

15

Связь механических свойств анизотропных материалов с их теплофизическими характеристиками на примере древесины сосны

© Ю.И. Головин^{1,2}, А.И. Тюрин¹, Д.Ю. Головин¹, А.А. Самодуров¹, И.А. Васюкова¹¹ Научно-исследовательский институт „Нанотехнологии и наноматериалы“ Тамбовского государственного университета им. Г.Р. Державина, Тамбов, Россия² Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

E-mail: yugolovin@yandex.ru

Поступило в Редакцию 17 сентября 2020 г.

В окончательной редакции 9 октября 2020 г.

Принято к публикации 12 октября 2020 г.

На примере древесины сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L) экспериментально выявлена взаимосвязь механических свойств анизотропных материалов и их теплофизических характеристик. С помощью измерений твердости и главных компонент тензора температуропроводности на трех срезах (нормальном к волокнам, тангенциальном и радиальном) при различной влажности древесины показано, что эта связь может быть описана линейными функциями. Это дает возможность провести экспресс-оценку механических свойств анизотропных материалов, требующих в норме трудоемких и материалоемких разрушающих испытаний, путем бесконтактного неразрушающего определения его теплофизических характеристик методом динамической термографии.

Ключевые слова: механические свойства, твердость, коэффициент температуропроводности, динамическая термография.

DOI: 10.21883/PJTF.2021.02.50546.18550

Известно, что вследствие схожей чувствительности к микроструктуре некоторые механические свойства материалов могут быть связаны простыми соотношениями. Так, в пластичных металлах твердость H зависит от предела текучести как $H \approx 3\sigma_y$, а в твердых и сверхтвердых — от модуля сдвига G как $H \approx 0.15G$ [1]. Есть основания полагать, что подобные связи или корреляции можно обнаружить также между механическими и теплофизическими характеристиками (ТФХ) различных материалов, в частности анизотропных композиционных. В случае выявления подобных зависимостей трудоемкие и материалоемкие разрушающие механические испытания можно заменить (хотя бы в целях экспресс-оценки механических свойств, сортировки, разбраковки материалов и готовых изделий) на определение их ТФХ неразрушающими экспресс-методами, описанными в [2]. В среднем они требуют ~ 1 мин на одно измерение и не нуждаются в вырезке из массива образцов определенной формы и размеров.

В обширной литературе имеются данные о механических и тепловых свойствах искусственных армированных волокнами композитов [3–5], древесины [6–10] и слоистых материалов на ее основе [11], а также композитов с природными органическими волокнами [12]. В них сведения о механических и тепловых свойствах получены в независимых экспериментах и не сопоставляются друг с другом, за исключением нескольких работ, в которых методами тепловой дефектоскопии оценивались различные структурные повреждения в композитах [13–16] и их возможное влияние на прочность.

В настоящей работе на примере естественного волокнистого композитного материала — древесины сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L), не содержащей видимых дефектов строения и механических повреждений (сучков, свилеватости, глазков, расслоений, трещин и т.п.), но обладающей явной анизотропией ТФХ и механических свойств, — исследована зависимость твердости по Бринеллю (НВ) от компонент тензора температуропроводности (a_{ij}). Помимо того, что древесина сосны является хорошей моделью анизотропного композита, она представляет собой самый распространенный древесный строительный материал. Конечной целью работы являлось установление корреляции между НВ и a_{ij} на основании данных термографического анализа древесины сосны различной влажности.

Измерение компонент тензора температуропроводности $a_{ij} = \lambda_{ij}/\rho C_p$ (здесь λ_{ij} — компоненты тензора теплопроводности, ρ — плотность материала, C_p — удельная теплоемкость при постоянном давлении) было проведено запатентованными нами неразрушающими термографическими методами [17,18], не требующими вырезки образцов определенной формы и размеров из массива. Определение главных компонент тензора a_{ij} проводилось путем анализа динамических термограмм на поперечном и продольных латеральном и радиальном срезах (рис. 1, а) образцов древесины сосны различной влажности. „Точечный“ нагрев избранной грани образца осуществлялся сфокусированным пучком твердотельного лазера с диодной накачкой LSR445CP-FC-10W (гауссов радиус пучка на нагреваемой поверхности составлял $r_0 = 0.1–0.3$ mm). Прямоугольный импульс излучения

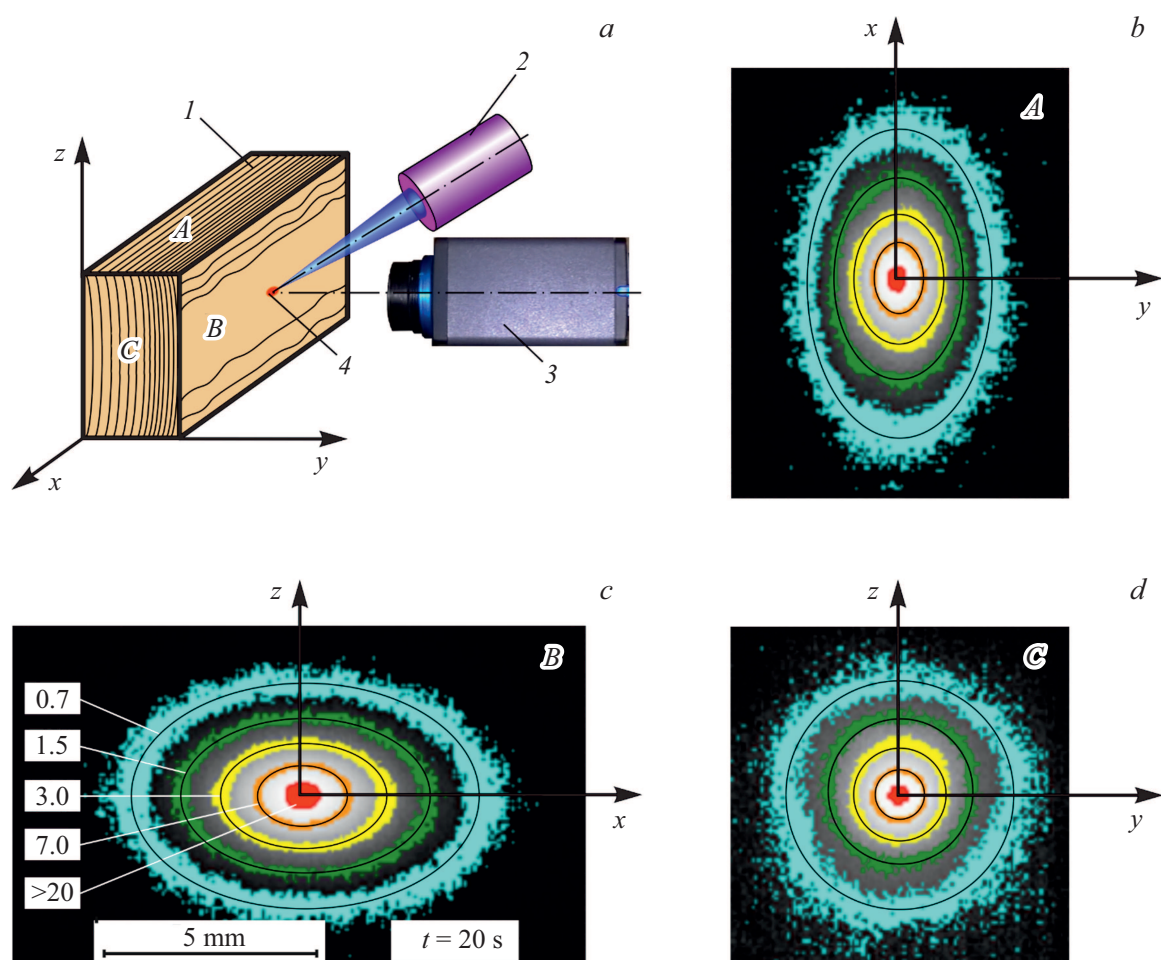


Рис. 1. Схема эксперимента по определению ТФХ (а) и термограммы для древесины (сухая сосна) на гранях А, В и С: вдоль волокон радиально (b), вдоль волокон тангенциально (c) и поперек волокон (d). 1 — образец, 2 — лазер, 3 — тепловизор, 4 — пятно нагрева. Изотермы показаны в виде цветных (см. электронную версию статьи) замкнутых линий. Цифры на изотермах обозначают температуру перегрева относительно комнатной: 0.7 ± 0.1 , 1.5 ± 0.1 , 3.0 ± 0.5 , 7 ± 1 и $> 20^\circ\text{C}$; t — время от начала нагрева.

имел длительность 30–60 s, а регулируемая мощность составляла 1–10 W. Динамическое температурное поле на поверхности образца в области радиусом $(10-20)r_0$, в которой происходило распространение тепла от точки нагрева (размеры образцов во всех трех измерениях намного превосходили радиус этой области и не влияли на результаты измерений), кинофильмировали с частотой 10–60 fps с помощью тепловизора FLIR-A35sc. Затем каждый кадр динамической термограммы (примеры обработанных термограмм на трех протестированных поверхностях по данным отдельных выбранных кадров показаны на рис. 1, b–d) был подвергнут компьютерной обработке по разработанным оригинальным моделям и алгоритмам [2,19–21]. Их особенностью является учет всего объема информации, содержащегося в каждом пикселе отснятого фильма. Математическая модель и алгоритм извлечения данных о компонентах тензора a_{ij} из термограмм принципиально не отличались от описанных в [2,19–21], разработанных для изотропных

тел. Анизотропия материала учитывалась в ортотропном приближении путем замены скалярных коэффициентов теплопереноса на диагональные компоненты тензора второго ранга.

Твердость по Бринеллю НВ измерялась стандартным методом на трех гранях образца керамическим шариком диаметром 12.5 mm, вдавливаемым до глубины около 3 mm.

На рис. 2 показаны зависимости от влажности W главных компонент тензора температуропроводности a_{ii} и твердости НВ на трех поверхностях (А, В и С) параллелепипеда. Абсолютные и относительные значения a_{ii} по-разному зависели от W на различных срезах и направлениях в образце. Так, компонента тензора a_{xx} вдоль волокон существенно зависела от W , а компоненты тензора a_{yy} и a_{zz} поперек волокон практически не зависели от влажности. Еще более очевидным образом эти особенности проявляются для относительных значений главных компонент тензора a_{ii} .

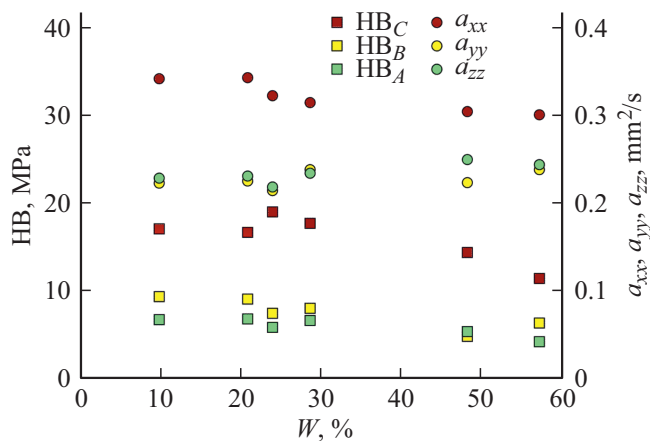


Рис. 2. Зависимости прочностных (HV) и теплофизических (a_{xx} , a_{yy} , a_{zz}) свойств от влажности W для древесины сосны. HV_A , HV_B , HV_C — значения макротвердости для разных граней (A , B и C , см. рис. 1, a) образца; a_{xx} , a_{yy} , a_{zz} — компоненты тензора температуропроводности по разным направлениям (x , y и z , см. рис. 1, a) в исследуемом образце.

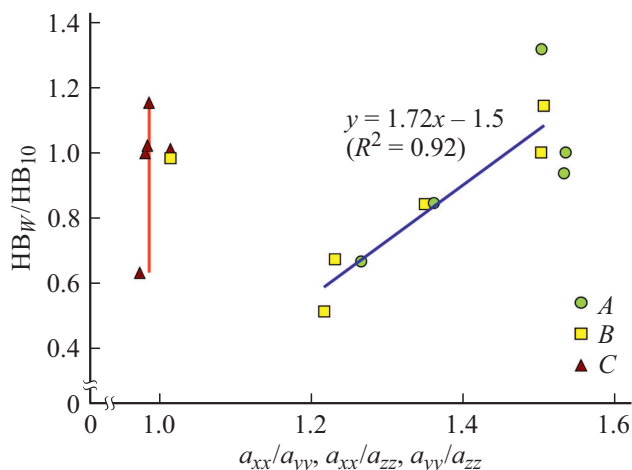


Рис. 3. Зависимости прочностных свойств (HV_W/HV_{10}) древесины сосны от ее теплофизических характеристик (a_{ii}/a_{jj}): a_{xx} , a_{yy} , a_{zz} , a_{xx}/a_{yy} , a_{xx}/a_{zz} и a_{yy}/a_{zz} — компоненты тензора температуропроводности и коэффициенты анизотропии теплопроводности по разным направлениям (x , y и z , см. рис. 1, a) в исследуемом образце, HV_W/HV_{10} — значения макротвердости для разных граней (A , B и C , см. рис. 1, a) образца, нормированные на твердость при влажности 10% (HV_{10}).

Зависимости твердости HV_W латерального и радиального сечения, нормированные на твердость HV_{10} при $W = 10\%$, от коэффициента анизотропии были статистически неразличимы (рис. 3) и их можно аппроксимировать общей линейной функцией ($HV_W/HV_{10} = 1.72(a_{yy}/a_{xx}) - 1.5$ при $R^2 = 0.92$). Твердость вдоль волокон не зависела от отношений главных компонент тензора a_{ii} (вертикальная линия на рис. 3), что может использоваться для калибровки метода и аппаратуры.

Таким образом, полученные результаты дают основание полагать, что после проведения систематических исследований существует возможность установить достоверную и надежную взаимосвязь влажности и твердости (а впоследствии и прочности) древесины различных пород с температуропроводностью, бесконтактно измеряемой разработанными нами экспресс-методами динамической термографии. В перспективе это позволит оценивать механические характеристики анизотропных материалов путем неразрушающего и бесконтактного определения ТФХ.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 20-19-00602 (разработка аналитических и компьютерных моделей, проведение эксперимента и обработка данных по определению теплофизических характеристик) и гранта ТГУ им. Г.Р. Державина (определение физико-механических свойств) с привлечением оборудования НИИ „Нанотехнологии и наноматериалы“ и ЦКП Тамбовского государственного университета им. Г.Р. Державина.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] *Handbook of mechanics of materials*, ed. by C.-H. Hsueh, S. Schmauder, C.-S. Chen, K.K. Chawla (Springer Singapore, 2019). <https://www.springer.com/gp/book/9789811068836>
- [2] Д.Ю. Головин, А.И. Тюрин, А.А. Самодуров, А.Г. Дивин, Ю.И. Головин, *Динамические термографические методы неразрушающего экспресс-контроля* (ТЕХНОСФЕРА, М., 2019).
- [3] D. Hull, T.W. Clyne, *An introduction to composite materials* (Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2019). DOI: 10.1017/CBO9781139170130
- [4] C. Luan, S. Movva, K. Wang, X. Yao, C. Zhang, B. Wang, *Functional Composites Struct.*, **1**, 042002 (2019). DOI: 10.1088/2631-6331/ab47f9
- [5] D.K. Rajak, D.D. Pagar, P.L. Menezes, E. Linul, *Polymers*, **11**, 1667 (2019). DOI: 10.3390/polym11101667
- [6] N.J.M. Hassani, *Physical and mechanical properties of wood* (2016). <https://forestry.oxfordjournals.org/physical-and-mechanical-properties-of-wood>
- [7] D.E. Kretschmann, *Mechanical properties of wood*, in: *General technical report FPL-GTR-190* (2010), ch. 5. https://www.fpl.fs.fed.us/documnts/fplgtr/fplgtr190/chapter_05.pdf
- [8] F.J. Madruga, S. Sfarra, S. Perilli, E. Pivarciová, J.M. López-Higuera, *Sensors*, **20**, 316 (2020). DOI: 10.3390/s20010316
- [9] D. Vidal, R. Pitarma, *Agriculture*, **9**, 156 (2019). DOI: 10.3390/agriculture9070156
- [10] R.R.N. Mvondo, P. Meukam, J. Jeong, D.De Sousa Meneses, E.G. Nkeng, *Results Phys.*, **7**, 2096 (2017). DOI: 10.1016/j.rinp.2017.06.025

- [11] L. Edgars, Z. Kaspars, K. Kaspars, *Procedia Eng.*, **172**, 628 (2017). DOI: 10.1016/j.proeng.2017.02.073
- [12] K.L. Pickering, M.G.A. Efendy, T.M. Le, *Composites A*, **83**, 98 (2016). DOI: 10.1016/j.compositesa.2015.08.038
- [13] C. Meola, C. Toscano, *Materials*, **7**, 1483 (2014). DOI: 10.3390/ma7031483
- [14] D. Palumbo, P. Cavallo, U. Galietti, *NDT & E Int.*, **102**, 254 (2019). DOI: 10.1016/j.ndteint.2018.12.011
- [15] J. Guo, X. Gao, E. Toma, U. Netzelmann, *NDT & E Int.*, **91**, 1 (2017). DOI: 10.1016/j.ndteint.2017.05.004
- [16] W. Adamczyk, Z. Ostrowski, A. Ryfa, *Measurement*, **165**, 108078 (2020). DOI: 10.1016/j.measurement.2020.108078
- [17] Ю.И. Головин, А.И. Тюрин, Д.Ю. Головин, А.А. Самодуров, *Способ определения кинетических теплофизических свойств твердых материалов*, патент на изобретение RU 2701775 от 02.10.2019.
- [18] Ю.И. Головин, А.А. Самодуров, А.И. Тюрин, Д.Ю. Головин, Э.А. Бойцов, *Устройство для бесконтактного определения теплофизических свойств твердых тел*, патент на изобретение RU 2701881 от 02.10.2019.
- [19] D.Yu. Golovin, A.G. Divin, A.A. Samodurov, A.I. Tyurin, Yu.I. Golovin, *Temperature diffusivity measurement and nondestructive testing requiring no extensive sample preparation and using stepwise point heating and IR thermography, in Failure analysis* (InTech, London, UK, 2019), p. 124–160. DOI: 10.5772/intechopen.88302
- [20] Д.Ю. Головин, А.Г. Дивин, А.А. Самодуров, А.И. Тюрин, Ю.И. Головин, *Инж.-физ. журн.*, **93** (1), 240 (2020). DOI: 10.1007/s10891-020-02113-8
- [21] Д.Ю. Головин, А.И. Тюрин, А.А. Самодуров, Ю.И. Головин, *Письма в ЖТФ*, **46** (1), 39 (2020). DOI: 10.21883/PJTF.2020.01.48863.18052