

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ДРЕВЕСИНЕ

ANALYSIS OF METHODS FOR MEASURING INTERNAL STRESSES IN WOOD

Хворых А.М., аспирант, преподаватель СПО, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия
Khvorykh A.M., Postgraduate student, College teacher, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Аннотация. В статье рассматриваются современные методы измерения внутренних (остаточных) напряжений в древесине. Представлена классификация методов на разрушающие и неразрушающие, описан их принцип действия, преимущества и ограничения. Особое внимание уделяется применению ультразвуковых, рентгеновских и оптических технологий. Выполнен сравнительный анализ методов по точности, доступности и применимости к различным видам древесины. Отмечены перспективные направления развития методик контроля внутренних напряжений в древесных материалах.

Ключевые слова: внутренняя напряжённость древесины, остаточные напряжения, методы измерения, анизотропия, неразрушающие испытания, механические свойства древесины.

Abstract. This paper reviews current methods for measuring internal (residual) stresses in wood. The methods are classified into destructive and non-destructive categories, with descriptions of their operating principles, advantages, and limitations. Special attention is given to ultrasonic, X-ray, and optical techniques. A comparative analysis is presented regarding the accuracy, accessibility, and applicability of each method to different types of wood. Promising directions for the development of stress measurement techniques in wooden materials are also highlighted.

Keywords: internal stresses in wood, residual stresses, measurement methods, anisotropy, non-destructive testing, mechanical properties of wood.

Внутренние (остаточные) напряжения в древесине возникают и накапливаются на различных стадиях жизненного цикла материала [1]. На этапе роста деревьев неоднородность биологических процессов проявляется в переменной толщине и плотности годовых колец: ранние кольца, образованные весенним ростом клеток, имеют более низкую плотность и большую пористость, в то время как поздние кольца, образовавшиеся в конце сезона, отличаются повышенным содержанием плотных слоев целлюлозы и лигнина. Такая неоднородность ведёт к возникновению начальных полей напряжений в ядре и заболони: разница в объёме клеток и скорости роста создаёт напряжения смятия и растяжения, сосредотачивающиеся в зонах перехода между кольцами. При спиле ствола и формировании круглого бревна концентрические напряжения перераспределяются в ответ на изменение

формы и сечения заготовки. Геометрические дефекты, такие как сучки, места почечных рубцов и изменения кривизны волокон, нарушают симметрию поля, что приводит к локальным концентрациям напряжений. Эти макроструктурные напряжения могут быть оценены по величине упругих деформаций, возникающих при освобождении материала от окружающих его слоёв. В технологических процессах, особенно в сушке древесины, анизотропия клеточной структуры приобретает ключевое значение. Под действием тепла и пониженной влажности ранние слои усыхают быстрее, чем поздние, что формирует радиальный градиент усушки до 2-4 % [2, 3]. В результате внутренние напряжения могут достигать порядка нескольких МПа, что при превышении локальной прочности вызывает образование микротрещин и «внутренних расколов» [4]. Эти дефекты часто скрыты в глубине бруса и становятся заметными лишь при дополнительной обработке или эксплуатации, что критично для ответственных конструкций [5]. Микроструктурные причины напряжений связаны с неравномерным распределением упругих характеристик составляющих клеточных стенок: связующие вещества (лигнин, гемицеллюлозы) обладают более низкой упругостью по сравнению с целлюлозными микрофибриллами. При изменении влажности сначала происходит упругое «сжатие» полимерной матрицы, а затем более жесткие целлюлозные фибриллы ограничивают деформацию, создавая сложные локальные поля растяжения и сжатия. Это взаимодействие неоднородных фаз древесины приводит к формированию как объёмных, так и поверхностных напряжений, которые определяют последующую реакцию образца на механические воздействия и условия эксплуатации.

Разрушающие методы измерения внутренних напряжений основаны на локальном освобождении напряжённого состояния и регистрации возникающих при этом деформаций [3]. Так, метод расщепления предполагает вырезание в образце двузубой прорези глубиной 20-30 мм и дальнейшее удаление центрального сегмента: после этого зубцы слегка раздвигаются, и по величине их симметричного раскрытия Δu [6, 7], измеренного микрометром или оптическим датчиком, оценивают напряжение по формуле:

$$\sigma_r = \frac{E}{2L} \Delta u, \quad (1)$$

где E – модуль упругости древесины, L – длина зубца.

При сверлильном методе на поверхность образца наклеивают тензодатчики «моста Уитстона», сверлят отверстие диаметром 2-3 мм и по изменению деформации $\Delta \varepsilon$ в датчиках рассчитывают напряжение через

$$\sigma_r = k \Delta \varepsilon, \quad (2)$$

где k – калибровочный коэффициент, учитывающий геометрию зоны сверления. Если сверление повторить на нескольких глубинах (обычно с шагом 2-5 мм), то по зависимости $\Delta \varepsilon(h)$ строят подробный профиль $\sigma_r(h)$ вдоль радиуса.

Ещё один распространённый приём – послойное шлифование, когда шлифовальным кругом снимают слой древесины толщиной 0,5-1 мм и измеряют изгиб балочного образца или прогиб $w(t)$ оставшейся части; среднее напряжение $\sigma(t)$ при этом вычисляют по формуле

$$\sigma_{\text{mean}}(t) = \frac{E w(t)}{6t}, \quad (3)$$

где t – толщина образца после каждого шага. Ключевым условием точности всех разрушающих методов является строгое соблюдение геометрии заготовки и стабильный уровень влажности (изменения не более 1 %) [8] – иначе объёмная усушка или колебания влажности приведут к систематическим погрешностям. Погрешность данных техник составляет в среднем 5-10 %, а основной ограничивающий фактор – невозможность повторного использования образца после измерений.

Неразрушающие методы измерения внутренних напряжений в древесине позволяют сохранить образец и многократно проводить испытания. Так, в ультразвуковой диагностике [4] два пьезоэлектрических преобразователя (передатчик и приёмник) устанавливают на расстоянии d друг от друга, генерируют импульс с частотой ~ 100 кГц [9] и измеряют время пролёта t_p , по которому рассчитывают скорость волны

$$v = \frac{d}{t_p}, \quad (4)$$

а изменение полей напряжений выявляют по затуханию

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln \frac{A_0}{A}, \quad (5)$$

и по относительному изменению скорости $\Delta v/v_0 \propto \sigma_r/E$.

Оптическая спекл-интерферометрия (ESPI) основывается на анализе фазового сдвига между опорным и измерительным лучами лазера ($\lambda \approx 532$ нм) по четырёхкадровой схеме.

$$\Delta\phi(x, y) = \arctan \frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3}, \quad u(x, y) = \frac{\lambda}{4\pi} \frac{\Delta\phi(x, y)}{\cos \theta}, \quad (6)$$

где $I_1 - I_4$ – интенсивности кадров; θ – угол падения. ESPI чувствительна к микроперемещениям (до десятков нанометров) [10] и требует полированной поверхности и виброизоляции.

Фотоэластические методы используют полимерный шлиф, проявляющий двойное лучепреломление; по числу интерференционных полос N определяют разность главных напряжений

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{N f_\sigma}{t}, \quad (7)$$

где f_σ – фотоэластичный коэффициент; t – толщина слоя. Точность – около 5-7 %.

В рентгеноструктурном анализе коллимированный рентген или синхротронный пучок ($\lambda \approx 0,1 - 0,2$ Å) даёт дифракционные пики, смещение которых позволяет вычислить межплоскостное расстояние d по закону Брэгга:

$$2d \sin \theta = n\lambda, \quad (8)$$

а упругую деформацию и напряжение по формулам:

$$\varepsilon = \frac{d - d_0}{d_0}, \quad \sigma = E\varepsilon. \quad (9)$$

Этот метод обеспечивает наивысшую точность (2-3 %) и даёт возможность микроуровневого анализа структуры, но требует сложного оборудования и подготовки образцов.

Во всех неразрушающих техниках критическими являются стабильность влажности (± 1 %), тщательная полировка поверхности ($Ra \leq 0,5$ мкм для ESPI и ≤ 5 мкм для ультразвука)

и квалификация оператора, что вместе с портативностью оборудования определяет их применимость – от полевых замеров ультразвуком до лабораторных исследований ESPI и рентгеноструктурного анализа.

Сравнение описанных методов измерения внутренних напряжений в древесине по нескольким критериям представлено в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнение параметров различных методов измерения внутренних напряжений в древесине

Критерий	Разрушающие	Ультразвук и фотоэластика	ESPI	Рентген
Точность	5-10 %	8-12 %	≈ 5 %	2-3 %
Сохранность образца	Полное разрушение, 1 измерение	Неразрушающие, многократные	Неразрушающие, многократные	Неразрушающие, многократные
Экономика	20-30 тыс. руб. (сверла + датчики)	100-150 тыс. руб.	от 500 тыс. руб.	миллионы руб.
Применимость	Универсальны, разрушают образец	Требуют полированной поверхности, квалификации оператора	Требуют полированной поверхности, лабораторные условия	Требуют полированной поверхности, лабораторные условия

Сравнительный анализ показывает, что по точности измерений наивысшие результаты даёт рентгеноструктурный анализ (погрешность 2-3 %), за ним следует оптическая спекл-интерферометрия ESPI (около 5 %), тогда как ультразвуковые и фотоэластические методы обеспечивают точность в диапазоне 8-12 %. Разрушающие методы остаются достаточно точными (5-10 %), но при этом образец теряет возможность многократного использования.

Неразрушающие методы (ультразвук, ESPI, фотоэластика и рентген) позволяют проводить повторные измерения без серьёзных повреждений материала, однако требуют более тщательной подготовки образцов (полированная поверхность, стабильная влажность) и высокой квалификации оператора. Чисто лабораторными (по условиям применения) методами являются ESPI и рентгеноструктурный анализ, тогда как ультразвуковые и фотоэластические технологии при наличии портативного оборудования могут использоваться и в полевых, и в производственных условиях.

С точки зрения затрат, самые доступные решения – это наборы сверл и тензодатчиков для разрушающих методов (примерно 20-30 тыс. рублей). Ультразвуковые и фотоэластические станции требуют уже 100-150 тыс. рублей, а портативные ESPI-системы стоят от 500 тыс. рублей. Наибольшие капитальные вложения требуют рентгеноструктурные комплексы – стоимость оборудования измеряется миллионами рублей.

Таким образом, выбор метода измерения внутренних напряжений в древесине определяется компромиссом между требуемой точностью, сохранностью образца, условиями применения и бюджетом. Для оперативного контроля на производстве подойдут ультразвук

или фотоэластика, в лабораторных исследованиях при жёстких требованиях к точности предпочтительнее ESPI или рентген, а разрушающие методы остаются универсальным и относительно недорогим решением для одноразовых испытаний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tree Growth Stress and Related Problems / J. Gril, D. Jullien, S. Bardet, H. Yamamoto // *Journal of Wood Science*. – 2017. – Vol. 63, No. 5. – P. 411-432. – DOI: 10.1007/s10086-017-1639-y.
2. Уголев, Б.Н. Деформационные свойства древесины и напряжения при сушке / Б.Н. Уголев. – Москва: Лесная промышленность, 1971. – 176 с.
3. Evaluation of moisture-induced stresses in wood cross-sections determined with a time-dependent, plastic material model during long-time exposure / S. Pech, M. Autengruber, M. Lukacevic, R. Lackner, J. Füssl // *Buildings*. – 2024. – Vol. 14, No. 4. – Art. No. 937. – DOI: 10.3390/buildings14040937.
4. Simpson, W.T. Dry Kiln Operator's Manual / W.T. Simpson. – Madison: USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, 1991. – 274 p.
5. Yin, Q. Drying stress and strain of wood: a review / Q. Yin, H.-H. Liu // *Applied Sciences*. – 2021. – Vol. 11, No. 11. – Frt. No. 5023. – DOI: 10.3390/app11115023.
6. Determination of residual stress in bonded wood components / M. Scheffler, T. Weber, P. Niemz, H.-J. Hardtke // *Holzforschung*. – 2007. – Vol. 61, No. 3. – P. 285-290. – DOI: 10.1515/HF.2007.065.
7. Unique characteristics of residual stress distribution of large-diameter keyaki (*Zelkova serrata*) logs and examination of their measurement method / M. Matsuo-Ueda, H. Yamamoto [et al.] // *Journal of Wood Science*. – 2023. – Vol. 69, Art. No. 16. – DOI: 10.1186/s10086-023-02088-z.
8. Кондратьев, Ю.Н. Влияние кондиционирующей обработки на внутренние остаточные напряжения в высушенных пиломатериалах / Ю.Н. Кондратьев // *Известия высших учебных заведений. Лесной журнал*. – 1974. – № 1. – С. 83–84.
9. Ross, R.J. Nondestructive Evaluation of Wood: Second Edition / R.J. Ross. – Madison : USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, General Technical Report, FPL-GTR-238, 2015. – 176 p.
10. Bucur, V. Nondestructive Characterization and Imaging of Wood / V. Bucur. – Berlin : Springer, 2003. – 368 p.

REFERENCES

1. Tree Growth Stress and Related Problems / J. Gril, D. Jullien, S. Bardet, H. Yamamoto // *Journal of Wood Science*. – 2017. – Vol. 63, No. 5. – P. 411-432. – DOI: 10.1007/s10086-017-1639-y.
2. Ugolev, B.N. Deformation properties of wood and stress during drying / B.N. Ugolev. – Moscow: Lesnaya Promyshlennost, 1971. – 176 p.
3. Evaluation of moisture-induced stresses in wood cross-sections determined with a time-dependent, plastic material model during long-time exposure / S. Pech, M. Autengruber, M. Lukacevic, R. Lackner, J. Füssl // *Buildings*. – 2024. – Vol. 14, No. 4. – Art. No. 937. – DOI: 10.3390/buildings14040937.

4. Simpson, W.T. Dry Kiln Operator's Manual / W.T. Simpson. – Madison: USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, 1991. – 274 p.
5. Yin, Q. Drying stress and strain of wood: a review / Q. Yin, H.-H. Liu // Applied Sciences. – 2021. – Vol. 11, No. 11. – Frt. No. 5023. – DOI: 10.3390/app11115023.
6. Determination of residual stress in bonded wood components / M. Scheffler, T. Weber, P. Niemz, H.-J. Hardtke // *Holzforschung*. – 2007. – Vol. 61, No. 3. – P. 285-290. – DOI: 10.1515/HF.2007.065.
7. Unique characteristics of residual stress distribution of large-diameter keyaki (*Zelkova serrata*) logs and examination of their measurement method / M. Matsuo-Ueda, H. Yamamoto [et al.] // *Journal of Wood Science*. – 2023. – Vol. 69, Art. No. 16. – DOI: 10.1186/s10086-023-02088-z.
8. Kondratiev, Yu.N. Effect of conditioning treatment on internal residual stresses in dried lumber / Yu.N. Kondratiev // *News of higher educational institutions. Forestry magazine*. – 1974. – No. 1. – P. 83-84.
9. Ross, R.J. Nondestructive Evaluation of Wood: Second Edition / R.J. Ross. – Madison : USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, General Technical Report, FPL-GTR-238, 2015. – 176 p.
10. Bucur, V. Nondestructive Characterization and Imaging of Wood / V. Bucur. – Berlin : Springer, 2003. – 368 p.