

УДК 691.113, 624.048, 674.051

DOI 10.23968/1999-5571-2023-20-5-21-30

© А. С. Королев, канд. техн. наук, ст. научн. сотрудник

© A. S. Korolev, PhD in Sci. Tech., Senior research worker

© Е. С. Шаронов, д-р техн. наук, профессор, гл. н. с.

© E. S. Sharapov, Dr. Sci. Tech., Professor

© В. А. Попов, старший преподаватель

© V. A. Popov, senior teacher

(Поволжский государственный технологический университет, Йошкар-Ола, Россия)

(Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola, Russia)

E-mail: korolevas@volgatech.net

E-mail: korolevas@volgatech.net

ОЦЕНКА ВНУТРЕННЕГО СОСТОЯНИЯ ДРЕВЕСИНЫ В БАЛКАХ ПЕРЕКРЫТИЙ МЕТОДОМ ИЗМЕРЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ СВЕРЛЕНИЮ¹

ASSESSMENT OF INTERNAL CONDITION OF WOOD IN INTER-FLOOR COVERING BEAMS BY DRILLING RESISTANCE MEASUREMENT METHOD

Одним из перспективных методов определения внутреннего состояния и оценки физико-механических свойств древесины при обследовании деревянных конструкций является метод измерения сопротивления сверлению, но по нему отсутствует унифицированная методика и общие правила и рекомендации. Исследования проводились на деревянных балках межэтажных перекрытий, выполненных из сдвоенного четырехкантного бруса из древесины сосны (*Pinus sylvestris L.*). Инструментальная оценка внутреннего состояния древесины в балках проводилась при помощи мобильного устройства IML-RESI PowerDrill 400 и стандартных тонких буровых сверл (IML System GmbH, Вислох, Германия) при частоте вращения 2500 об/мин и скоростях подачи 0,5 и 1 м/мин. В работе представлены типовые профили сопротивления сверлению и подаче тонкого бурового сверла, в том числе при использовании затупленных сверл. Проведен анализ средних величин профилей сопротивления сверлению и подаче тонкого бурового сверла, а также влияния влажности древесины на результаты измерений. Дальнейшие исследования будут направлены на разработку комплексной методики инструментального обследования деревянных конструкций с применением метода измерения сопротивления сверлению.

Ключевые слова: деревянные конструкции, древесина, качество древесины, конструкционная древесина, неразрушающий контроль, обследование зданий, оперативная диагностика, резистограф.

One of the promising methods for evaluating the internal condition and the physical and mechanical properties of wood during inspection of wooden structures is the method based on measurements the resistance to drilling, but no unified methodology and general rules and recommendations are available in this respect. The investigations were carried out on wooden beams of inter-flooring covering slabs made of twin four-beam timber from pine wood (*Pinus sylvestris L.*). The IML-RESI PowerDrill 400 drilling tool and standard boring drill bits (IML System GmbH, Wiesloch, Germany) were used to evaluate internal condition of wood in timber joist at the rotation frequency of 2500 rpm and feed rates of 0.5 and 1 m/min. The paper presents typical drilling and feeding resistance (DR and FR) profiles of the thin drill bit, including the use of blunted drill bits. The average values of the drilling resistance and feed resistance profiles of the thin drill bit were analyzed, as well as the influence of wood moisture degree on the measurement results. Further research is going to focus on the development of a comprehensive methodology for instrumental inspection of wooden structures using the drilling resistance measurement method.

Keywords: wooden designs, wood, wood quality, structural timber, non-destructive testing, building structural survey, in-situ assessment, resistograph.

Введение. Обследование и мониторинг технического состояния деревянных конструкций регламентируются нормативной

документацией: ГОСТ 31937–2011², СП 13-102–2003³. В документах описана методика обследования, основанная на визуальной оценке состояния деревянных конструкций

¹ Работа выполнена с использованием ресурсов ЦКП «Экология, биотехнологии и процессы получения экологически чистых энергоносителей» Поволжского государственного технологического университета (Йошкар-Ола) при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение № 075-15-2021-674/3).

² ГОСТ 31937–2011. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния. М.: МНТКС, 2011. 89 с.

³ СП 13-102–2003. Правила обследования несущих строительных конструкций зданий и сооружений. М.: Госстрой России, ГУП ЦПП, 2003. 27 с.

и определении прочностных свойств образцов древесины, изготавливаемых непосредственно из элементов конструкций. При этом визуальная оценка носит субъективный характер, а изъятие образцов для испытания в лабораторных условиях существенно увеличивает трудозатраты процесса обследования и может привести к ослаблению элементов конструкции в целом. В связи с этим на практике расширяется применение неразрушающих методов и средств контроля качества древесины и технического состояния деревянных конструкций. Наибольшее распространение получили акустические и механические методы неразрушающего контроля, использование которых зависит от наличия и опыта применения средств измерений, а также поставленных задач обследования [1–4]. Прослеживается и некоторое отставание отечественных нормативных документов в направлении практического применения методов инструментального неразрушающего контроля для оперативного обследования и оценки технического состояния древесины и деревянных конструкций.

Одним из перспективных методов неразрушающего контроля является метод измерения сопротивления сверлению. Метод основан на измерении энергосиловых параметров процесса сверления древесины тонкими буровыми сверлами и позволяет с высокой точностью косвенно определить плотность и деформативность древесины, расположение скрытых пороков и остаточное сечение элементов конструкции при поражении гнилями или после пожара [5–11]. На сегодняшний день метод измерения сопротивления сверлению с целью инспектирования деревянных строительных конструкций широко применяется в странах Европейского союза и Северной Америки.

Результаты обследования стропильной конструкции исторического здания при использовании устройства IML F300-S путем измерения сопротивления сверлению при-

ведены в работе [12]. Авторы установили характерные участки профилей сопротивления сверлению для основных пороков конструкционной древесины, а также отметили преимущества использования метода и устройства для обнаружения трещин в элементах деревянных конструкций.

В работе [7] представлена методика оперативной оценки технического состояния элементов деревянных конструкций исторических зданий. В соответствии с рекомендациями метод измерения сопротивления сверлению может быть использован для оценки потери массы и плотности древесины при воздействии дереворазрушающих грибов, остаточного эффективного сечения и геометрических характеристик скрытых элементов узловых соединений, а также интенсивности поражения древесины насекомыми. Расширенные результаты такого исследования опубликованы в статье [13].

Преимущества и перспективы применения метода измерения сопротивления сверлению для оценки элементов деревянных мостов представлены в работах [3] и [14]. Авторами предложена методика интерпретации профилей сопротивления древесины сверлению с оценкой степени деструкции древесины гнилями исследуемых пород (для элементов конструкций мостов из дугласовой пихты и сосны короткохвойной).

В работе [15] показаны результаты восстановления поврежденных гнилью элементов конструкции зданий и сооружений из древесины. При этом с целью точного определения глубины деструкции древесины авторами использовалось устройство для измерения сопротивления сверлению Resistograph 4453-S.

Результаты применения комплекса методов и средств неразрушающего контроля для оценки степени деструкции древесины гнилями при обследовании деревянных стропильных ферм здания XVIII века обобщены в работе [16]. Наиболее точными ме-

годами для определения плотности древесины в деревянных конструкциях названы методы измерения сопротивления сверлению и проникновения штифтов. При этом установлено, что модуль упругости с достаточной достоверностью может быть определен ультразвуковым методом.

Устройство для измерения сопротивления сверлению PD 400 и метод нечеткой математики были использованы в работе [17] для оценки плотности древесины в деревянных конструкциях исторического здания.

Следует отметить, что в ряде представленных выше и других исследованиях, проводившихся в данном направлении, измерения проходили в лабораторных условиях, а унифицированной методики, общих правил и рекомендаций при проведении обследований деревянных конструкций методом измерения сопротивления сверлению в работах не представлено. Причиной этого может быть использование устройств для измерения сопротивления сверлению различных моделей и производителей, а также сложность объективной оценки результатов измерений.

Цель работы: обоснование рациональных параметров процесса сверления древесины тонкими буровыми сверлами при оценке внутреннего состояния древесины в балках перекрытий неразрушающим методом измерения сопротивления сверлению.

Материалы и методы. Исследования проводились с использованием деревян-

ных балок межэтажных перекрытий эксплуатируемого здания учебного заведения, расположенного в городе Йошкар-Оле [56°64'16" с. ш., 47°88'09" в. д.]. Здание находится в эксплуатации с 1936 года, при этом балки перекрытия выполнены в виде сдвоенного четырехкантного бруса из древесины сосны (*Pinus sylvestris* L.) с номинальным поперечным сечением 200×200 (h) мм и длиной 6 м (рис. 1). Брусья скреплены между собой с шагом в один метр стальными шпильками и косыми деревянными шпонками, обеспечивающими передачу изгибающего момента от одного бруса другому. В исследованиях были использованы 18 балок межэтажных перекрытий, опирающихся на кирпичные стены.

Инструментальная оценка внутреннего состояния древесины в балках включала определение влажности древесины на участках примыкания балок к стенам при помощи влагомера GANN HT 85 T (GANN Mess-u. Regeltechnik GmbH, Германия) по ГОСТ 16588–91 (при этом иглы измерителя влажности углублялись в древесину не менее чем на 20 мм), а также измерение величин сопротивления сверлению и подачи тонкого сверла на участках опирания балок на несущие стены (рис. 2) при помощи мобильного устройства IML-RESI PowerDrill 400 (IML System GmbH, Вислох, Германия).

Для исследований использовались тонкие буровые сверла длиной 520 мм, с диаметром хвостовика 1,5 мм и диаметром

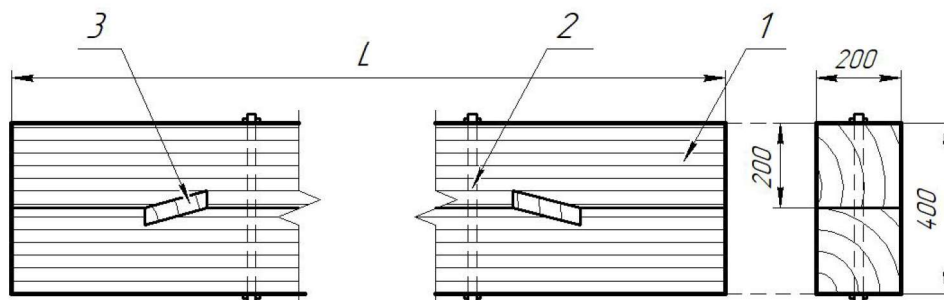


Рис. 1. Конструкционная схема исследуемых балок перекрытий: 1 — четырехкантный брус сечением 200×200 (h) мм; 2 — стальная шпилька; 3 — косая деревянная шпонка

режущей части 3 мм. Режущая часть сверла имеет направляющий центр и два подрезателя. Скоростные параметры процесса сверления характеризовались частотой вращения 2500 об/мин и скоростями подачи 0,5 и 1 м/мин. Сверление производилось снизу вверх (см. рис. 2), с отступом от стены примерно 5 см под углами 65–75° и 90° к продольной оси балки. Обработка данных осуществлялась в программном комплексе PD-ToolsPro.

Основные этапы исследования: определение влажности древесины исследуемых балок; выбор скоростных параметров просверливания древесины тонким буровым сверлом с учетом породы и влажности древесины; проведение измерений сопротивления сверлению на выбранных участках балок перекрытий; анализ полученных профилей сопротивления сверлению; разработка рекомендаций по использованию метода измерения сопротивления сверлению для оценки качества и внутреннего состояния древесины в конструкциях.

Результаты и их обсуждение. Один из параметров, влияющих на сопротивление

древесины сверлению, — влажность [19]. По результатам проведенных исследований деревянных балок перекрытий влажность древесины варьировалась в диапазоне от 5,2 до 11 % (среднее значение 7,8; коэффициент вариации 16,5), что соответствует нормальным условиям эксплуатации в соответствии со СНиП II-25–80⁴ (не более 12 %). Вариация влажности древесины вызвана выбором мест измерений, при этом большая величина влажности наблюдалась у мест опирания балок на наружные стены здания, а меньшая — у балок, расположенных рядом с трубами системы отопления. Измерения проводились в зимний период, что являлось дополнительным фактором возможного конденсационного увлажнения участков балок, опирающихся на наружные стены здания. В соответствии с результатами исследований, представленных в работе [18], влажность древесины в пределах 12 % при используемых в исследовании скоростных параметрах процесса сверления (частота вращения 2500 об/мин, скорости подачи 0,5 и 1 м/мин)

⁴ СП 64.13330.2017. Деревянные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-25–80. М., 2017. 91 с.



Рис. 2. Процесс измерения сопротивления сверлению мобильным устройством PowerDrill 400 при обследовании межэтажных балок перекрытий

не оказывает значимого влияния на определение свойств древесины методом измерения сопротивления сверлению.

Для каждой балки перекрытий были получены профили сопротивления сверлению. На рис. 3 представлены типичные профили сопротивления сверлению и подаче тонкого бурового сверла для одной из исследуемых деревянных балок перекрытия в случае сверления под углом 90° к продольной оси балки. По профилю можно определить характерные участки просверливания соединенных брусьев — нижний 1 и верхний 2 брусья, небольшой зазор между смежными брусьями 3, трещину в нижнем бруссе 4, а также локальное увеличение плотности 5, вероятно, представляющее собой участок просверливания здорового сучка древесины. Колебания величин профилей сопротивления сверлению и подаче являются следствием просверливания участков ранней и поздней древесины, имеющих разную плотность [1, 6, 18]. При этом профиль просверливания второго бруса включает прохождение сверла через его сердцевинную часть с широкими годичными слоями древесины (см. рис. 3).

Обобщенные результаты измерений сопротивления сверлению и подаче, а также соответствующие им плотность и модуль упругости при статическом изгибе (при нормализованной влажности) представлены в таблице.

Средние значения сопротивления сверлению для скорости подачи 1 м/мин составили 16,0 %, в случае скорости подачи 0,5 м/мин — 12,1 %. Непропорциональное увеличение сопротивления древесины сверлению при двукратном увеличении скорости подачи тонкого бурового сверла связано с особенностями процесса резания древесины [8]. Это обстоятельство должно учитываться при сравнении результатов исследований с различными скоростными параметрами процесса сверления тонкими буровыми сверлами. При этом увеличение скорости подачи имело

обратный эффект для сопротивления подаче, которое уменьшилось в среднем с 16,3 % при 0,5 м/мин до 12,3 % при 1 м/мин. В данном случае решающее значение имели конструктивные особенности тонкого бурового сверла, что согласовывается с ранее полученными результатами [8]. Различный эффект влияния скорости подачи на сопротивление сверлению и подаче вносит сложности в интерпретацию результатов исследования. Вместе с тем параметр сопротивления сверлению носит приоритетный характер ввиду более тесной корреляции с плотностью и деформативностью древесины [9]. В случае обследования сосновых балок перекрытий со средней влажностью 7,8 % частота вращения 2500 мин^{-1} и скорость подачи 1 м/мин имеют преимущества на основании более высокой амплитуды профиля сопротивления сверлению и возможности идентификации участков с пороками древесины на данном профиле. Для древесины сосны оптимальной величиной скорости подачи тонкого бурового сверла, обеспечивающей максимальную точность (R^2) прогнозирования плотности и деформативности древесины, является скорость в диапазоне

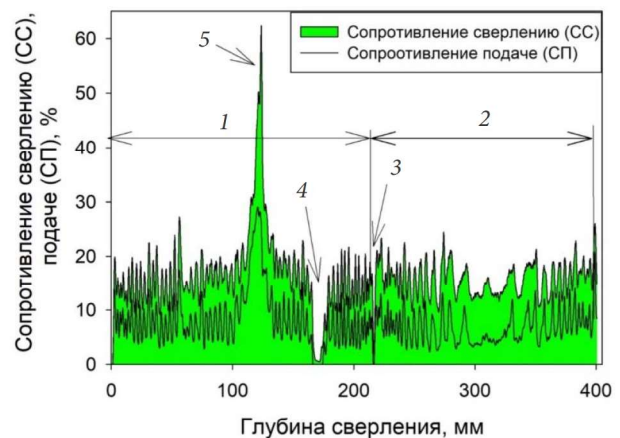


Рис. 3. Типичные профили сопротивления сверлению и подаче тонкого бурового сверла для сдвоенной деревянной балки перекрытия при сверлении под углом 90° к продольной оси балки (1 — нижний брус; 2 — верхний брус; 3 — зазор между брусьями; 4 — трещина; 5 — сучок)

Средние значения величин сопротивления сверлению (СС (DR) %), подаче (СП (FR) %), плотность древесины (ρ_{12} , кг/м³) и модуль упругости при статическом изгибе (E_{12}) для древесины балок перекрытий из сосны при скоростях подачи тонкого бурового сверла 1 и 0,5 м/мин (C_v СС и C_v СП — коэффициенты вариации величин (профиля) сопротивления сверлению и подаче соответственно)

№	СС (DR), %	C_v СС	СП (FR), %	C_v СП	ρ_{12}	E_{12}	Средние значения			
							СС (DR), %	C_v СС	СП (FR), %	C_v СП
							1 м/мин			
							0,5 м/мин			
1	17,3	15,4	10,7	32,8	561	12 951	10,4	20,3	17,9	30,3
2	16,0	14,3	10,1	43,6	543	11 904	15,4	25,8	11,5	40,1
3	15,5	16,7	4,1	66,8	536	11 502	11,8	25,9	17,1	37,2
4	15,0	32,3	9,0	55,0	530	11 099	11,1	19,5	12,6	27,7
5	15,2	21,5	8,0	42,8	532	11 260	11,8	19,0	17,3	28,8
6	19,7	20,6	14,6	38,0	593	14 882	14,0	18,8	16,7	27,2
7	15,7	23,7	10,7	39,7	539	11 663	8,6	27,8	11,0	37,0
8	14,6	25,9	9,6	39,5	524	10 778	8,5	28,4	9,6	46,4
9	20,6	22,9	14,8	31,2	605	15 607	9,9	18,8	12,2	25,8
10	16,6	32,8	13,7	54,3	551	12 387	12,4	17,3	10,8	22,3
11	14,6	35,0	11,6	60,6	524	10 778	16,2	15,9	24,1	24,6
12	14,8	25,1	10,9	32,2	527	10 939	12,3	20,2	16,6	28,6
13	20,7	22,9	14,9	31,1	606	15 687	12,2	13,2	19,9	17,6
14	17,1	32,2	26,4	53,6	558	12 790	13,4	20,0	24,5	32,3
15	13,3	25,3	13,6	32,6	507	9731	13,9	16,7	22,6	22,4
16	15,2	14,6	17,5	25,7	532	11 260				
17	14,2	18,3	17,6	32,2	519	10 456				
18	13,9	24,9	17,4	39,0	515	10 214				

1–1,5 м/мин [18]. Следует также отметить, что вариация сопротивления подаче почти в два раза выше, чем вариация сопротивления сверлению (см. таблицу). Это может быть связано с большей ошибкой измерений данной величины или большим влиянием колебаний плотности древесины в пределах годичного слоя на данный параметр. Изучение данного эффекта запланировано в последующих исследованиях.

Используемые в исследовании балки не имели на поверхности грибных поражений, а установленные средние значения сопротивления сверлению для двух скоростей подачи (16,0 и 12,1 %) могут быть использованы в качестве ориентиров наличия гнилей при последующих исследованиях внутреннего состояния древесины. При этом регрессионные зависимости, представленные в работе [9], позволяют оценить деформативность древесины при статическом изгибе

и плотность на основе данных сопротивления сверлению и подаче тонкого бурового сверла (см. таблицу). Полученное среднее значение сопротивления сверлению для скорости подачи 1 м/мин соответствует плотности древесины при нормализованной влажности 544 кг/м³ и модулю упругости при статическом изгибе (в тангенциальном направлении) 11 994 МПа, что согласуется со справочными значениями данных параметров для древесины сосны, не пораженной гнилью.

Степень износа тонкого бурового сверла может являться причиной снижения точности определения свойств и внутреннего состояния древесины [20, 21]. Одним из примеров просверливания древесины затупленным сверлом является профиль сверления при скорости подачи 1 м/мин, представленный на рис. 4 и в таблице (строка 14). В данном случае резко возрастает значение

сопротивления подаче, что, в свою очередь, согласуется с результатами, представленными в работе [20]. Вместе с тем картина вариации свойств древесины в пределах годичных слоев не теряет своей информативности. Сверление производилось под углом 63° к продольной оси балки. На профиле можно наблюдать просверливание нижнего бруса 1, проход сверлом полости 2 и контакт тонкого бурового сверла со штукатурным слоем или кирпичной кладкой стены 3, что привело к выходу тонкого бурового сверла из работоспособного состояния и потребовало его замены. Высокие величины сопротивления подаче при использовании затупленных сверл, а также условия обследования балок перекрытий при просверливании снизу вверх могут являться причиной остановки процесса измерения ввиду перегрузки привода подачи устройства PD 400 или отжатия концевого выключателя устройства при недостаточных усилиях его прижима к балке.

Подобный характер профилей, как на рис. 4, был получен при исследовании нескольких межэтажных деревянных балок, где сверление происходило под углом $65\text{--}75^\circ$ к продольной оси балки. В случае, если бы траектория движения тонкого бурового сверла была геометрически прямоли-

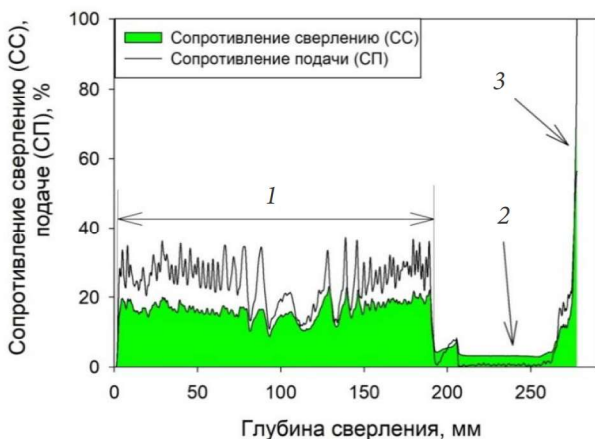


Рис. 4. Профиль сопротивления сверлению деревянной балки перекрытия под углом 63° к продольной оси балки: 1 — нижний брус; 2 — полость; 3 — штукатурный слой или кирпичная кладка

нейной в теле балки (линия 1 на рис. 5), то на профиле сопротивления сверлению наблюдалась бы картина, аналогичная типовому профилю, представленному на рис. 3.

На наш взгляд, при сверлении тонкими буровыми сверлами под углом к направлению волокон происходит отклонение сверла от прямолинейной траектории, что может ввести в заблуждение эксперта или исследователя при анализе результатов измерений. Это, вероятно, связано с тем, что сверло в процессе сверления смещается в зону наименьшей плотности, т. е. к ранней древесине годичного слоя, и, как результат, происходит его отклонение от прямолинейности в сторону направления волокон.

Закключение. Метод измерения сопротивления сверлению может быть рекомендован в качестве инструментального метода неразрушающего контроля внутреннего состояния древесины в балках перекрытий. При обследовании элементов конструкций из древесины хвойных пород рекомендуется осуществлять просверливание перпендикулярно направлению волокон древесины. В целях снижения вероятности преждевременного выхода тонкого бурового сверла из строя (его повреждения) и в условиях отсутствия визуального контроля выхода сверла из объекта обследования рекомендуется осуществлять контроль величины его

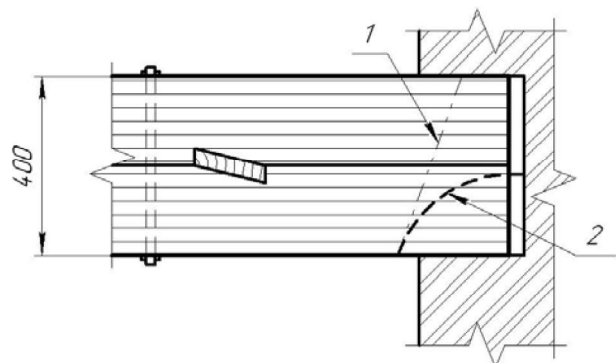


Рис. 5. Траектории просверливания тонким буровым сверлом под углом к направлению волокон: 1 — теоретическая прямолинейная траектория; 2 — фактическая криволинейная траектория

заглубления (предустановку глубины сверления на устройстве). При использовании метода измерения сопротивления сверлению следует производить визуальный контроль работоспособности режущих кромок тонких буровых сверл, чтобы избежать высоких амплитуд величины сопротивления сверлению и подаче. Обследование балок перекрытий из древесины сосны с влажностью до 12 % рекомендуется проводить при частоте вращения тонкого бурового сверла 2500 мин⁻¹ и скорости подачи 1 м/мин.

Дальнейшие исследования будут направлены на совершенствование комплексной методики инструментального обследования деревянных конструкций с применением метода измерения сопротивления сверлению, включая развитие исследований в направлении установления взаимосвязей параметров сверления с прочностными и технологическими свойствами древесины.

Библиографический список

1. Tannert T., Anthony R., Kasal B., Kloiber M., Piazza M., Riggio M., Rinn F., Widmann R., Yamaguchi N. In situ assessment of structural timber using semi-destructive techniques // *Materials and Structures*. 2014. Vol. 47. Pp. 767–785.
2. Riggio M., Anthony R. W., Augelli F., Kasal B., Lechner T., Muller W., Tannert T. In situ assessment of structural timber using non-destructive techniques // *Materials and Structures*. 2014. Vol. 47. Pp. 749–766.
3. White R. H., Ross R. J. (Eds.) *Wood and timber condition assessment manual: second edition*. General Technical Report FPL-GTR-234. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2014. 93 p.
4. Vössing K. J., Niederleithinger E. Nondestructive assessment and imaging methods for internal inspection of timber. A review // *Holzforschung*. 2018. Vol. 72 (6). Pp. 467–476.
5. Kappel R., Mattheck C. Inspection of timber construction by measuring drilling resistance using Resistograph F300-S // *WIT Transactions on the Built Environment*. 2003. Vol. 66. Pp. 825–834.
6. Rinn F. Basics of micro-resistance drilling for timber inspection // *Holztechnologie*. 2012. Vol. 53 (3). Pp. 24–28.
7. Cruz H., Yeomans D., Tsakanika E., Macchioni N., Jorissen A., Touza M., Mannucci M., Lourenço P. B. Guidelines for On-Site Assessment of Historic Timber Structures // *International Journal Architectural Heritage*. 2014. Vol. 9 (3). Pp. 277–289.
8. Sharapov E., Brischke C., Militz H., Toropov A. Impact of drill bit feed rate and rotational frequency on the evaluation of wood properties by drilling resistance measurements // *International Wood Products Journal*. 2019. Vol. 10 (5). Pp. 128–138. DOI: doi.org/10.1080/20426445.2019.1688455.
9. 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 (5). Pp. 833–842. DOI: doi.org/10.1007/s00107-019-01439-2.
10. Abraldes P., Cabaleiro M., Sousa H. S., Branco J. M. Use of polar coordinates for improving the measurement of resistant cross-sections of existing timber elements combining laser scanner and drilling resistance tests // *Measurement*. 2022. Vol. 204 (Part 5). 112027. DOI: doi.org/10.1016/j.measurement.2022.112027.
11. Черных А. Г., Миронова С. И., Данилов Е. В., Серова Т. А. Влияние деструкторов на динамику накопления повреждений деревянных конструкций // *Вестник гражданских инженеров*. 2022. № 3 (92). С. 35–43.
12. 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 Architectural Heritage*. 2014. Vol. 8 (2). Pp. 213–223.
13. Nocetti M., Mannucci M., Brunetti M. (2023) Automatic assessment of insect degradation depth in structural solid wood elements by drilling resistance measurements // *Construction and Building Materials*. 2023. Vol. 336. 130273. DOI: doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.130273.
14. Brashaw B. K., Vatalaro R. J., Wacker J. P., Ross R. J. Condition assessment of timber bridges. 1. Evaluation of a micro-drilling resistance tool. General Technical Report FPL-GTR-159. Madison, WI: USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, 2005. 8 p.
15. 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 (2). 550 p.
16. Yu T. Y., Sousa H. S., Branco J. M. Combination of non-destructive tests for assessing decay in existing timber elements // *Nondestructive Testing and Evaluation*. 2020. Vol. 35 (1). Pp. 29–47.

17. Li X., Qian W., Chang L. Analysis of the density of wooden components in ancient buildings by micro-drilling resistance, using information diffusion // *BioResources*. 2019. Vol. 14 (3). Pp. 5777–5787.

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

19. Sharapov E., Brischke C., Militz H., Smirnova E. Combined effect of wood moisture content, drill bit rotational speed and feed rate on drilling resistance measurements in Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) // *Wood Material Science and Engineering*. 2018. Vol. 15 (1). Pp. 198–204. DOI: doi.org/10.1080/17480272.2018.1557249.

20. Sharapov E., Wang X., Smirnova E., Wacker J. P. Wear behavior of drill bits in wood drilling resistance measurements // *Wood and Fiber Science*. 2018. Vol. 50 (2). Pp. 154–166. DOI: doi.org/10.22382/wfs-2018-017.

21. Nowak T. P., Jasieńko J., Hamrol-Bielecka K. In situ assessment of structural timber using the resistance drilling method – Evaluation of usefulness // *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 102. Pp. 403–415.

References

1. Tannert T., et al. In situ assessment of structural timber using semi-destructive techniques. *Materials and Structures*, 2014, vol. 47, pp. 767–785.

2. Riggio M., et al. In situ assessment of structural timber using non-destructive techniques. *Materials and Structures*. 2014, vol. 47, pp. 749–766.

3. White R. H., Ross R. J. (Eds.) *Wood and timber condition assessment manual: second edition*. General Technical Report FPL-GTR-234. Madison, WI, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2014, 93 p.

4. Vössing K. J., Niederleithinger E. Non-destructive assessment and imaging methods for internal inspection of timber. A review. *Holzforschung*, 2018, vol. 72 (6), pp. 467–476.

5. Kappel R., Mattheck C. Inspection of timber construction by measuring drilling resistance using Resistograph F300-S. *WIT Transactions on the Built Environment*, 2003, vol. 66, pp. 825–834.

6. Rinn F. Basics of micro-resistance drilling for timber inspection. *Holztechnologie*, 2012, vol. 53 (3), pp. 24–28.

7. Cruz H., et al. Guidelines for On-Site Assessment of Historic Timber Structures. *International Journal of Architectural Heritage*, 2014, vol. 9 (3), pp. 277–289.

8. Sharapov E., Brischke C., Militz H., Toropov A. Impact of drill bit feed rate and rotational frequency on

the evaluation of wood properties by drilling resistance measurements. *International Wood Products Journal*, 2019, vol. 10 (5), pp. 128–138. DOI: doi.org/10.1080/20426445.2019.1688455.

9. 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 (5), pp. 833–842. DOI: doi.org/10.1007/s00107-019-01439-2.

10. Abalde P., Cabaleiro M., Sousa H. S., Branco J. M. Use of polar coordinates for improving the measurement of resistant cross-sections of existing timber elements combining laser scanner and drilling resistance tests. *Measurement*, 2022, vol. 204 (Pt. 5). 112027. DOI: doi.org/10.1016/j.measurement.2022.112027.

11. Chernykh A. G., Mironova S. I., Danilov E. V., Serova T. A. *Vliyanie destruktirov na dinamiku nakopleniya povrezhdeniy derevyannykh konstruksiy* [Influence of destructors on the dynamics of damage accumulation in wooden structures]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2022, no. 3 (92), pp. 35–43.

12. 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 Architectural Heritage*, 2014, vol. 8 (2), pp. 213–223.

13. 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. 336, 130273. DOI: doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.130273.

14. Brashaw B. K., Vatalaro R. J., Wacker J. P., Ross R. J. Condition assessment of timber bridges. 1. Evaluation of a micro-drilling resistance tool. General Technical Report FPL-GTR-159. Madison, WI: USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, 2005, 8 p.

15. 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 (2), 550 p.

16. Yu T. Y., Sousa H. S., Branco J. M. Combination of non-destructive tests for assessing decay in existing timber elements. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 2020, vol. 35 (1), pp. 29–47.

17. Li X., Qian W., Chang L. Analysis of the density of wooden components in ancient buildings by micro-drilling resistance, using information diffusion. *Bio Resources*, 2019, vol. 14 (3), pp. 5777–5787.

18. Sharapov E. S. *Sovershenstvovanie metodov i sredstv kvazinerazrushayushchego kontrolya fiziko-mekhanicheskikh svoystv drevesiny i drevesnykh materialov. Diss. dokt. tekhn. nauk* [Improvement of methods and

means of quasi-non-destructive control of physical and mechanical properties of wood and wood-based materials. Dr. Sci. Tech. diss.]. Arkhangel'sk, 2020, 340 p.

19. Sharapov E., Brischke C., Militz H., Smirnova E. Combined effect of wood moisture content, drill bit rotational speed and feed rate on drilling resistance measurements in Norway spruce (*Picea abies* (L.) (Karst.)). *Wood Material Science and Engineering*, 2018, vol. 15 (1), pp. 198–204. DOI: doi.org/10.1080/17480272.2018.1557249.

20. Sharapov E., Wang X., Smirnova E., Wacker J. P. Wear behavior of drill bits in wood drilling resistance measurements. *Wood and Fiber Science*, 2018, vol. 50 (2), pp. 154–166. DOI: doi.org/10.22382/wfs-2018-017.

21. Nowak T. P., Jasieńko J., Hamrol-Bielecka K. In situ assessment of structural timber using the resistance drilling method – Evaluation of usefulness. *Construction and Building Materials*, 2016, vol. 102, pp. 403–415.