрузки, осциллирующей на частоте $\omega = 300 \text{ с}^{-1}$, цепи обратной связи прибора обеспечивали амплитуду деформации h_0 , вызванной этой нагрузкой, на уровне ~ 2 нм.

Основные результаты испытаний показаны на рис. 1. Из них следует, что пока область необратимой локальной деформации не выходит за пределы клеточной стенки ($D < W$), модуль потерь E_L и коэффициент механических потерь (тангенс угла δ между векторами нагрузки и деформации) имеют большую величину. В пределах погрешности измерений они неразличимы для ранней и поздней древесины. При большой нагрузке и латеральном размере области локальной деформации возникает разница между ними, достигающая нескольких крат. Модуль упругости E_S как ранней, так и поздней древесины меняется с ростом D несколько слабее и немонотонно. Также, будучи неразличимы при $D < 1$ мкм, они падают в несколько раз при $D > 100$ мкм и начинают существенно различаться. Совокупность этих данных говорит о схожести структуры и вязкоупругих свойств материала клеточных стенок в слоях ранней и поздней древесины и смене моды необратимой деформации при увеличении нагрузки и вовлечении в деформацию большого ансамбля клеток, что сближает условия тестирования с макроскопическими. При этом ранняя древесина демонстрирует гораздо более сильный размерный эффект в вязкоупругих характеристиках, чем поздняя.

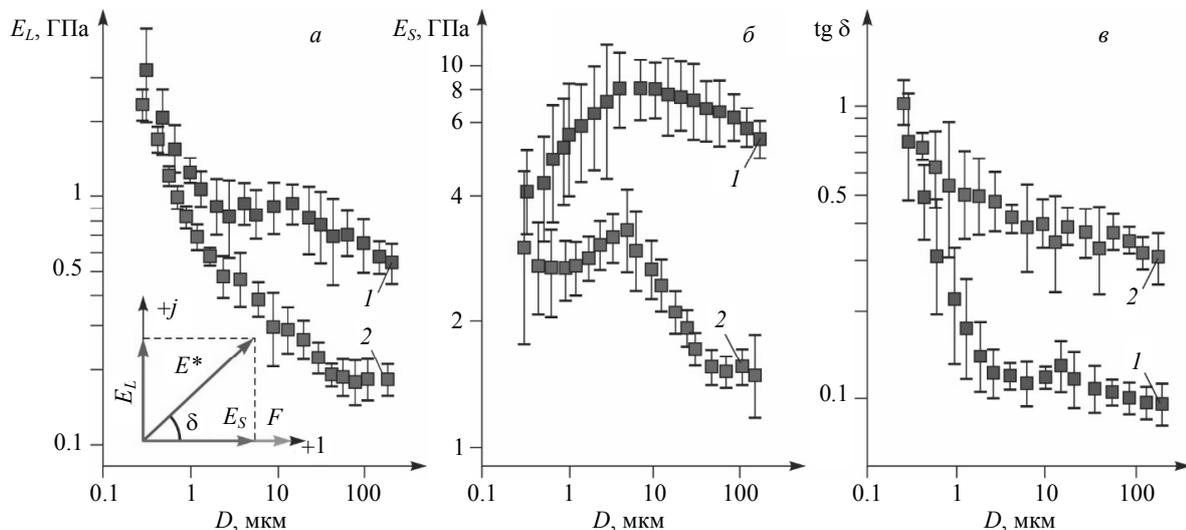


Рис. 1. Зависимость модуля потерь E_L (а), модуля упругости E_S (б) и коэффициента (тангенса угла) механических потерь $\text{tg} \delta$ (в) от латеральных размеров D области локальной необратимой деформации в сосне обыкновенной (*Pinus sylvestris*): 1 – поздняя древесина, 2 – ранняя древесина

Таким образом, описанный подход и полученные данные могут быть использованы для объективного количественного обоснования выбора древесины для акустических приложений, а также управляемого выращивания и модифицирования древесины в целях придания ей желаемых демпфирующих и звукопоглощающих характеристик путем регулирования клеточной структуры и долей ранней и поздней древесины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Li X., Bhushan B. // Mater. Characterization. – 2002. – V. 48. – P. 11–36. – DOI: 10.1016/S1044-5803(02)00192-4.
2. Головин Ю. И. // ФТТ. – 2021. – Т. 63. – № 1. – С. 3–42. – DOI: 10.21883/FTT.2021.01.50395.171.
3. Tze W.T.Y., Wang S., Rials T.G., et al. // Composites: Part A. – 2007. – V. 38. – P. 945–953. – DOI: 10.1016/J.COMPOSITESA.2006.06.018.

4. Zhang T., Bai S.L., Zhang Y.F., Thibaut B. // Wood Sci. Technol. – 2012. – V. 46. – P. 1003–1016. – DOI: 10.1007/s00226-011-0458-3.
5. Oyen M.L., Cook R.F. // J. Mech. Behav. Biomed. Mater. – 2009. – V. 2. – P. 396–407. – DOI: 10.1016/j.jmbbm.2008.10.002.
6. Jakes J.E., Stone D.S. // Forests. – 2021. – V. 12. – P. 1696. – DOI: 10.3390/f12121696.

Поступило в редакцию 23.09.2022,
принято в печать 24.10.2022.

Коренков Виктор Васильевич, к.ф.-м.н., ведущ. специалист НИИ «Нанотехнологии и наноматериалы» ТГУ им. Г.Р. Державина, e-mail: ya.vikkor@yandex.ru;

Гусев Александр Анатольевич, д.б.н., директор НИИ экологии и биотехнологии ТГУ им. Г.Р. Державина, гл. науч. сотр. Научно-методического центра ВГЛТУ им. Г.Ф. Морозова, e-mail: nanosecurity@mail.ru;

Васюкова Инна Анатольевна, к.б.н., ведущ. специалист НИИ «Нанотехнологии и наноматериалы» ТГУ им. Г.Р. Державина, e-mail: vasyukovaia@gmail.com;

Головин Юрий Иванович, д.ф.-м.н., директор НИИ «Нанотехнологии и наноматериалы» ТГУ им. Г.Р. Державина, профессор кафедры физической энзимологии МГУ им. М.В. Ломоносова, e-mail: nano@tsutmb.ru.