

Экспериментальное исследование вклеенного вдоль волокон древесины стержня

Филипп Сергеевич Школяр, Александр Григорьевич Никитин,
Александра Игоревна Зацепина

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ);
г. Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Объект исследования — образцы клееной древесины с вклеенным в каждый образец арматурным стержнем периодического профиля. Предмет исследования — значения сопротивления древесины выдергиванию или продавливанию вклеенного вдоль волокон стержня, податливость данного соединения. Целью является вычисление сопротивления по результатам испытаний и сравнение полученного значения с нормативным, а также оценка податливости соединения. Актуальность обусловлена широким применением в строительстве конструкций из клееной древесины и узлов соединения на вклеенных стержнях. Полученные данные могут быть использованы в построении расчетных моделей и в расчете узлов.

Материалы и методы. Применены эксперимент и расчетные методы.

Результаты. Эксперимент проводился ступенчатой нагрузкой вплоть до разрушения, произошедшего вследствие скалывания вдоль волокон деревянного элемента на границе клеевой шов — деревянный элемент. По результатам исследования пяти образцов получены значения полных деформаций для каждой ступени нагружения. По этим данным вычислены и занесены в таблицу значения сопротивления древесины и податливости для каждого образца. Рассчитано нормативное значение сопротивления древесины, которое превысило значение, указанное в своде правил. Также получено численное нормативное значение податливости.

Выводы. Превышение сопротивления, полученного в результате эксперимента, значению в нормативном документе свидетельствует о применимости последнего, при этом будет обеспечен запас прочности. В расчете уникальных конструкций по специальным техническим условиям возможно применение увеличенного значения сопротивления, полученного по результатам эксперимента. Податливость у соединения, выполненного посредством вклеивания стержня вдоль волокон, мала, но есть. В деревянных конструкциях полностью от нее уйти не представляется возможным.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: клееная древесина, вклеенный стержень, жесткий стык, сопротивление выдергиванию, сопротивление продавливанию, податливость

Благодарности. Авторы выражают благодарность анонимным рецензентам.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Школяр Ф.С., Никитин А.Г., Зацепина А.И. Экспериментальное исследование вклеенного вдоль волокон древесины стержня // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 12. С. 1915–1925. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.12.1915-1925

Автор, ответственный за переписку: Александра Игоревна Зацепина, zatssepina.aleksandra@yandex.ru.

Experimental research of a rod glued along wood fibres

Filipp S. Shkoliar, Aleksandr G. Nikitin, Aleksandra I. Zatssepina

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU); St. Petersburg, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The objects of the research are experimental specimens of glued laminated wood with a steel rod glued along the wood fibres in each of them. The subject of the research is the values of resistance of wood to pulling out or push-through of the rod glued along the fibres, as well as the compliance of the joint. The goal of the research is to calculate the resistance according to the test results and compare the obtained value with normative data. The relevance of the research is due to the widespread application in construction of glued wood structures and joints on glued rods. The obtained data can be used in calculation models and in the calculation of nodes.

Materials and methods. Experiment and calculation methods are used in the research.

Results. The results of five specimens were used to obtain the values of total deformations for each stage of loading. It occurred due to chipping of the wooden element along the fibres at the border of the adhesive joint and the wood. Wood resistance and compliance values for each specimen were calculated and tabulated. The normative value of wood resistance was obtained. It exceeded the value specified in the normative document data. A numerical normative value of compliance was also obtained.

Conclusions. The excess of the resistance obtained from the experiment over the value in the normative document indicates its applicability with provided safety factor. In the calculation of unique structures according to special technical specifications, it is possible to use an increased resistance value obtained as the result of the experiment. The compliance of a rigid joint on rods glued along the fibres is small. In wooden structures it is not possible to avoid it completely.

KEYWORDS: glued laminated wood, glued rod, rigid joint, pull-out resistance, push-through resistance, compliance

Acknowledgements. The team of authors express gratitude to anonymous reviewers.

FOR CITATION: Shkoliar F.S., Nikitin A.G., Zatsepina A.I. Experimental research of a rod glued along wood fibres. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(12):1915-1925. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.12.1915-1925 (rus.).

Corresponding author: Aleksandra I. Zatsepina, zatsepina.aleksandra@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Применение деревянных конструкций (ДК) во многих отраслях народного хозяйства, а также в производственных зданиях экономически целесообразно. По сравнению с железобетонными оно дает возможность уменьшить расход стали в 1,5–2,5 раза, трудоемкость монтажа до 2,5 раз. Снижение общего веса здания в 2,0–2,5 раза позволяет сократить расходы на транспортировку конструкций, в условиях России это обретает значимость, поскольку можно доставлять конструкции в удаленные сельские районы и активно развивающиеся районы Дальнего Востока и Сибири [1, 2].

Особое внимание стоит уделить существенному экономическому эффекту, который возникает при использовании ДК в зданиях и сооружениях со средней различной степени химической агрессивности, в частности в складах реагентов и минеральных удобрений, бассейнах, открытых пространствах, где срок эксплуатации зданий и сооружений увеличивается в 2–3 раза, а их стоимость снижается на 30 % [3].

Перспективность данного вида конструкций обуславливает возможность применения в большепролетных зданиях и сооружениях, в которых древесина используется наиболее эффективно.

В то же время с применением большепролетных зданий и сооружений актуальным становится вопрос использования узловых соединений, позволяющих обеспечить высокую несущую способность и жесткость. Благодаря большой прочности и компактности решений стыки могут устраиваться без: дополнительных накладок, увеличения габаритов конструкций, серьезного увеличения материалоемкости конструкций. Это снимает транспортные и в значительной степени технологические проблемы клееных деревянных конструкций (КДК) [4].

На эффективность конструктивных решений в основном влияют следующие качественные характеристики соединений: конструктивные, технологические, функциональные и эксплуатационные показатели. Указанные показатели воздействуют неодинаково, так как они зависят от особенностей строительных конструкций, из-за чего оценка их

достоинств и недостатков достаточно условна. В конечном итоге эффективность производимых конструкций определяется комплексом свойств. М.С. Золотов, Г.Н. Зубарев, Ю.М. Иванов, Л.М. Ковальчук, А.В. Калугин рассматривают опыт применения стальных элементов в соединениях ДК, в том числе с точки зрения их деформационных характеристик, как наиболее важного показателя, который определяет жесткость и эксплуатационную надежность возводимых зданий и сооружений в целом [5–10].

История активного применения КДК в России насчитывает более четырех десятилетий. В конце 70-х годов прошлого столетия в СССР удалось развить эту новую на тот момент отрасль, однако возникла проблема нехватки конструкторского и производственного опыта, в связи с чем на практике встречались частые аварии конструкций. Для решения данной проблемы были организованы филиалы Центрального научно-исследовательского института строительных конструкций (ЦНИИСК) им. В.А. Кучеренко в г. Волоколамске и в г. Нелидово, а в отраслевых НИИ — специальные отделы по исследованию и проектированию КДК. Обследование аварийных конструкций и их последующий анализ показали, что причины возникновения аварийных ситуаций в большинстве своем были схожи, это — ошибки в проектировании, нарушения в процессе изготовления, хранения и эксплуатации.

Как правило, разрушение происходило в результате недостаточной сдвиговой прочности клееной древесины из-за трещин в клеевых швах и неполного заполнения клеевым составом. Развитие аварийной ситуации происходило в две стадии. Первая стадия — сдвиг в середине высоты сечения или по другим плоскостям, в которых наблюдалось расслоение. Вторая — разрушение от изгиба ослабленного элемента составного сечения, у которого резко снижался момент сопротивления его сечения.

Для исправления этого положения в условиях массового производства наметили одновременно два пути: усиление конструкций в целях повышения сдвиговой прочности и совершенствования узловых соединений с проведением необходимых исследований; дифференцированное изучение при-

роды отказов, совершенствование технологических операций изготовления конструкций и их проектирования.

Изучением новых соединений с применением клеенных стержней занимались Г.Н. Зубарев и С.Б. Турковский [11–13]. В результате попыток повысить сдвиговую прочность и надежность конструкций ученые пришли к использованию клеенных стержней под углом 30–45 градусов к направлению волокон, что позволило решить многие проблемы, описанные выше. Их начали применять для усиления всех изгибаемых и сжато-изгибаемых элементов, что практически исключило аварийные случаи из-за недостаточной сдвиговой прочности. С появлением таких соединений удалось получить равнопрочные жесткие стыки и узлы, в том числе для большепролетных конструкций, которым не было аналогов.

В дальнейших исследованиях большое внимание уделялось анализу работы подобных узлов. В этот период Н.Д. Пospelov провел ряд исследований, которые позволили определить различные факторы, влияющие на работу соединений на клеенных стержнях. Были сделаны выводы о том, что такие узлы хорошо работают при динамических нагрузках [14].

В настоящее время в России теоретические и экспериментальные работы в области соединений деревянных конструкций с применением стальных элементов, в том числе клеенных, ведутся в ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко (НИЦ «Строительство», г. Москва), МГСУ (г. Москва), СПбГАСУ (г. Санкт-Петербург), ПГУАС (г. Пенза) и т.д. такими учеными, как В.М. Вдовин, А.А. Погорельцев, С.Б. Турковский, А.Б. Шмидт и др. [15–17].

Нормативная методика расчета узлов на клеенных стальных стержнях была предложена группой ученых в ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко под руководством С.Б. Турковского. Методика разработана в связи с внедрением в строительную практику системы узловых соединений на клеенных стержнях и называется «система ЦНИИСК» [13, 16]. Расчет данных узловых соединений базируется на методике, предлагаемой в СП 382.1325800.2017¹.

При использовании КДК важен вопрос обеспечения преимущественно жестких узловых соединений, которые дают возможность воспринимать значительные усилия за счет их оптимального перераспределения в конструктивных элементах. Например, в опорном узле деревянной стойки возникают усилия растяжения либо растяжения с изгибом, которые являются для дерева самыми неблагоприятными. Решить эту проблему можно путем использования в узловых соединениях стальных изделий, работающих на выдергивание.

¹ СП 382.1325800.2017. Конструкции деревянные клеенные на клеенных стержнях. Методы расчета.

В связи с вышесказанным можно сделать вывод об актуальности проблемы применения жестких и в то же время компактных технологичных при изготовлении и монтаже узлов клеенных деревянных конструкций, а также использовании в них клеенных стержней.

Большой вклад в изучение параметров древесины при использовании подобных соединений внесли российские и зарубежные ученые.

T. Shchelokova изучает деформации армированных деревянных балок, отмечая, что деформация армированных балок на 15–20 % меньше, чем неармированных. Исследование также показывает влияние естественных ослаблений (таких как сучки) на напряженно-деформированное состояние [18].

Другие авторы анализируют потенциальную применимость асимметричного армирования клеенных балок гладкими и ребристыми стальными стержнями, а также базальтовыми стержнями. Эти стержни размещаются только в зоне растяжения, где древесина работает на выдергивание. По результатам исследования балки, армированные сталью, обладают на 20 % большей прочностью, чем неармированные [19].

M. Totsuka и соавт. в своей статье [20] приводят анализ поведения клееного бруса при сжатии параллельно волокнам. Особое внимание уделено зонам повреждений вблизи плит, по которым прикладывалась нагрузка. Установлено, что длина зоны повреждения зависит от точности обработки контактной поверхности и имеет тенденцию к увеличению с ростом площади контактной поверхности. Эта работа важна для понимания деформативности образцов при проведении эксперимента.

Коллективом зарубежных авторов Jockwer R., Caprio D. и Jorissen A. изучены деформации соединений с поперечно нагруженными стержнями по результатам более 750 испытаний. В статье [21] даны рекомендации по достижению различных уровней пластичности и различных значений деформаций в зависимости от расстояния между крепежными элементами и других геометрических параметров. Это, безусловно, имеет практическое значение при проектировании узлов.

S.T. Akter и соавт. численно исследуют влияние структуры годовых колец как на локальное поведение материала, так и на глобальную прочность и смещения древесины при сжатии перпендикулярно волокнам [22].

В работе [23] обсуждаются выбранные подходы к проектированию соединений в деревянных балках, нагруженных перпендикулярно волокнам, и анализируется их поведение в отношении различных геометрических параметров. Наиболее важными параметрами по результатам исследования являются: высота и ширина балки, относительная высота соединения, его ширина и высота. В случае

нескольких соединений расстояние между соседними соединениями также имеет важное значение.

В статье [24] отмечается, что из соображений безопасности всегда рекомендуется предусматривать пластическое разрушение соединений ДК. Обычно предполагается, что этого можно достичь, выполнив требования по минимальному расстоянию между крепежными элементами. Тем не менее рассматривается необходимость учитывать режимы именно хрупкого разрушения в соединениях, нагруженных параллельно волокнам, чтобы оценить их и достичь желаемой пластичности.

Моделирование поведения под нагрузкой соединений клееного LVL-элемента с одним клееным стальным стержнем при различных направлениях нагрузки к волокнам 0, 45 и 90° описывается в труде [25]. Сравнение экспериментальных и численных данных иллюстрирует потенциал подхода инженерного моделирования для преодоления недостатков действующих правил проектирования, которые не могут надлежащим образом предсказать жесткостные свойства соединений на клеенных стержнях.

Многоэтапный подход к параметризации нелинейного и анизотропного поведения податливого соединения на стальных стержнях представлен в работе [26].

В исследовании [27] приводится анализ испытаний, показывающий завышение несущей способности соединений ДК, выполненных по DIN 1052:1988, на 10–25 %. Делается вывод о том, что проектирование согласно DIN 1052:1988 не соответствует уровню надежности, требуемому на сегодняшний день. Оценки также показывают, что некоторые значения несущей способности, полученные в соответствии с Eurocode 5, могут быть увеличены.

В статье М. Steilner и Н. J. Blaß [28] отмечается, что в соединениях древесины, выполненных с помощью металлических соединительных элементов, важным параметром является момент текучести крепежа. Разработан новый метод определения угла пластического изгиба, который не зависит от пластичности или хрупкости крепежа.

Поведение соединений на стальных стержнях европейских лиственных пород путем анализа испытаний, проведенных на древесине бука и ели, описывается в публикации [29]. Отмечается, что модель, предусмотренная Eurocode 5 для учета угла действия нагрузки к волокнам, лучше, чем SIA 265, но оптимизирована только для хвойных пород. По результатам испытаний значения прочности, указанные в нормах, оказываются завышенными в случаях приложения нагрузки под углом, отличным от 0°.

Franke S. и Magnière N. проводят обзор [30] различных методов тестирования и оценки прочности древесины на продавливание. Результаты показывают значительные различия между данными

американских, европейских и международных стандартов.

Таким образом, по итогам анализа накопленного конструкторского опыта использования в ДК металлических изделий можно сделать вывод, что вопросы реальной прочности и деформативности узлов являются важными.

В научно-технической литературе отсутствуют научно обоснованные теоретические сведения, а также экспериментальные данные об опорных жестких узлах ДК с клееными вдоль волокон стержнями, также не приведены данные о реальной деформативности узла. Это обстоятельство определяет целесообразность изучения деформативности и несущей способности жесткого опорного узла деревянной стойки.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Применяются экспериментальные и расчетные методы исследования.

Цель работы — определение сопротивления древесины выдергиванию или продавливанию по результатам испытаний и сравнение полученного значения с указанным в своде правил, а также оценка податливости соединения.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Установление необходимого количества и изготовление образцов из клееной древесины, склеивание в образцы металлических стержней из арматурной стали периодического профиля.
2. Разработка схемы испытания, обеспечивающей ступенчатое приложение нагрузки. Установка индикаторов деформаций.
3. Проведение испытания образцов с фиксацией деформаций каждого образца для каждой из 16 ступеней нагружения.
4. Обработка результатов испытаний: вычисление значений сопротивления древесины R и податливости K для каждого образца.
5. Вычисление на основе экспериментальных данных нормативных значений R_n и K_n в связи с их отношением к логнормальному распределению. Сопоставление вычисленного значения R_n с указанными в своде правил.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Определение необходимого количества образцов

Минимальное количество испытываемых образцов вычисляют по формуле:

$$n_{\min} = \frac{c_v^2 t_\gamma^2}{P_\gamma^2},$$

где $c_v = 20\%$ — коэффициент вариации свойства древесины, %; $\gamma = 0,68$ — требуемая доверительная вероятность, принимается для ориентировочных

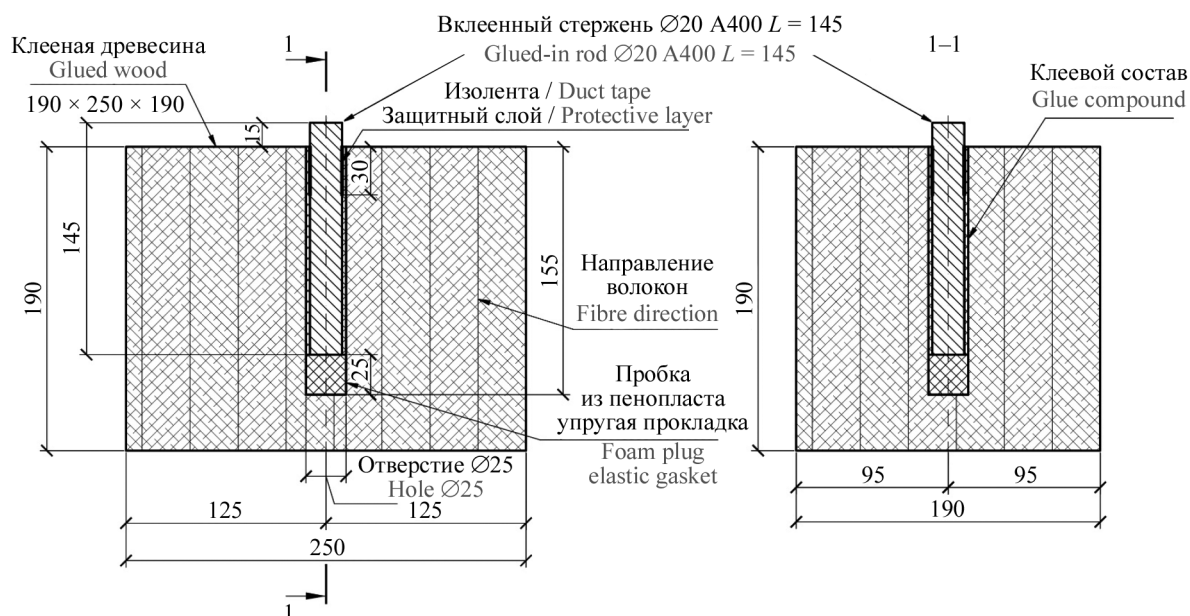


Рис. 1. Схема устройства опытного образца

Fig. 1. Scheme of specimen

испытаний²; t_γ — квантиль распределения Стюдента³; P_γ — относительная точность определения выборочного среднего с доверительной вероятностью γ , допускается принимать 10 % при коэффициенте вариации больше или равном 20 %.

Для определения нормативных значений механических свойств прием количество образцов $n = 5$ шт.

Изготовление опытных образцов

Деревянные элементы образцов для испытания изготавливаются из клееной древесины с нечетным количеством ламелей толщиной 33 мм, с расположением ламелей вертикально по ширине сечения, т.е. параллельно продольной оси стержня. Влажность древесины не превышает 12 ± 1 %. Образец выполнен из деревянного элемента с поперечным сечением 190×250 мм и длиной 190 мм.

Вклеенный стержень изготавливается из арматурной стали периодического профиля класса А400⁴. Диаметр вклеенного стержня $d = 20$ мм, длина $l = 145$ мм.

Стержни периодического профиля были вклеены вдоль волокон деревянного элемента в отверстие глубиной $l_{\text{отв}} = 155$ мм и диаметром на 5 мм

больше диаметра стержня, $d_{\text{отв}} = 25$ мм. Моделирование работы стержня в массиве конструкции достигалось путем установки на дно отверстия пробки из пенопласта высотой 25 мм, верхняя часть стержня длиной 30 мм исключалась из работы путем устройства антиадгезионного слоя на стержне из изолирующей подкладки в виде изолянта. Это позволило обеспечить расчетную длину вклеивания 100 мм или $5d$, при которой распределение касательных напряжений в клеевом шве по длине стержня близко к равномерному. Выпуск арматурного стержня из образцов выполнен длиной 15 мм. Вклеивание осуществлялось с использованием клеевого состава на основе эпоксидной смолы Этал 370 и отвердителя 45М.

Схема устройства образца для испытания представлена на рис. 1.

Испытания образцов

Согласно ГОСТ Р 58558–2019⁵ необходимо определить значение ожидаемой величины разрушающей нагрузки N_{max} по результатам предварительного испытания идентичного образца.

Испытания опытных образцов проводились в испытательной лаборатории производства компании «РУСЬ». Опытные образцы испытывались на продавливание вклеенного стержня вдоль волокон элемента из клееной древесины на прессе, развивающем усилие 60 МПа. На рис. 2 приведена

⁵ ГОСТ Р 58558–2019. Конструкции деревянные. Вклеенные стержни. Методы испытаний по определению нормативных значений механических характеристик. П. 6.3.2.

² По ГОСТ 16483.0–89. Древесина. Общие требования к физико-механическим испытаниям.

³ Принимается по приложению А ГОСТ Р 58459–2019. Конструкции деревянные. Определение нормативных и расчетных значений механических свойств древесины и материалов на ее основе.

⁴ По ГОСТ 5781–82. Сталь горячекатаная для армирования железобетонных конструкций. Технические условия.

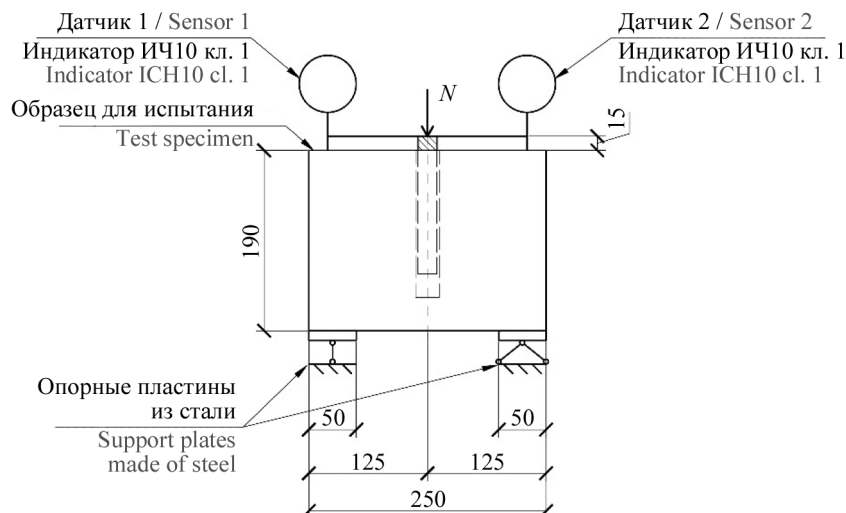


Рис. 2. Схема испытания образцов

Fig. 2. Scheme of experiment



Рис. 3. Общий вид испытательной установки

Fig. 3. General view of the test installation

схема испытания, на рис. 3 — общий вид испытательной установки.

Нагрузка на стержни прикладывалась ступенями по 4 кН до разрушения, которое во всех случаях происходило по границе клей – древесина из-за среза и скалывания древесины поперек волокон. Принимается 3 этапа режима нагружения опытных образцов:

- 1-й этап — предварительное нагружение до $0,4N_{\max} = 16$ кН;
- 2-й этап — разгрузка до $0,1N_{\max} = 4$ кН;
- 3-й этап — нагружение до разрушения.

Приложение нагрузки на образец проводилось с постоянной скоростью нагружения, которая обеспечила время до разрушения t_{\max} в пределах от 40 с до 6 мин. На рис. 4 представлен режим нагружения опытных образцов.

На рис. 5 показан график зависимости деформаций от нагрузки для одного из испытываемых об-

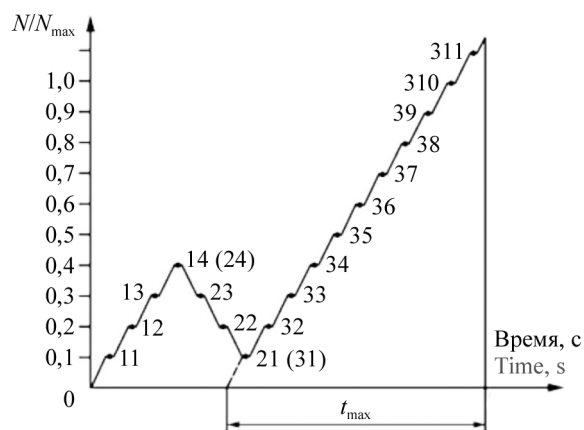


Рис. 4. Режим нагружения опытных образцов

Fig. 4. Loading mode of specimens

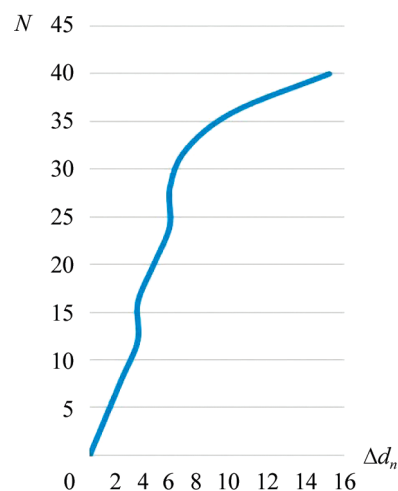


Рис. 5. Диаграмма зависимости разности полных деформаций для образца № 1

Fig. 5. Full strain difference diagram for specimen No. 1

разцов. Исходя из характера диаграмм, полученных в результате проведения эксперимента, можно сделать вывод, что данное соединение до нагрузки 30–35 кН работает близко к линейному в упругой стадии. После прохождения нагрузки 35 кН начинается стремительный рост деформаций и резкое падение нагрузки, что говорит о хрупком характере разрушения образцов. Разрушение происходит из-за скалывания древесины по клеевому шву. Следует отметить, что конструирование подобных узлов необходимо производить с учетом того, что они должны работать в упругой стадии, ограничивая их расчетную несущую способность коэффициентами надежности.

Обработка результатов испытаний

На основании результатов испытаний для каждого образца было определено сопротивление R древесины выдергиванию или продавливанию клеенного вдоль волокон стержня по формуле:

$$R = \frac{N_{\max}}{\pi l d_{\text{отв}}},$$

где R — сопротивление древесины выдергиванию или продавливанию клеенного вдоль волокон стержня по результатам испытаний, МПа; N_{\max} — значение разрушающей нагрузки, Н; l — длина анкеровки (заделки) клеенного стержня, мм; $d_{\text{отв}}$ — диаметр отверстия под клеенный стержень, мм.

Податливость K рассчитали следующим образом:

$$K = \frac{(d_{11-14} + d_{24-21} + d_{31-34})}{3(N_{0,4} - N_{0,1})},$$

где K — податливость клеенного стержня при его выдергивании или продавливании, мм/Н; d_{11-14} , d_{24-21} , d_{31-34} — величины деформации клеенного стержня на трех этапах при изменении нагрузки от 0,1 до $0,4N_{\max}$, мм; $N_{0,4}$ и $N_{0,1}$ — величины нагрузки, соответствующие 0,1 и 0,4 величины разрушающей нагрузки N_{\max} для клеенного стержня, Н.

Вычисленные значения занесены в таблицу.

Значения сопротивления древесины R и податливости K для каждого образца

Wood resistance R and compliance K values for each specimen

Номер образца Number of specimen	R , МПа MPa	K , мм/кН mm/kN
1	4,65	0,0128
2	4,62	0,0125
3	5,44	0,0089
4	4,51	0,0197
5	4,10	0,0253

Нормативные значения R_n и K_n определяются⁶ на основе результатов испытаний в предположении, что полученные результаты подчиняются логнормальному распределению, по формуле:

$$R_n = \exp(R_{\text{cp}} - k_s \cdot S_R),$$

где k_s определяют по табл. Б.1 в зависимости от количества образцов в выборке; R_{cp} рассчитывают по формуле:

$$R_{\text{cp}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln R_i;$$

S_R устанавливают по выражению:

$$S_R = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\ln R_i - R_{\text{cp}})^2}.$$

Тогда нормативное значение сопротивления древесины выдергиванию или продавливанию клеенного вдоль волокон стержня R_n определим следующим образом:

$$R_n = \exp(1,536 - 2,463 \cdot 0,1016) = 3,62 \text{ МПа};$$

$$R_{\text{cp}} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 \ln R_i = 1,536;$$

$$S_R = \sqrt{\frac{1}{5-1} \sum_{i=1}^5 (\ln R_i - 1,536)^2} = 0,1016.$$

Также нормативное значение податливости клеенного вдоль волокон стержня K_n определим:

$$K_n = \exp(-4,2138 - 2,463 \cdot 0,412) = 0,0054 \text{ мм/кН};$$

$$K_{\text{cp}} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 \ln K_i = -4,2138;$$

$$S_K = \sqrt{\frac{1}{5-1} \sum_{i=1}^5 (\ln K_i - (-4,2138))^2} = 0,412.$$

В процессе обработки результатов испытаний были определены сопротивления древесины R и податливости K для каждого образца (табл.). Исходя из полученных значений вычислены нормативное сопротивление древесины $R_n = 3,62$ МПа, а также нормативное значение податливости $K_n = 0,0054$ мм/кН. Следует отметить, что по итогам эксперимента подтвердилось наличие небольших значений податливости в стыковом соединении с клееными вдоль волокон стержнями.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам проведенного исследования можно сделать вывод, что разрушение опытных образцов произошло вследствие скалывания вдоль

⁶ В соответствии с приложением Б ГОСТ Р 58558–2019. Конструкции деревянные. Вклеенные стержни. Методы испытаний по определению нормативных значений механических характеристик.

волокон деревянного элемента на границе клеевой шов – деревянный элемент, узел работает в упругой стадии до нагрузки в 30–35 кН, затем происходит рост деформаций и резкое падение нагрузки, что характеризует возникшее разрушение как хрупкое.

Вычисленное после испытаний нормативное расчетное сопротивление клеенного стержня на продавливание ($R_n = 3,62$ МПа) близко к указанному в СП⁷ ($R_{н0}^A = 3,2$ МПа), разница составляет 13 %, что говорит о действительности методических указаний, приведенных в ГОСТ Р 58459–2019,

⁷ Табл. 7.1 СП 382.1325800.2017. Конструкции деревянные клеенные на клеенных стержнях. Методы расчета.

определяющих нормативные значения механических свойств древесины.

В процессе проведения экспериментального исследования подтвердилось наличие податливости у данного типа узловое соединения, которая составила по результатам испытаний 0,0054 мм/кН. Наличие податливости соединения в работе подобного шва говорит о необходимости ее учета в построении расчетных моделей.

В процессе проектирования и конструирования требуется производить детальный анализ конечной жесткости узлов с клееными вдоль волокон стержнями для корректного построения расчетной схемы здания.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Современные проблемы совершенствования и развития металлических, деревянных, пластмассовых конструкций в строительстве и на транспорте : мат. III Междунар. науч.-техн. конф. Самара, 2005.
2. Современные строительные конструкции из металла, дерева и пластмасс : мат. 12 Междунар. симпозиума. Одесса, 2007.
3. Найчук А.Я., Чернолиз В.С., Иванюк А.Н. Численные исследования прочности деревянных балок со сквозными трещинами, усиленных наклонно клееными стержнями // Ресурсосберегающие материалы, конструкции, здания и сооружения : сб. науч. тр. 2008. № 16 (2). С. 278–281.
4. Орлович Р.Б., Гиль З., Дмитриев П.А. Тенденции в развитии соединений деревянных конструкций в строительстве за рубежом // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2004. № 11 (551). С. 4–9. EDN PIKRGX.
5. Золотов М.С. Исследование напряженно-деформированного состояния анкерного соединения на эпоксидном клее : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Харьков, 1971.
6. Зубарев Г.Н., Бойтемиров Ф.А., Головина В.М. Испытание деревянной арки с соединениями на клеенных стержнях // Известия вузов. Строительство и архитектура. 1983. № 12. С. 15–21.
7. Иванов Ю.М. Длительная несущая способность деревянных конструкций // Известия вузов. Строительство и архитектура. 1972. № 11. С. 6–12.
8. Иванов Ю.М., Линьков И.М., Сороткин В.М. Исследование влияния армирования на прочность и жесткость деревянных изгибаемых элементов // Разработка и исследование клееных деревянных и фанерных армированных конструкций. 1972. № 24. С. 13–30.
9. Ковальчук Л.М. Склеивание древесных материалов с пластмассами и металлами. М. : Лесная промышленность, 1968. 239 с.
10. Калугин А.В. Клееные деревянные конструкции в современном строительстве // Промышленное и гражданское строительство. 2011. № 7–2. С. 32–37. EDN NXOUFJ.
11. Зубарев Г.Н., Логинова М.П., Головина В.М. Испытание и расчет соединений деревянных конструкций : сб. науч. тр. М. : ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, 1981.
12. Турковский С.Б., Саяпин В.В. Исследование монтажных узловых соединений клееных деревянных конструкций. М. : ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, 1981.
13. Турковский С.Б., Погорельцев А.А. Создание деревянных конструкций системы ЦНИИСК на основе наклонно клеенных стержней // Промышленное и гражданское строительство. 2007. № 3. С. 6–7. EDN HZIVXP.
14. Поспелов Н.Д., Тумас Е.В. О новых клеештыревых стыках несущих элементов деревянных пролетных строений мостов. Балашиха : СоюздорНИИ, 1970.
15. Вдовин В.М., Ишмаева Д.Д. Экспериментальные исследования жестких узлов балочных структур из клееных деревянных элементов // Региональная архитектура и строительство. 2014. № 2. С. 130–136. EDN SFPAAL.
16. Турковский С.Б., Погорельцев А.А., Преображенская И.П. Клееные деревянные конструкции с узлами на клеенных стержнях в современном строительстве (система ЦНИИСК). М. : Стройматериалы, 2013. 300 с.
17. Шмидт А.Б., Дмитриев П.А. Атлас строительных конструкций из клееной древесины и водостойкой фанеры : учебное пособие. М. : Изд-во АСВ, 2002. 291 с.

18. *Shchelokova T.* A research of stress/strain condition of reinforced timber structures with natural weakenings // *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 193. P. 03051. DOI: 10.1051/mateconf/201819303051
19. *Mirski R., Kuliński M., Dziurka D., Thomas M., Antonowicz R.* Strength properties of structural glulam elements from pine (*Pinus sylvestris* L.) timber reinforced in the tensile zone with steel and basalt rods // *Materials*. 2021. Vol. 14. Issue 10. P. 2574. DOI: 10.3390/ma14102574
20. *Totsuka M., Jockwer R., Kawahara H., Aoki K., Inayama M.* Experimental study of compressive properties parallel to grain of glulam // *Journal of Wood Science*. 2022. Vol. 68. Issue 1. DOI: 10.1186/s10086-022-02040-7
21. *Jockwer R., Caprio D., Jorissen A.* Evaluation of parameters influencing the load-deformation behaviour of connections with laterally loaded dowel-type fasteners // *Wood Material Science & Engineering*. 2022. Vol. 17. Issue 1. Pp. 6–19. DOI: 10.1080/17480272.2021.1955297
22. *Akter S.T., Serrano E., Bader T.K.* Numerical modelling of wood under combined loading of compression perpendicular to the grain and rolling shear // *Engineering Structures*. 2021. Vol. 224. P. 112800. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.112800
23. *Jockwer R., Dietsch P.* Review of design approaches and test results on brittle failure modes of connections loaded at an angle to the grain // *Engineering Structures*. 2018. Vol. 171. Pp. 362–372. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.05.061
24. *Cabrero J.M., Yurrita M.* Performance assessment of existing models to predict brittle failure modes of steel-to-timber connections loaded parallel-to-grain with dowel-type fasteners // *Engineering Structures*. 2018. Vol. 171. Pp. 895–910. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.03.037
25. *Bader T.K., Schweigler M., Serrano E., Dorn M., Enquist B., Hochreiner G.* Integrative experimental characterization and engineering modeling of single-dowel connections in LVL // *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 107. Pp. 235–246. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.01.009
26. *Schweigler M., Bader T.K., Hochreiner G., Lemaître R.* Parameterization equations for the nonlinear connection slip applied to the anisotropic embedment behavior of wood // *Composites Part B: Engineering*. 2018. Vol. 142. Pp. 142–158. DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.01.003
27. *Blaß H.J., Colling F.* Load-carrying capacity of dowelled connections // *INTER Meeting*. 2015. Pp. 48–7–3. Pp. 115–129. URL: <https://www.hs-augsburg.de/homes/colling/holzbau-colling/pdf/2015-INTER.pdf>
28. *Steilner M., Blaß H.J.* A method to determine the plastic bending angle of dowel-type fasteners // *Materials and Joints in Timber Structures*. 2014. Pp. 301–306. DOI: 10.1007/978-94-007-7811-5_28
29. *Franke S., Magnière N.* The embedment failure of European beech compared to spruce wood and standards // *Materials and Joints in Timber Structures*. 2014. Pp. 221–229. DOI: 10.1007/978-94-007-7811-5_21
30. *Franke S., Magnière N.* Discussion of testing and evaluation methods for the embedment behaviour of connections // *INTER Meeting*. 2014. P. 47–7–1. Pp. 93–102.

Поступила в редакцию 15 мая 2023 г.

Принята в доработанном виде 25 мая 2023 г.

Одобрена для публикации 9 сентября 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: **Филипп Сергеевич Школяр** — кандидат технических наук, старший преподаватель, Высшая школа промышленно-гражданского и дорожного строительства; **Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ)**; 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29; РИНЦ ID: 6980-8774, ResearcherID: GLR-0652-2022, ORCID: 0000-0003-2872-0723; shkolyar.fs@gmail.com;

Александр Григорьевич Никитин — студент; **Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ)**; 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29; ResearcherID: HLW-6315-2023; nikitin_dl@mail.ru;

Александра Игоревна Зацепина — приглашенный преподаватель; **Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ)**; 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29; ResearcherID: ACI-5248-2022, ORCID: 0000-0002-5586-504X; zatsepina.aleksandra@yandex.ru.

Вклад авторов:

Школяр Ф.С. — идея, научное руководство, научное редактирование текста.

Никитин А.Г. — сбор материала, проведение эксперимента, обработка материала, написание исходного текста.

Зацепина А.И. — доработка текста, написание и оформление статьи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. *Modern problems of improvement and development of metal, wooden, plastic structures in construction and transport : materials of the III International scientific and technical conference*. Samara, 2005. (rus.).
2. *Modern building structures made of metal, wood and plastics : materials of the 12th International Symposium*. Odessa, 2007. (rus.).
3. Naychuk A.Ya., Chornoliz V.S., Ivanyuk A.N. Numerical studies of the strength of wooden beams with through cracks reinforced by inclined stuck-in rods. *Resource-saving materials, structures, buildings and structures : collection of scientific works*. 2008; 16(2):278-281. (rus.).
4. Orlovich R.B., Gil Z., Dmitriev P.A. Trends in the development of connections of wooden structures in foreign construction. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2004; 11:4-9. EDN PIKRGX. (rus.).
5. Zolotov M.S. *Investigation of stress-strain state of anchor joint on epoxy glue : autoref. dis. ... candidate of technical sciences*. Kharkov, 1971. (rus.).
6. Zubarev G.N., Boitemirov F.A., Golovina V.M. Test of a wooden arch with joints on glued rods. *News of Higher Educational Institutions. Construction and Architecture*. 1983; 12:15-21. (rus.).
7. Ivanov J.M. Long-term bearing capacity of wooden structures. *News of Higher Educational Institutions. Construction and Architecture*. 1972; 11:6-12. (rus.).
8. Ivanov Yu.M., Linkov I.M., Sorotkin V.M. Study of the influence of reinforcement on the strength and rigidity of wooden bent elements. *Development and study of glued wooden and plywood reinforced structures*. 1972; 24:13-30. (rus.).
9. Kovalchuk L.M. *Gluing wood materials with plastics and metals*. Moscow, Forestry industry, 1968; 239. (rus.).
10. Kalugin A.V. Glued timber structures in modern construction. *Industrial and Civil Engineering*. 2011; 7-2:32-37. EDN NXOUFJ. (rus.).
11. Zubarev G.N., Loginova M.P., Golovina V.M. *Testing and calculation of connections of wooden structures : collection of scientific works*. Moscow, TsNIISK named after V.A. Kucherenko, 1981. (rus.).
12. Turkovsky S.B., Sayapin V.V. *Research of assembly joints of glued wooden structures*. Moscow, TsNIISK named after V.A. Kucherenko, 1981. (rus.).
13. Turkovsky S.B., Pogoreltsev A.A. Development of wooden structures of "TSNIISK-system" based on inclined stuck-in rods. *Industrial and Civil Engineering*. 2007; 3:6-7. EDN HZIVXP. (rus.).
14. Pospelov N.D., Tumas E.V. *About new adhesive joints of bearing elements of wooden bridge spans*. Balashikha, SoyuzdorNII, 1970. (rus.).
15. Vdovin V.M., Ishmaeva D.D. Experimental studies of rigid nodes of beam structures made of glued wooden elements. *Regional Architecture and Engineering*. 2014; 2:130-136. EDN SFPAAL. (rus.).
16. Turkovsky S.B., Pogoreltsev A.A., Preobrazhenskaya I.P. *Glued wooden structures with nodes on glued rods in modern construction (TsNIISK-system)*. Moscow, Stroymaterialy Publ., 2013; 300. (rus.).
17. Schmidt A.B., Dmitriev P.A. *Atlas of building structures made of glued wood and water-resistant plywood : manual*. Moscow, ASV publishing house, 2002; 291. (rus.).
18. Shchelokova T. A research of stress/strain condition of reinforced timber structures with natural weakenings. *MATEC Web of Conferences*. 2018; 193:03051. DOI: 10.1051/mateconf/201819303051
19. Mirski R., Kuliński M., Dziurka D., Thomas M., Antonowicz R. Strength properties of structural glulam elements from pine (*Pinus sylvestris* L.) timber reinforced in the tensile zone with steel and basalt rods. *Materials*. 2021; 14(10):2574. DOI: 10.3390/ma14102574
20. Totsuka M., Jockwer R., Kawahara H., Aoki K., Inayama M. Experimental study of compressive properties parallel to grain of glulam. *Journal of Wood Science*. 2022; 68(1). DOI: 10.1186/s10086-022-02040-7
21. Jockwer R., Caprio D., Jorissen A. Evaluation of parameters influencing the load-deformation behaviour of connections with laterally loaded dowel-type fasteners. *Wood Material Science & Engineering*. 2022; 17(1):6-19. DOI: 10.1080/17480272.2021.1955297
22. Akter S. T., Serrano E., Bader T. K. Numerical modelling of wood under combined loading of compression perpendicular to the grain and rolling shear. *Engineering Structures*. 2021; 224:112800. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.112800
23. Jockwer R., Dietsch P. Review of design approaches and test results on brittle failure modes of connections loaded at an angle to the grain. *Engineering Structures*. 2018; 171:362-372. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.05.061
24. Cabrero J.M., Yurrita M. Performance assessment of existing models to predict brittle failure modes of steel-to-timber connections loaded parallel-to-grain with dowel-type fasteners. *Engineering Structures*. 2018; 171:895-910. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.03.037
25. Bader T.K., Schweigler M., Serrano E., Dorn M., Enquist B., Hochreiner G. Integrative experimental characterization and engineering modeling of single-dowel connections in LVL. *Construction and Building Materials*. 2016; 107:235-246. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.01.009
26. Schweigler M., Bader T.K., Hochreiner G., Lemaître R. Parameterization equations for the non-linear connection slip applied to the anisotropic em-

bedment behavior of wood. *Composites Part B: Engineering*. 2018; 142:142-158. DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.01.003

27. Blaß H.J., Colling F. Load-carrying capacity of dowelled connections. *INTER Meeting*. 2015; 48-7-3:115-129. URL: <https://www.hs-augsburg.de/homes/colling/holzbau-colling/pdf/2015-INTER.pdf>

28. Steilner M., Blaß H.J. A method to determine the plastic bending angle of dowel-type fasteners. *Ma-*

terials and Joints in Timber Structures. 2014; 301-306. DOI: 10.1007/978-94-007-7811-5_28

29. Franke S., Magnière N. The embedment failure of European beech compared to spruce wood and standards. *Materials and Joints in Timber Structures*. 2014; 221-229. DOI: 10.1007/978-94-007-7811-5_21

30. Franke S., Magnière N. Discussion of testing and evaluation methods for the embedment behaviour of connections. *INTER Meeting*. 2014; 47-7-1:93-102.

Received May 15, 2023.

Adopted in revised form on May 25, 2023.

Approved for publication on September 9, 2023.

B I O N O T E S: **Filipp S. Shkoliar** — Candidate of Technical Sciences, senior lecturer; **Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU)**; 29 Polytechnic st., St. Petersburg, 195251, Russian Federation; ID RSCI: 6980-8774, ResearcherID: GLR-0652-2022, ORCID: 0000-0003-2872-0723; office@spbstu.ru, shkoliar.fs@gmail.com;

Aleksandr G. Nikitin — student; **Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU)**; 29 Polytechnic st., St. Petersburg, 195251, Russian Federation; ResearcherID: HLW-6315-2023; office@spbstu.ru, nikitin_dl@mail.ru;

Aleksandra I. Zatssepina — Visiting lecturer; **Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU)**; 29 Polytechnic st., St. Petersburg, 195251, Russian Federation; ResearcherID: ACI-5248-2022, ORCID: 0000-0002-5586-504X; office@spbstu.ru, zatssepina.aleksandra@yandex.ru.

Contribution of the authors:

Filipp S. Shkoliar — idea, academic advising, scientific editing of the text.

Aleksandr G. Nikitin — data gathering and processing, experiment making, writing of the original text.

Aleksandra I. Zatssepina — text revision, writing of the article.

Authors report about the absence of conflict of interests.