

УДК 691.113, 624.048, 674.051

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ СВЕРЛЕНИЮ НА НЕКОТОРЫЕ ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДРЕВЕСИНЫ СОСНЫ (*Pinus sylvestris* L.)

А. С. КОРОЛЕВ, Е. С. ШАРАПОВ, С. В. ШЛЫЧКОВ

Поволжский государственный технологический университет
Йошкар-Ола, Россия

UDC 691.113, 624.048, 674.051

EFFECT OF DRILING RESISTENS MEASUREMENTS ON SOME RESIDUAL STRENGTH PROPERTIES OF SCOTS PINE (*Pinus sylvestris* L.)

A. S. KOROLEV, E. S. SHARAPOV, S. V. SHLICHKOV

Аннотация. Метод измерения сопротивления сверлению активно внедряется в область неразрушающего контроля физико-механических свойств и внутреннего состояния древесины, элементов деревянных конструкций. Вместе с тем отверстия диаметром 3 мм в материале могут оказывать значительное влияние на прочностные и эксплуатационные характеристики элементов конструкций. На основании конечно-элементного моделирования и проведенных испытаний образцов древесины сосны на статический изгиб и сжатие рекомендуется использовать метод измерения сопротивления сверлению для оценки качества конструкционного материала, находящегося под изгибающей нагрузкой, в нейтральном слое или по направлению внешней изгибающей нагрузки. Результативность программного моделирования для прогнозирования разрушения деревянных балок с отверстиями ограничено ввиду концентрации напряжений вокруг отверстий. Влияние отверстий на прочность элементов деревянных конструкций, работающих на сжатие, незначительно и пропорционально уменьшению поперечного сечения образца.

Ключевые слова: обследование зданий и сооружений из древесины, неразрушающая диагностика, моделирование свойств древесины, статический изгиб, сжатие.

Abstract. The drilling resistance (DR) measurement method is used extensively for nondestructive testing and evaluation of physical, mechanical properties and internal condition of wood and structural timber. At the same time, holes with a diameter of 3 mm in the material can have a significant impact on the residual strength and service conditions of structural timber elements. Scots pine specimens with holes (after DR measurements) were simulated and tested in static bending and compression. DR measurements had negligible effect when applied in neutral layers or in the direction of the external bending load. Application of the software simulation for prediction strength properties of wooden elements with holes is limited due to the stress concentration around the holes. Effect of holes on residual compression strength was minor and proportional to the cross-section loss.

Keywords: in-situ assessment of structural timber, nondestructive testing and evaluation, wood behavior simulation, wood bending, wood compression.

Введение. Одним из распространенных на сегодняшний день неразрушающих методов определения свойств и внутреннего состояния древесины в деревянных строительных конструкциях является метод измерения сопротивления сверлению [3, 5, 6, 9]. Метод основан на определении необходимой мощности для просверливания древесины с помощью мобильных устройств, оснащенных тонкими буровыми сверлами диаметром 3 мм. Ведущие позиции на

рынке по продажам устройств данного типа занимают две германские компании: IML System GmbH (рис. 1, а) и Rinntech-Metriwerk GmbH & Co (рис. 1, б).



Рис. 1. Устройства для измерения сопротивления сверления древесины: IML-Resi PD 400 (<https://www.iml.de/>) и Resistograph R650 (<http://rinntech.de/>)

После проведения измерений в древесине остаются отверстия, являющиеся концентраторами напряжений [4], которые могут оказывать значимое влияние на несущую способность элементов деревянных строительных конструкций. Следует отметить, что современные деревянные здания и сооружения проектируются с учетом прокладки необходимых инженерных коммуникаций в элементах конструкций [7]. Размеры, формы и расположение отверстий при этом регламентируются отечественными и международными стандартами и сводами правил, такими как DIN 1052:2004–08, DIN EN 1995-1-1/NA:2010, СП 31-105–2002. Вместе с тем отмеченные в нормативных документах рекомендации не касаются отверстий незначительного диаметра, образующихся в результате использования метода измерения сопротивления сверлению.

Целью данного исследования являлось определение влияния отверстий при использовании метода измерения сопротивления сверлению на прочностные характеристики древесины сосны (*Pinus sylvestris* L.) при статическом изгибе и сжатии поперек волокон в тангенциальном направлении.

Материалы и методы. В качестве объекта исследования была выбрана древесина сосны, которая является основным строительным материалом для возведения несущих каркасов, межэтажных перекрытий, стропильных систем крыш, а также изготовления клееных деревянных конструкций и материалов на основе древесины (OSB, LVL, CLT и др.).

Для определения влияния отверстий на прочность при статическом изгибе и условной прочности при сжатии поперек волокон в тангенциальном направлении изготавливались образцы с применением метода систематического отбора по ГОСТ 16483.0–89. Для испытаний на статический изгиб были подготовлены образцы размерами $20 \times 20 \times 300 \text{ мм}^3$, $30 \times 30 \times 420 \text{ мм}^3$, $40 \times 40 \times 600 \text{ мм}^3$, $50 \times 50 \times 750 \text{ мм}^3$. Площадь поперечного сечения, длина и схема нагружения образцов выбраны в соответствии с ГОСТ 16483.3–84 и ГОСТ 33120–2014 и представлены на рис. 2, а. Перед проведением испытаний образцы выдерживались при температуре $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ и относительной влажности $(30 \pm 2)\%$ до достижения равновесной влажности, составляющей 8 %.

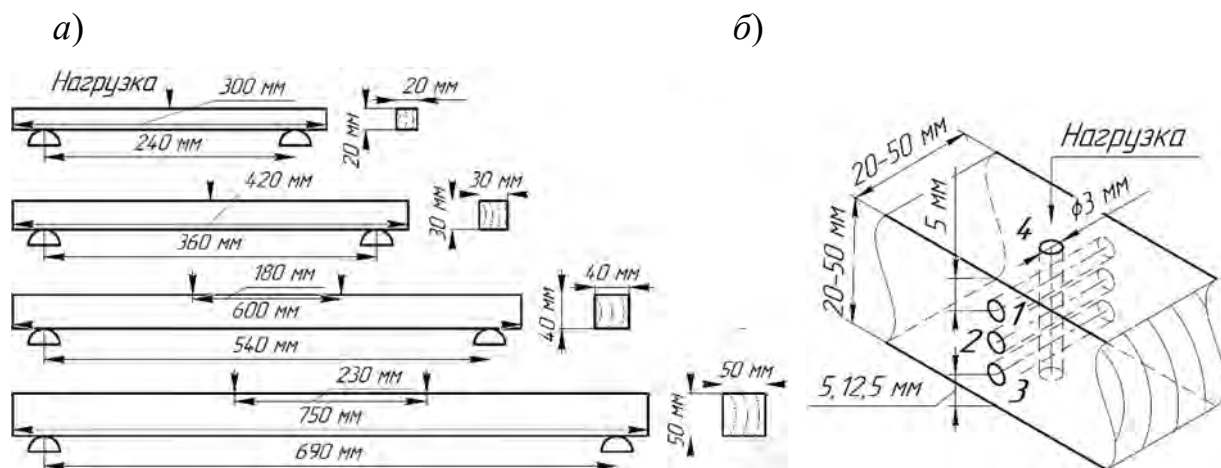


Рис. 2. Геометрические параметры и схемы нагружения образцов (а) и схема положения отверстий (б): 1–3 – отверстия в сжатой, нейтральной и растянутой зонах волокон образца соответственно; 4 – отверстие в направлении действия изгибающей нагрузки

Предварительно образцы были отсортированы на группы в соответствии с плотностью древесины или по количеству годичных слоев. С помощью устройства IML-Resi PD 400 в образцах были просверлены отверстия согласно эскизу, представленному на рис. 2, б.

Отдельной серией проводились испытания древесины сосны на сжатие поперек волокон в тангенциальном направлении. Для этого были изготовлены и испытаны образцы сечением 20×20 мм и длиной вдоль волокон 30 мм по ГОСТ 16483.11–72, которые в дальнейшем были отсортированы (с учетом вариации плотности) на четыре группы: без отверстий, с одним отверстием, двумя и тремя отверстиями (рис. 3).

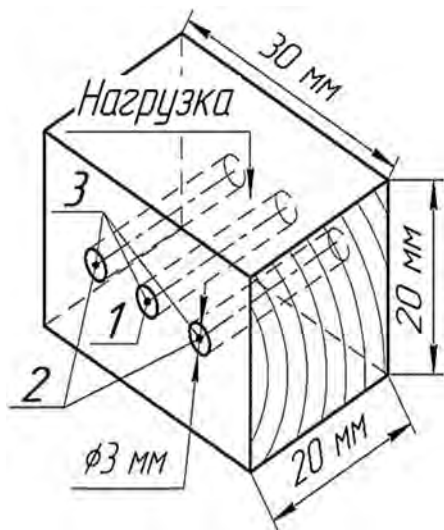


Рис. 3. Образцы для испытаний на сжатие

Для оценки прочности древесины сосны при статическом изгибе и сжатии поперек волокон использовались универсальные испытательные машины IG-IC 50kN (Shimadzu Corp., Япония) и P-10 (ЗИМ, СССР). Определение достоверности различий между групповыми средними максимальной нагрузки проводили с помощью теста Тьюки (Tukey HSD) с доверительной вероятностью 95 %.

Моделирование изгиба образцов. Исследование напряженно-деформированного состояния образцов при статическом изгибе проводилось с помощью метода конечных элементов (КЭ). В программном комплексе Ansys (ANSYS Inc., Canonsburg, PA, USA) были построены дискретные модели, насчитываю-

щие 30000 КЭ (SOLID186). Данные КЭ удобно применять для моделирования материалов с учетом физической нелинейности, которая проявляется при больших нагрузках и деформациях. Именно таким образом ведет себя древесина сосны [2]. Для описания ее упругих свойств использована модель ортотропного тела [1], а для отражения нелинейности – опция «билинейного изотропного упрочнения», которая требует введения дополнительного модуля упругости, позволяющего учитывать нелинейное поведение материала при возрастающих нагрузках. Этот параметр был определен на основании результатов поставленных экспериментов.

Разрушение образца без отверстий при статическом изгибе можно спрогнозировать по максимальным растягивающим напряжениям [8]. Однако наличие в нем отверстия приводит к возникновению неоднородного напряженного состояния и концентрации напряжений. Это затрудняет возможность точного прогнозирования нагрузки, при которой произойдет разрушение образца. Распределение нормальных и касательных напряжений в образце с отверстием в зоне растянутых волокон представлено на рис. 4.

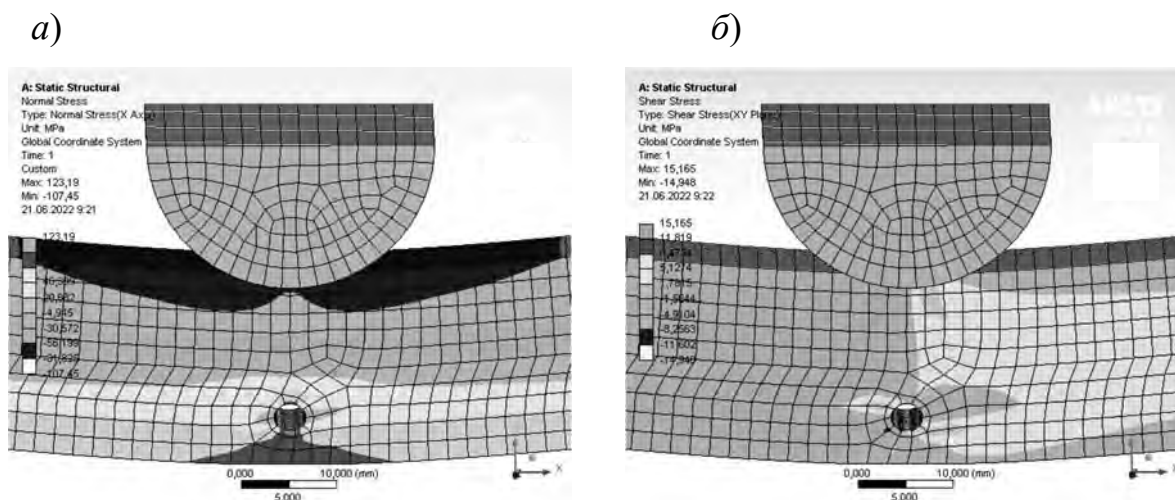


Рис. 4. Поля нормальных (а) и касательных (б) напряжений в образце сечением $20 \times 20 \text{ мм}^2$ с отверстием в зоне растянутых волокон на примере разработанной КЭ-модели в программном комплексе *Ansys*

Результаты экспериментов. Примеры результатов экспериментальных зависимостей усилий от прогиба и деформации при статическом изгибе и сжатии образцов с одним отверстием приведены на рис. 5.

Обобщенные результаты исследований, включающие геометрические размеры и количество образцов, расположение отверстий (см. рис. 2, б), максимальную силу разрушения образца $P_{\max}$ и однородность групп по средней $P_{\max}$ для испытаний при статическом изгибе, представлены в табл. 1, при сжатии поперек волокон в тангенциальном направлении – в табл. 2. Однородность средних значений $P_{\max}$ образцов обозначена знаком X в соответствующем столбце табл. 1 и 2.

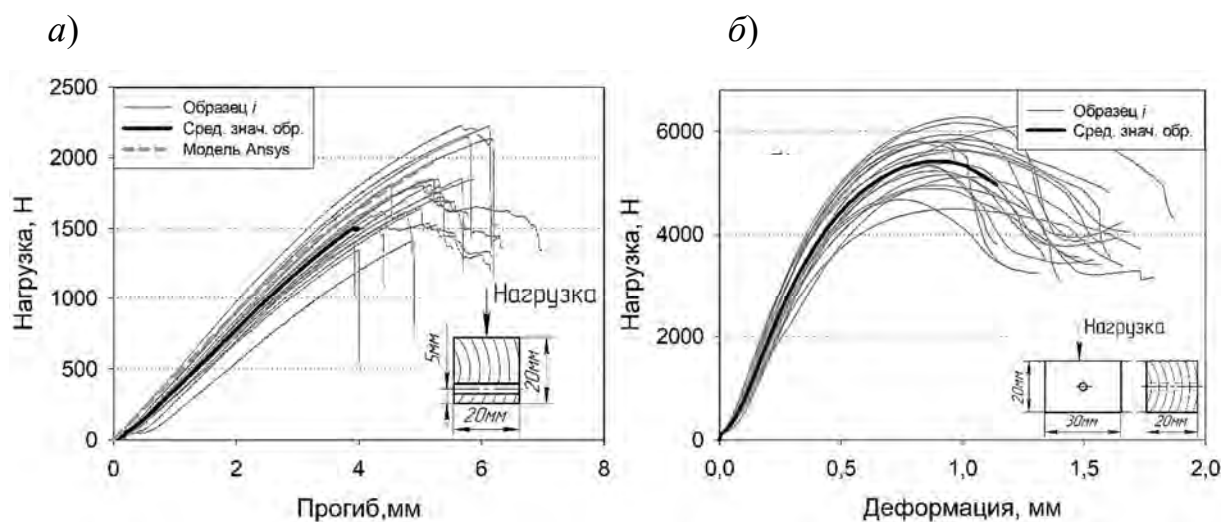


Рис. 5. Выборочные диаграммы «нагрузка – прогиб» при статическом изгибе образца с отверстием в зоне растянутых волокон с разработанной моделью в *Ansys* (а), диаграмма «нагрузка – деформация» образцов с одним отверстием при сжатии поперек волокон в тангенциальном направлении (б)

Табл. 1. Обобщенные результаты испытаний образцов на статический изгиб

$B \times \text{Ш} \times D, \text{мм}^3$	Количество образцов	Расположение отверстия	$P_{\max}$ (среднее/ст. откл./коэффициент вар.), Н	Однородность групп
$20 \times 20 \times 300$	18	Без отв.	2129/175/8,2	X
	18	1	1768/146/8,3	X
	18	2	2081/114/5,5	X
	18	3	1798/268/14,9	X
	18	4	1800/160/8,9	X
$30 \times 30 \times 420$	20	Без отв.	3824/581/15,2	X
	20	1	3530/427/12,1	XX
	20	3	3145/495/15,7	X
	20	4	3607/459/12,7	X
$40 \times 40 \times 600$	20	Без отв.	9700/1760/18,1	X
	20	1	8796/1606/18,3	XX
	20	3	7887/2484/31,5	X
	20	4	9620/1753/18,2	X
$50 \times 50 \times 750$	20	0	13431/1917/14,3	X
	20	3 (5 мм)	10200/1959/19,2	X
	20	3 (12,5 мм)	13462/1381/10,3	X

Табл. 2. Обобщенные результаты испытаний образцов при сжатии поперек волокон в тангенциальном направлении

Количество отверстий	Количество образцов	$P_{\text{усл. max}}$ (среднее/ст. откл./коэффициент вар.), Н	Однородность групп
Без отв.	20	4818/660/13,7	X
1	20	4390/451/10,3	X
2	20	4110/381/9,3	X
3	20	3363/352/10,5	X

Влияние отверстий на прочность древесины сосны при статическом изгибе в зоне максимальных нормальных напряжений зависит от расположения отверстия в образце. Установлено, что его наличие в нейтральном слое (см. рис. 2, б, поз. 2) статистически не влияло на прочность древесины в образцах с поперечным сечением $20 \times 20 \text{ мм}^2$, однако отверстия в других зонах значительно снижали прочность данных образцов. Для сечения $30 \times 30 \text{ мм}^2$ наличие отверстия по направлению приложения нагрузки (см. рис. 2, б, поз. 4) не оказывало статистически значимого влияния, при этом в образцах с отверстиями в зоне сжатых (см. рис. 2, б, поз. 1) и растянутых волокон (см. рис. 2, б, поз. 3) отмечалось значимое снижение прочности. Для поперечных сечений $40 \times 40 \text{ мм}^2$ и $50 \times 50 \text{ мм}^2$ отверстия, расположенные в зоне растянутых волокон, также уменьшали прочность образцов при статическом изгибе.

Установлено, что отверстия в древесине сосны снижали условную максимальную силу $P_{\text{усл. max}}$ при сжатии поперек волокон в тангенциальном направлении пропорционально изменению поперечного сечения образца при просверливании.

Выводы и рекомендации.

1. Оценку технического состояния элементов деревянных конструкций, находящихся под изгибающей нагрузкой, при использовании метода измерения сопротивления сверлению рекомендуется проводить в нейтральном слое или в направлении действия внешней изгибающей нагрузки.

2. Применение программных комплексов конечно-элементного моделирования для прогнозирования разрушения деревянных балок с отверстиями ограничено по причине сложноподвижного состояния материала под нагрузкой вокруг отверстия.

3. Влияние отверстий диаметром 3 мм на прочность реальных элементов конструкции, работающих на сжатие, незначительно.

4. Последующие исследования могут быть направлены на совершенствование модели древесины и разработку методики прогнозирования прочност-

ных свойств элементов деревянных конструкций с отверстиями в программных комплексах конечно-элементного моделирования.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ашкенази, Е. К.** Анизотропия древесины и древесных материалов / Е. К. Ашкенази. – Москва: Лесная промышленность, 1978. – 224 с.
2. **Уголев, Б. Н.** Древесиноведение с основами лесного товароведения / Б. Н. Уголев. – Москва: МГУЛ, 2005. – 340 с.
3. **Шарапов, Е. С.** Совершенствование методов и средств квазинеразрушающего контроля физико-механических свойств древесины и древесных материалов : дис. ... д-ра техн. наук: 05.21.05 / Е. С. Шарапов. – Архангельск, 2020. – 340 с.
4. **Aicher, S.** Design of rectangular holes in glulam beams / S. Aicher, L. Höfflin // *Otto-Graf-Journal*. – 2003. – Vol. 14. – P. 211–229.
5. **Branco, J. M.** Non-destructive assessment, full-scale load-carrying tests and local interventions on two historic timber collar roof trusses / J. M. Branco, H. S. Sousa, E. Tsakanika // *Engineering Structures*. – 2017. – Vol. 140. – P. 209–224.
6. Characterization of decay in the wooden roof of the S. Agata Church of Ragusa Ibla (Southeastern Sicily) by means of sonic tomography and resistograph penetration tests / S. Imposa [et al.] // *The International Journal of Architectural Heritage*. – 2014. – Vol. 8 (2). – P. 213–223.
7. **Jeleč, M.** Glulam beams with holes / M. Jeleč, D. Varevac, J. Zovkić // *Electronic Journal of the Faculty of Civil Engineering Osijek-e-gfos*. – 2014. – Vol. 5. – P. 22–33.
8. **Pěňčík, J.** Modelling of Experimental Tests of Wooden Specimens from Scots Pine (*Pinus sylvestris*) with the Help of Anisotropic Plasticity Material Model / J. Pěňčík // *Drvna Industrija*. – 2015. – Vol. 66 (1). – P. 27–33.
9. **Rinn, F.** Basics of micro-resistance drilling for timber inspection / F. Rinn // *Holztechnologie*. – 2012. – Vol. 53 (3). – P. 24–28.

E-mail: korolevas@volgatech.net, sharapoves@volgatech.net, shlychkovsv@volgatech.net.