Научная статья
УДК 691.113;624.048;674.051
DOI: 10.37482/0536-1036-2025-2-143-153

Определение скрытых дефектов в перекрестноклееных плитах из древесины сосны (*Pinus sylvestris* L.)

А.С. Королев ✉, ***канд. техн. наук;*** *ResearcherID: JKI-0714-2023, ORCID: https://orcid.org/0009-0000-1370-1285*
Е.С. Шарапов, д-р техн. наук, доц.; *ResearcherID: B-8151-2014, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6500-5377*
О.С. Егошин, аспирант; *ResearcherID: HLQ-6804-2023, ORCID: https://orcid.org/0009-0002-8076-8345*
Поволжский государственный технологический университет, пл. Ленина, д. 3, г. Йошкар-Ола, Россия, 424000; korolevas@volgatech.net ✉, sharapoves@volgatech.net, egoshin.o.s@mail.ru

Поступила в редакцию 28.03.24 / Одобрена после рецензирования 09.06.24 / Принята к печати 10.06.24

Аннотация. Перекрестноклееная древесина – один из перспективных строительных материалов. Существующая отечественная нормативно-техническая база не регламентирует неразрушающий контроль качества, а также обследование и мониторинг технического состояния плит из такой древесины, при этом результаты практического применения основных методов неразрушающего контроля для этих целей ограниченно представлены в научной литературе. Цель работы заключается в оценке возможности и точности выявления скрытых дефектов в плитах из перекрестноклееной древесины акустическим методом и измерением сопротивления сверлению. Исследование проводили на образцах плит размером 100×100 мм, разной толщины, изготовленных из древесины сосны (*Pinus sylvestris* L.). Скрытыми дефектами являются полости внутри плит, пораженность гнилью заготовок для слоя, участки с отсутствием клеевой прослойки. Акустический неразрушающий контроль осуществляли велосиметрическим методом с использованием ультразвуковых приборов «Пульсар 2.2» и Pundit PL-200. Для получения профиля сопротивления сверлению по толщине плиты применяли мобильное устройство IML-RESI PD 400 со стандартными тонкими буровыми сверлами с диаметром режущей части 3 мм. В работе представлены результаты зонального акустического сканирования плит из перекрестноклееной древесины в виде контурных графиков, на которых отражены скорости ультразвукового сигнала по всей плоскости плиты, а также профили сопротивления сверлению в местах заложенных дефектов. На основании попарного сравнения медиан по U-критерию Манна–Уитни и законов распределений скоростей ультразвукового сигнала для плит толщиной 120 и 200 мм, по критерию Колмогорова–Смирнова (для плит 120 мм) установлено отсутствие статистически значимых различий между выборками. Скорость ультразвуковой волны 1400 м/с является граничным значением, характеризующим наличие внутреннего дефекта в плите. Было показано, что метод измерения сопротивления сверлению не дает возможности выявить присутствие или отсутствие клеевого шва в исследованных плитах. Зональное сканирование велосиметрическим методом и определение сопротивления сверлению позволяют визуально представить наличие внутренних дефектов в виде профилей сопротивления сверлению и контурных графиков скоростей.

© Королев А.С., Шарапов Е.С., Егошин О.С., 2025
Статья опубликована в открытом доступе и распространяется на условиях лицензии CC BY 4.0

Ключевые слова: акустический неразрушающий контроль, дефектоскопия, качество, обследование, перекрестноклееная древесина, резистограф, сопротивление сверлению

Благодарности: Работа выполнена по гранту РНФ № 23-16-00220, https://rscf.ru/project/23-16-00220/ с использованием оборудования ЦКП «Экология, биотехнологии и процессы получения экологически чистых энергоносителей» Поволжского государственного технологического университета, г. Йошкар-Ола.

Для цитирования: Королев А.С., Шарапов Е.С., Егошин О.С. Определение скрытых дефектов в перекрестноклееных плитах из древесины сосны (*Pinus sylvestris* L.) // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 2. С. 143–153. https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-2-143-153

Original article

Detection of Hidden Defects in Cross-Laminated Pine (*Pinus sylvestris* L.) Panels

Aleksandr S. Korolev✉***,*** *Candidate of Engineering; ResearcherID: JKI-0714-2023, ORCID: https://orcid.org/0009-0000-1370-1285*
Evgenii S. Sharapov, *Doctor of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: B-8151-2014, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6500-5377*
Oleg S. Egoshin, *Postgraduate Student; ResearcherID: HLQ-6804-2023, ORCID: https://orcid.org/0009-0002-8076-8345*
Volga State University of Technology, pl. Lenina, 3, Yoshkar-Ola, 424000, Russian Federation; korolevas@volgatech.net✉, sharapoves@volgatech.net, egoshin.o.s@mail.ru

Received on March 28, 2024 / Approved after reviewing on June 9, 2024 / Accepted on June 10, 2024

Abstract. Cross-laminated timber is one of the promising construction materials. The existing domestic regulatory and technical framework does not regulate non-destructive testing, as well as examination and monitoring of the technical condition of cross-laminated timber panels, while the results of the practical application of the basic methods of non-destructive testing for these purposes are limitedly presented in the scientific literature. The aim of the research has been to assess the possibility and accuracy of detecting hidden defects in cross-laminated timber panels using the acoustic method and measuring the drilling resistance. The research has been conducted on samples of 100×100 mm panels of different thickness, made of pine wood (*Pinus sylvestris* L.). Hidden defects include cavities inside the panels, rot in the billets for the layer, and areas with no adhesive layer. Acoustic non-destructive testing has been carried out by the velocimetric method using ultrasonic devices "Pulsar 2.2" and Pundit PL-200. To obtain the drilling resistance profile across the panel thickness, an IML-RESI PD 400 mobile device has been used with standard thin drill bits with a cutting diameter of 3 mm. The paper presents the results of zonal acoustic scanning of cross-laminated timber panels in the form of contour graphs, which reflect the ultrasonic signal speeds along the entire plane of the panel, as well as drilling resistance profiles in places of inherent defects. Based on a pairwise comparison of the medians using the Mann-Whitney U-test and the laws of velocity distributions of the ultrasonic signal for panels with a thickness of 120 and 200 mm, according to the Kolmogorov-Smirnov test (for panels measuring 120 mm), the absence of statistically significant differences between the samples has been established. The ultrasonic wave velocity of 1,400 m/s has been the boundary value characterizing the presence of an internal defect in the panel. It has been shown that the method of measuring drilling resistance does not allow detecting the presence or absence of an adhesive line in

This is an open access article distributed under the CC BY 4.0 license

the studied panels. Zonal scanning using the velocimetric method and determination of drilling resistance make it possible to visually represent the presence of internal defects in the form of drilling resistance profiles and contour velocity graphs.

Keywords: acoustic non-destructive testing, defect detection, quality, examination, cross-laminated timber, resistograph, drilling resistance

Acknowledgements: The work was carried out under the Russian Science Foundation grant no. 23-16-00220, https://rscf.ru/en/project/23-16-00220/ using the equipment of the Collective Use Centre "Ecology, Biotechnology and Processes for Obtaining Environmentally Friendly Energy Carriers" of the Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola.

For citation: Korolev A.S., Sharapov E.S., Egoshin O.S. Detection of Hidden Defects in Cross-Laminated Pine (*Pinus sylvestris* L.) Panels. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 2, pp. 143–153. (In Russ.). https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-2-143-153

Введение

В России и за рубежом растет применение плит из перекрестноклееной древесины (ДПК) в качестве несущих и ограждающих конструкций зданий и сооружений. Их активное внедрение в строительной отрасли обусловлено возможностью широкого использования, в т. ч. комбинирования с другими строительными материалами. В нашей стране требования к качеству материала и общие технические требования, такие как геометрические размеры, количество слоев, прочностные и упругие характеристики, а также показатели поверхности и правила приема плит из ДПК устанавливает ГОСТ Р 56706–2022 «Плиты из перекрестноклееной древесины. Общие технические условия». Вместе с тем данный стандарт не регламентирует методы контроля скрытых дефектов в плитах, которые могут значимо влиять на прочностные и эксплуатационные свойства клееных деревянных конструкций.

Акустические методы неразрушающего контроля применимы для установления участков с отслоениями или отсутствием клеевой прослойки в клееных деревянных элементах конструкций [9, 11]. При этом результаты измерений акустических характеристик ДПК могут быть представлены в виде контурных графиков с выделением бездефектных участков плит, имеющих высокую скорость акустического сигнала по сравнению с участками без клеевой прослойки, сердцевиной или сучками [18]. В процессе производства ДПК или их эксплуатации древесина в плите может быть поражена дереворазрушающими грибами, в этом случае скорость прохождения акустического сигнала также снижается [1, 16, 17, 25].

Исследования [10, 12, 21, 27, 28] посвящены определению упругих характеристик плит из ДПК с целью оценки их качества и несущей способности. Модуль упругости и сдвига могут быть установлены с помощью резонансного акустического метода, основанного на возбуждении вынужденных упругих колебаний в плите или ее части и их последующем анализе. Данный метод труднооосуществим для плит, являющихся частью здания или конструкции, ввиду наличия продольных и поперечных связей элементов конструкции, влияющих на результаты измерений [27].

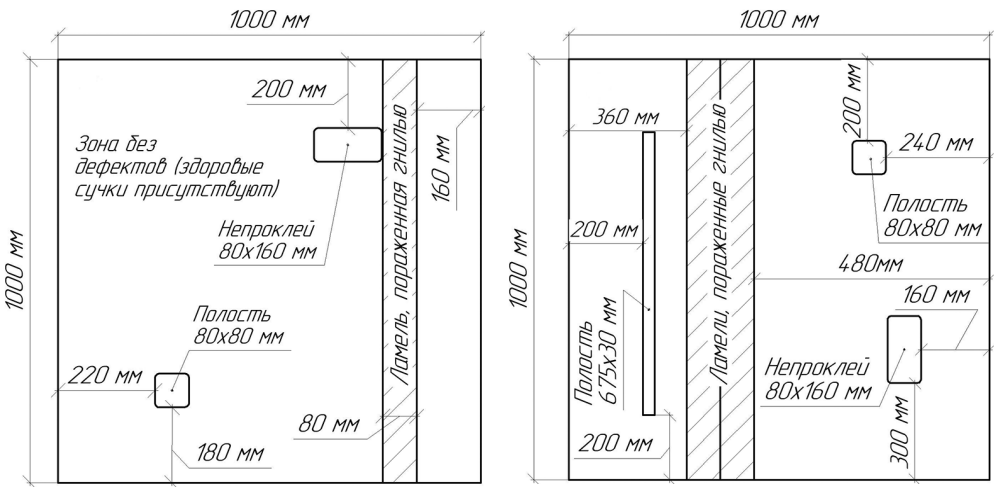
С целью обследования и мониторинга элементов деревянных конструкций активно применяется измерение сопротивления сверлению [2, 6, 7, 13, 14, 19, 23, 26], основанное на фиксации энергосиловых параметров процесса сверления древесины тонкими буровыми сверлами [5]. Сопротивление древесины

сверлению высоко связано с плотностью и механическими свойствами древесины [7, 15, 20, 22, 26].

Плиты из ДПК являются относительно новым строительным материалом, а применение современных методов неразрушающего контроля характеристик и внутреннего состояния древесины в плитах не регламентированы и апробированы лишь частично [3, 4]. В связи с этим целью данной работы стала оценка возможности и точности выявления скрытых дефектов в плитах из ДПК велосиметрическим акустическим методом и методом измерения сопротивления сверлению.

Объекты и методы исследования

Для изготовления плит из ДПК применяли пиломатериал из древесины сосны (*Pinus sylvestris* L.) камерной сушки номинальным размером 2100×85×44 мм и влажностью 10–12 %. Из пиломатериала получены заготовки длиной 1050 мм и в дальнейшем откалиброваны до размеров в поперечном сечении 40×80 мм. На следующем этапе произвели сортировку заготовок по качеству. Для внешних слоев плит отбирали заготовки без пороков тангенциального распила, а для внутренних – заготовки слоя тангенциального распила со здоровыми сучками. Было изготовлено 2 плиты размерами 1000×1000×120 и 1000×1000×200 мм, соответственно 3- и 5-слойные по ГОСТ Р 56706–2022 с дефектами в центральном слое. Для каждой плиты разработаны схемы центральных слоев (рис. 1) со следующими дефектами: полости (частичное отсутствие заготовки слоя) 80×80×40 и 675×30×40 мм в плите; слой, выполненный из заготовки, пораженной пестрой гнилью, размеры пораженного участка в готовом изделии – 1000×80(160) мм; непроклеенный участок 80×160 мм между смежными слоями плиты. Выбор дефектов был обусловлен высокой вероятностью их появления в условиях реального производства, а также их значимого влияния на прочностные характеристики плит [24].



а *б*

Рис. 1. Схема расположения дефектов в центральном слое плиты из перекрестноклееной древесины: *а* – 3-слойная; *б* – 5-слойная

Fig. 1. The layout of defects in the central layer of a cross-laminated timber panel: *а* – 3-layer; *б* – 5-layer

Для склеивания слоев плит между собой применяли однокомпонентный полиуретановый клей Kleiberit PUR Adhesive 501.0 (Kleiberit SE & Co, Вайнгартен, Германия). Прессование осуществляли в гидравлическом прессе Vario Press 30T-120/1 (Foshan City Vario Machinery Co., Ltd., Фошань, Гуандун, Китай) при температуре 23 °С, давлении 0,98 МПа (10 кг/см^2) и выдержке 90 мин.

Для определения влажности плит использовали влагомер МГ4Д (ООО «СКБ Стройприбор», Челябинск, Россия). Измерение производили в режиме сканирования. Среднюю влажность устанавливали по 2 внешним слоям.

Зональное ультразвуковое сканирование плит выполняли велосиметрическим акустическим методом, основанным на определении времени прохождения ультразвукового сигнала с последующим расчетом скорости акустического сигнала [8]. Излучатель и приемник располагали друг напротив друга между взаимно параллельными лицевыми плоскостями плиты (рис. 2, *а*). Измерение осуществляли посредством сухого акустического контакта. Сетка измерений имела вид 25×25 с общим количеством измерений 625 шт., шагом 40 мм между смежными измерениями и перекрывала площадь в 92 % плиты. Время прохождения ультразвуковой продольной волны фиксировали в автоматическом режиме по переднему фронту сигнала с помощью ультразвуковых приборов «Пульсар 2.2» (ООО НПП «Интерприбор», Челябинск, Россия) и Proceq Pundit PL-200 (Proceq SA, Шверценбах, Швейцария) с номинальной частотой преобразователя 60 и 54 кГц соответственно.



а *б*

Рис. 2. Проведение измерений при неразрушающем контроле внутреннего состояния плит из перекрестноклееной древесины: *а* – велосиметрическим акустическим методом с использованием ультразвукового прибора Proceq Pundit PL-200; *б* – методом фиксации сопротивления сверлению устройством IML-RESI PD 400

Fig. 2. Carrying out measurements during non-destructive testing of the internal condition of cross-laminated timber panels: *a* – by the velocimetric acoustic method using the Proceq Pundit PL-200 ultrasonic device; *б* – by fixing drilling resistance using the IML-RESI PD 400 device

Для контроля внутреннего состояния плит из ДПК методом измерения сопротивления сверлению применяли прибор IML-RESI PD 400 (IML System GmbH, Вислох, Германия) со стандартным сверлом, имеющим диаметр хвостовика 1,5 мм и режущей части – 3 мм. Использовали постоянную частоту вращения тонкого бурового сверла 2500 мин$^{-1}$ и скорость подачи 1,5 м/мин. Просверливание производили перпендикулярно лицевой поверхности плиты в местах заложенных дефектов (рис. 2, *б*). В результате просверливания были получены

профили изменения сопротивления сверлению, отражающие усилия, необходимые для сверления древесины. На основании сопротивления сверлению оценивалась плотность древесины и наличие в ней внутренних дефектов [2, 20, 23].

Данные, полученные при зональном сканировании ультразвуковыми приборами и измерении сопротивления сверлению, сохранялись и обрабатывались с использованием программного обеспечения PD-Tools PRO (IML System GmbH, Вислох, Германия), Microsoft Excel (Microsoft Corp., Редмонд, Вашингтон, США) и SigmaPlot 14.0 (Systat Software Inc., Сан-Хосе, Калифорния, США) с доверительной вероятностью 95 %.

Результаты исследования и их обсуждение

Средняя влажность древесины в плитах из ДПК варьировала от 5,7 до 8,1 % (среднее значение – 6,9 %), что соответствует влажности при кондиционировании древесины в комнатно-сухих условиях (температура воздуха – 20 °С, относительная влажность – 40 %).

Результаты зонального ультразвукового сканирования 3-слойной и 5-слойной плит из ДПК представлены на рис. 3, а статистические характеристики скоростей прохождения ультразвукового сигнала через плиты – в таблице.

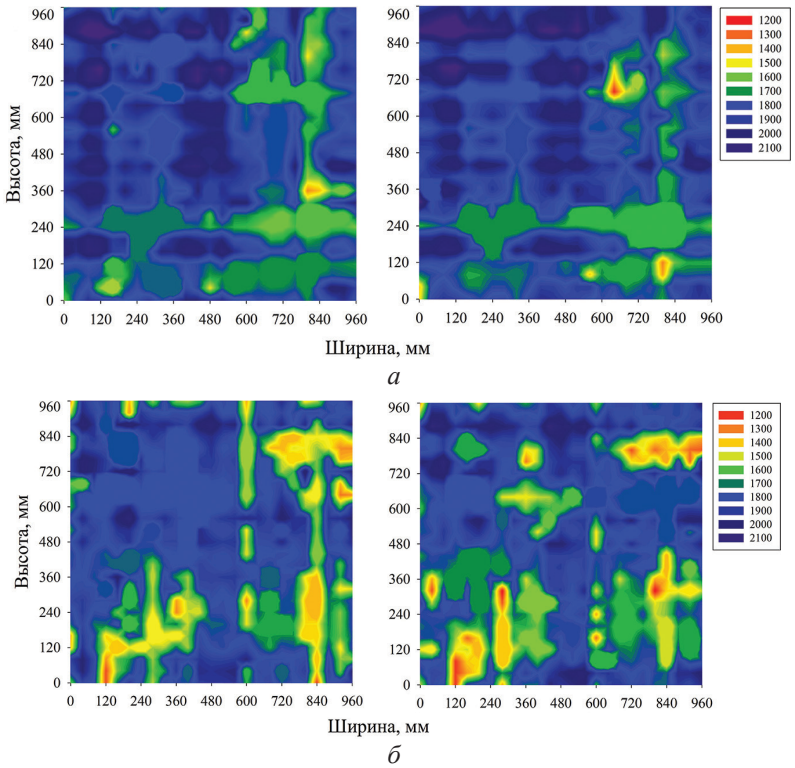


Рис. 3. Контурные графики скорости ультразвукового сигнала, полученные с помощью приборов «Пульсар 2.2» (слева) и Pundit PL-200 (справа) для плит из перекрестноклееной древесины: *а* – 3-слойной; *б* – 5-слойной

Fig. 3. The contour graphs of ultrasonic signal velocity obtained using the “Pulsar 2.2” (left) and Pundit PL-200 (right) devices for cross-laminated timber panels: *а* – 3-layer; *б* – 5-layer

Полученные выборки скоростей распространения ультразвукового сигнала не подчинялись нормальному закону распределения случайных величин

($A_{ст}$, $E_{ст}$). На основании попарного сравнения медиан по U-критерию Манна–Уитни и законов распределений скоростей ультразвукового сигнала, зафиксированного приборами «Пульсар 2.2» и Pundit PL-200 для плит толщиной 120 и 200 мм, и по критерию Колмогорова–Смирнова для плит толщиной 120 мм установлено отсутствие статистически значимых различий между выборками. Это подтверждает равную точность двух использованных приборов. Визуально графики распределения скоростей ультразвуковых сигналов схожи и дают одинаковую информацию о наличии дефектов в плитах.

Вариабельность скорости ультразвукового сигнала в плитах из перекрестноклееной древесины, м/с
The variability of ultrasonic signal velocity in cross-laminated timber panels, m/s

Используемый ультразвуковой прибор	Толщина плиты, мм	M±m	X_{min}	X_{max}	S_x	CV	$A_{ст}$	$E_{ст}$
Пульсар 2.2	120	1839,3±6,5	1217	2277	163,0	8,86	–9,88	10,37
	200	1731,3±7,8	1213	2081	194,2	11,21	–8,32	–1,56
Pundit PL-200	120	1825,7±6,7	945	2272	168,4	9,22	–10,78	14,04
	200	1729,1±7,9	1026	2103	198,5	11,48	–10,47	2,68

Примечание: M±m – среднее значение и его ошибка; X_{min}, X_{max} – минимальное и максимальное значения соответственно; S_x – стандартное отклонение; CV – коэффициент вариации; $A_{ст}$ – стандартизованная асимметрия; $E_{ст}$ – стандартизированный эксцесс.

Регрессионный анализ показал умеренную взаимосвязь (R^2 = 0,61 и R^2 = 0,48) между скоростями ультразвукового сигнала применяемых приборов (рис. 4).

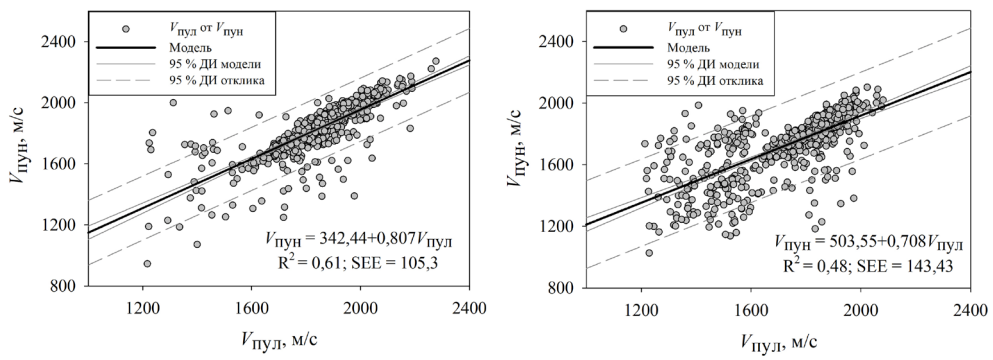


Рис. 4. Взаимосвязь между скоростью ультразвукового сигнала, полученного с помощью приборов «Пульсар 2.2» ($V_{пул}$) и Pundit PL-200 ($V_{пун}$) для плит из перекрестноклееной древесины: *а* – 3-слойная; *б* – 5-слойная (R^2 – коэффициент детерминации; SEE – стандартная ошибка аппроксимации; ДИ – доверительный интервал, модель и ее коэффициенты значимы)

Fig. 4. The relationship between the speed of the ultrasonic signal obtained using the "Pulsar 2.2" ($V_{пул}$) and Pundit PL-200 ($V_{пун}$) devices for cross-laminated timber panels: *а* – 3-layer; *б* – 5-layer (R^2 – coefficient of determination; SEE – standard error of the estimate; ДИ – confidence interval, the model and its coefficients are significant)

В 3-слойной плите наблюдается отсутствие дефектов при скорости акустического сигнала от 1400 до 2200 м/с. При этом на участках плиты, где были заложены дефекты всех трех видов, скорость ультразвукового сигнала снижа-

ется при ее вариации от 1000 до 1400 м/с. В 5-слойной плите тенденция уменьшения скорости ультразвукового сигнала в местах с внутренней полостью и отсутствием клеевой прослойки схожая. При этом не отмечается четкая зона падения скорости в плите, где в центральном слое использовались заготовки, пораженные пестрой гнилью. Вероятно, это связано с тем, что доля ширины заготовки слоя, пораженной гнилью, в 5-слойной плите значительно меньше по сравнению с 3-слойной, что незначительно влияет на скорость прохождения ультразвукового сигнала. Результаты ультразвукового зонального сканирования согласуются с ранее полученными данными [8, 18].

Стоит отметить, что по скорости акустического сигнала можно определить только вероятное наличие дефекта.

Результаты применения метода измерения сопротивления сверлению 3- и 5-слойной плит представлены на рис. 5. Данные профили получены на участках без внутренних дефектов *1*, с полостью в центральном слое плиты *2* и на участке *3*, где в центральном слое была использована заготовка с пестрой гнилью.

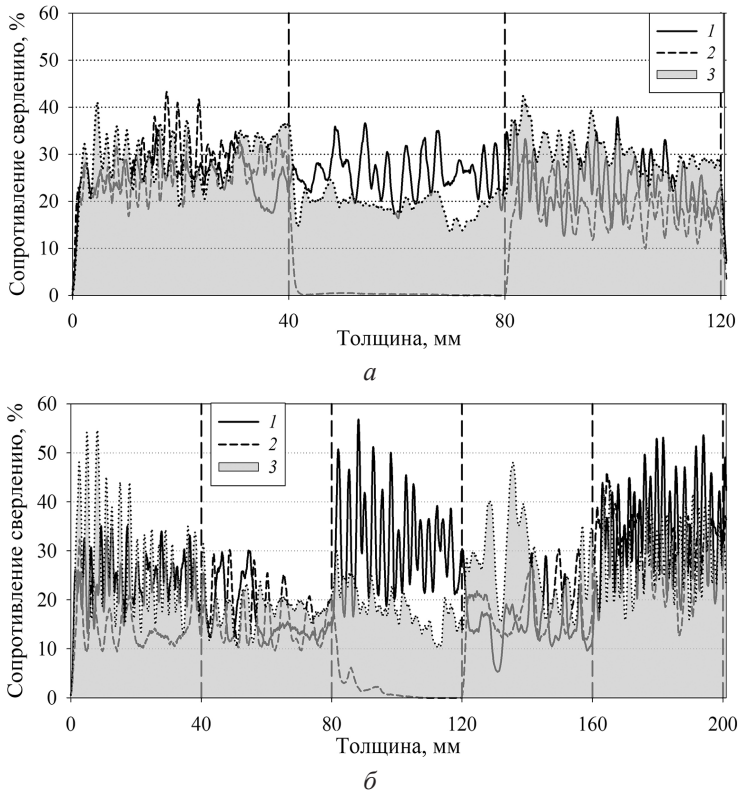


Рис. 5. Профили сопротивления сверлению плит из перекрестноклееной древесины: *а* – 3-слойной; *б* – 5-слойной

Fig. 5. The drilling resistance profiles of cross-laminated timber panels: *а* – 3-layer; *б* – 5-layer

На профилях сопротивления сверлению для 3- и 5-слойной плит из ДПК зафиксировано снижение показателя в центральном слое. Так, для участка плиты без дефектов профиль не имеет резких изменений величины, она только варьирует в зависимости от прохождения сверла через раннюю и позднюю древесину по всей ширине изделия, что говорит об отсутствии дефектов. На профиле с полостью отчетливо заметно падение сопротивления сверлению до

0, это свидетельствует о наличии полости. На профиле с заготовкой, пораженной гнилью, наблюдается уменьшение показателя в среднем на 30 %, что отражает пониженную плотность древесины на данном участке [2, 13, 23, 24], не соответствующую плотности древесины сосны, указывая на присутствие гнили. Наличие и отсутствие клеевой прослойки между слоями плиты из ДПК не отражалось на всех профилях сопротивления сверлению. Это связано с разрешающей способностью данного метода исследований, толщиной клеевого шва и его прочностью, ограничивая применение метода для указанных целей.

Заключение

Велосиметрический акустический метод с использованием ультразвуковых приборов и метод измерения сопротивления сверлению могут быть рекомендованы в качестве основных для оценки внутренних дефектов в плитах из перекрестноклееной древесины, при этом акустический метод позволяет выявлять возможные места расположения дефектов, а сверление тонкими буровыми сверлами – фактические размеры, границы размещения и типы дефектов. Вместе с тем метод измерения сопротивления сверлению не дает возможность установить наличие или отсутствие клеевого шва в плитах из перекрестноклееной древесины. Зональное сканирование велосиметрическим методом и установление сопротивления сверлению позволяют наглядно представить наличие внутренних дефектов в виде профилей сопротивления сверлению и контурных графиков скоростей.

Информативность велосиметрического акустического метода выше для плит меньшей толщины, а граничной скоростью ультразвуковой волны, характеризующей наличие внутреннего дефекта, может являться скорость в 1400 м/с.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. *Бирман А.Р., Локштанов Б.М., Соколова В.А., Сергеевичев А.В., Орлов В.В., Бачериков В.И., Фролов И.С.* Методы определения участков с ядровой гнилью для обеспечения рационального раскроя хлыстов // Системы. Методы. Технологии. 2017. № 2(34). С. 116–120.

Birman A.R., Lokshtanov B.M., Sokolova V.A., Sergeevichev A.V., Orlov V.V., Bacherikov V.I., Frolov I.S. Methods for Determining Core Rot Areas to Ensure Rational Cutting of Whips. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* = Systems. Methods. Technologies, 2017, no. 2(34), pp. 116–120. (In Russ.). https://doi.org/10.18324/2077-5415-2017-2-116-120

2. *Королев А.С., Шарапов Е.С., Попов В.А.* Оценка внутреннего состояния древесины в балках перекрытий методом измерения сопротивления сверлению // Вестн. гражданск. инженеров. 2023. № 5(100). С. 21–30.

Korolev A.S., Sharapov E.S., Popov V.A. Assessment of Internal Condition of Wood in Inter-Floor Covering Beams by Drilling Resistance Measurement Method. V*estnik Grazhdanskikh Inzhenerov* = Bulletin of Civil Engineers, 2023, no. 5(100), pp. 21–30. (In Russ.). https://doi.org/10.23968/1999-5571-2023-20-5-21-30

3. *Чубинский А.Н., Тамби А.А., Теппоев А.В., Ананьева Н.И., Семишкур С.О., Бахшиева М.А.* Физические неразрушающие методы испытания и оценка структуры древесных материалов // Дефектоскопия. 2014. № 11. С. 76–84.

Chubinsky A.N., Tambi A.A., Teppoev A.V., Anan'eva N.I., Semishkur S.O., Bakhshieva M.A. Physical Non-Destructive Testing Methods and Evaluation of the Structure of Wood-Based Materials. *Defektoskopiya* = Russian Journal of Nondestructive Testing, 2014, no. 11, pp. 76–84. (In Russ.).

4. *Чубинский А.Н., Тамби А.А., Федяев А.А., Федяева Н.Ю., Кульков А.М.* Направления использования физических методов контроля структуры и свойств древесины // Системы. Методы. Технологии. 2015. № 2(26). С. 152–158.

Chubinsky A.N., Tambi A.A., Fedyaev A.A., Fedyaeva N.Yu., Kulkov A.M. Using Physical Methods to Control Wood Structure and Properties. *Sistemy. Metody. Tekhnologii*. = Systems. Methods. Technologies, 2015, no. 2(26), pp. 152–158. (In Russ.).

5. *Шарапов Е.С.* Совершенствование методов и средств квазинеразрушающего контроля физико-механических свойств древесины и древесных материалов: дис. … д-ра техн. наук. Архангельск, 2020. 340 с.

Sharapov E.S. *Improvement of Methods and Means of Quasi-non-Destructive Testing of Physical and Mechanical Properties of Wood and Wood-Based Materials*: Dr. Tech. Sci. Diss. Arkhangelsk, 2020. 340 p. (In Russ.).

6. Brunetti M., Aminti G., Vicario M., Nocetti M. Density Estimation by Drilling Resistance Technique to Determine the Dynamic Modulus of Elasticity of Wooden Members in Historic Structures. *Forests*, 2023, vol. 14, no. 6, art. no. 1107. https://doi.org/10.3390/f14061107

7. Ceraldi C., Mormone V., Russo Ermolli E. Resistographic Inspection of Ancient Timber Structures for the Evaluation of Mechanical Characteristics. *Materials and Structures*, 2001, vol. 34, pp. 59–64. https://doi.org/10.1007/BF02482201

8. Concu G., Fragiacomo M., Trulli N., Valdés M. Non-Desctructive Assessment of Gluing in Cross-Laminated Timber Panels. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 2017, vol. 226, pp. 559–569 https://doi.org/10.2495/SDP170491

9. Dietsch P., Tannert T. Assessing the Integrity of Glued-Laminated Timber Elements. *Construction and Building Materials*, 2015, vol. 101, part 2, pp. 1259–1270. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.06.064

10. Faircloth A., Brancheriau L., Karampour H., Kumar C. Evaluation of Full-Sized and Thick Cross-Laminated Timber Using In-Line Non-Destructive Techniques. *Wood Material Science and Engineering*, 2023, vol. 19, iss. 3, pp. 660–673. https://doi.org/10.1080/17480272.2023.2286622

11. Gaspar F., Cruz H., Gomes A. Evaluation of Glue Line Shear Strength of Laminated Timber Structures Using Block and Core Type Specimens. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2018, vol. 76, pp. 413–425. https://doi.org/10.1007/s00107-017-1217-4

12. Gsell D., Feltrin G., Schubert S., Steiger R., Motavalli M.M. Cross-Laminated Timber Plates: Evaluation and Verification of Homogenized Elastic Properties. *Journal of Structural Engineering*, 2007, vol. 133, no. 1, pp. 132–138. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2007)133:1(132)

13. Imposa S., Mele G., Corrao M., Coco G., Battaglia G. 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. *International Journal of Architechtural Heritage*, 2014, vol. 8, iss. 2, pp. 213–223. https://doi.org/10.1080/15583058.2012.685924

14. Kloiber M., Frankeová D., Slížková Z., Kunecký J. Repair of Old Timber Log House Using Cavity Filling with Compatible Natural Materials. *Buildings*, 2023, vol. 13, no. 2, art. no. 550. https://doi.org/10.3390/buildings13020550

15. Kloiber M., Tippner J., Hrivnák J. Mechanical Properties of Wood Examined by Semi-Destructive Devices. *Materials and Structures*, 2014, vol. 47, pp. 199–212. https://doi.org/10.1617/s11527-013-0055-z

16. Machek L., Militz H., Sierra-Alvarez R. The Use of an Acoustic Technique to Assess Wood Decay in Laboratory Soil-Bed Tests. *Wood Science and Technology*, 2001, vol. 34, pp. 467–472. https://doi.org/10.1007/s002260000070

17. McGovern M., Senalik A., Chen G., Beall F.C., Reis H. Effect of Decay on Ultrasonic Velocity and Attenuation Measurements in Wood. *Proceedings of SPIE – The Interna-*

tional Society for Optical Engineering: Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems, 2011, vol. 7981, art. no. 79810N. https://doi.org/10.1117/12.879057

18. Moya R., Tenorio C., Muñoz F. Ultrasound Velocity Mapping to Evaluate Gluing Quality in CLT Panels from Plantation Wood Species. *Wood Science and Technology*, 2021, vol. 55, pp. 681–696. https://doi.org/10.1007/s00226-021-01273-x

19. Nocetti M., Mannucci M., Brunetti M. Automatic Assessment of Insect Degradation Depth in Structural Solid Wood Elements by Drilling Resistance Measurements. *Construction and Building Materials*, 2023, vol. 366, art. no. 130273. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.130273

20. Oliveira J.T. da S., Wang X., Vidaurre G.B. Assessing Specific Gravity of Young *Eucalyptus* Plantation Trees Using a Resistance Drilling Technique. *Holzforschung*, 2017, vol. 71, no. 2, pp. 137–145. https://doi.org/10.1515/hf-2016-0058

21. Opazo-Vega A., Benedetti F., Nuñez-Decap M., Maureira-Carsalade N., Oyarzo-Vera C. Non-Destructive Assessment of the Elastic Properties of Low-Grade CLT Panels. *Forests*, 2021, vol. 12, no. 12, art. no. 1734. https://doi.org/10.3390/f12121734

22. Park C.Y., Kim S.J., Lee J.J. Evaluation of Specific Gravity in Post Member by Drilling Resistance Test. *Journal of the Korean Wood Science and Technology*, 2006, vol. 34(2), pp. 1–9.

23. Rinn F. Basics of Micro-Resistance Drilling for Timber Inspection. *Holztechnologie*, 2012, vol. 53, iss. 3, pp. 24–29.

24. Ross R.J., Pellerin R.F. Nondestructive Testing for Assessing Wood Members in Structures: A Review. *General technical report FPL, GTR-70*, 1994. 39 p. https://doi.org/10.2737/FPL-GTR-70

25. Sandoz J.L., Benoit Y., Demay L. Wood Testing Using Acousto-Ultrasonic. *Proceedings of the 13th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood.* Sopron, University of Western Hungary, 2000, pp. 97–104.

26. Sharapov E., Brischke C., Militz H., Smirnova E. Prediction of Modulus of Elasticity in Static Bending and Density of Wood at Different Moisture Contents and Feed Rates by Drilling Resistance Measurements. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2019, vol. 77, pp. 833–842. https://doi.org/10.1007/s00107-019-01439-2

27. Steiger R., Gülzow A., Gsell D. Non Destructive Evaluation of Elastic Material Properties of Cross-Laminated Timber (CLT). *Proceedings of the Conference COST E53*. The Netherlands, Delft, 2008, pp. 29–30.

28. Zhang L., Tiemann A., Zhang T., Gauthier T., Hsu K., Mahamid M., Moniruzzaman P.K., Ozevin D. Nondestructive Assessment of Cross-Laminated Timber Using Non-Contact Transverse Vibration and Ultrasonic Testing. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2021, vol. 79, pp. 335–347. https://doi.org/10.1007/s00107-020-01644-4

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest

Вклад авторов: Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи
Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article