

СТРОИТЕЛЬСТВО

УДК 624.011.1:624.046.5

DOI 10.52928/2070-1683-2025-42-3-2-7

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКОГО СОЕДИНЕНИЯ
В ВИДЕ БЕТОННЫХ ШПОНОК В ДЕРЕВОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЯХ

д-р техн. наук, проф. Д.Н. ЛАЗОВСКИЙ¹), канд. техн. наук, доц. А.И. ГИЛЬ²),
канд. техн. наук, доц. А.М. ХАТКЕВИЧ³), Г.О. ЦИПАН⁴)

(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

¹) d.lazovski@psu.by, ²) a.hil@psu.by, ³) a.khatkevich@psu.by, ⁴) tsipan.grisha@bk.ru

Рассмотрены основные механические соединения древесины и бетона в деревобетонных конструкциях, предложен вид соединения посредством бетонных шпонок, образованных при бетонировании деревянного элемента с высверленным отверстием. Разработана методика проведения экспериментальных исследований и специальный испытательный стенд для определения прочности и деформативности образцов при сдвиге, позволяющий моделировать работу деревобетонного элемента при изгибе. Изготовлены и испытаны образцы деревобетонных конструкций. Разрушение образца (полный сдвиг бетона относительно древесины) происходило по хрупкой схеме из-за среза бетонной шпонки по линии контакта древесины и бетона. Анализ результатов показал, что существенное влияние на прочность рассматриваемого вида соединения оказывает прочность бетона и геометрические размеры поперечного сечения бетонных шпонок. Предложена методика расчета прочности деревобетонных изгибаемых элементов при сдвиге по контакту древесины и бетона, основанная на положениях деформационной расчетной модели. Проведенные исследования позволили сделать вывод об эффективности применения механического соединения бетона и древесины в виде бетонных шпонок круглого поперечного сечения и необходимости проведения дополнительных экспериментально-теоретических исследований в составных деревобетонных изгибаемых элементах.

Ключевые слова: деревобетонные конструкции, сдвиг, экспериментальные исследования, испытательный стенд, деформационная расчетная модель.

Введение. В настоящее время в строительной отрасли находят применения деревобетонные конструкции с учетом обеспечения их совместной работы, которые соединяют в себе преимущества обоих материалов. Преимуществами деревобетонных конструкций являются [1]: более низкий вес по сравнению с традиционными железобетонными, повышенная жесткость по сравнению с деревянными, высокие звукоизоляционные свойства, технологичность (отсутствие необходимости в устройстве опалубки, тяжелых подъемных механизмах), экологичность.

В настоящее время проводятся обширные исследования совместной работы бетона и древесины в составе деревобетонных конструкций¹ [2]. Следует отметить, что исследования направлены на изучение не только механических связей, но и клеевых. Причем клеевое соединение бетона и древесины из-за меньшей деформативности контакта предпочтительнее механическому² [2–5]. Однако клеевое соединение в основном эффективно при усилении существующих зданий, где не рекомендуется нарушать целостность деревянного настила (например, путем просверливания новых отверстий или установкой специальных стержней либо винтов) [2]. В то же время клеевое соединение (особенно в условиях монтажа данных конструкций на строительной площадке) требует высококачественной подготовки поверхности древесины, соблюдения температурно-влажностного режима, соблюдения требований к клею с точки зрения долговечности, высыхания. Кроме того, из недостатков клеевого соединения отмечают трудности в определении жесткости соединения ввиду большого разброса результатов экспериментальных исследований [6]. Таким образом, клеевое соединение находит свое применение при производстве сборных элементов, а наиболее эффективным соединением при устройстве деревобетонных конструкций на строительной площадке являются различные виды механических связей^{3,4} [1].

Основными механическими соединениями древесины и бетона являются гибкие связи в виде различных стержней, шпилек, винтов (в том числе наклонных). Жесткими связями применительно к контакту древесины и бетона считаются пазовые соединения, которые создаются путем вырезания участков древесины на некоторую глубину по длине и последующего бетонирования [7; 8]. При этом несущая способность контакта при сдвиге определяется размерами выемки (паза) в древесине и прочностью бетона, так как разрушение происходит от среза бетонного паза. Одним из решений пазового механического соединения является использование бетонных шпонок,

¹ Yeoh D.E.C. Behaviour and design of timber-concrete composite floor system. PhD Thesis. – New Zealand: University of Canterbury, 2010. DOI: 10.26021/1992.

² См. сноску 1.

³ См. сноску 1.

⁴ Dias A.M.P.G. Mechanical behaviour of timberconcrete joints. PhD thesis. – The Netherlands: Delft University of Technology, 2005. – 293 p.

образованных путем высверливания отверстий в деревянном элементе и его последующем бетонировании. Совместная работа деревянной и бетонной части конструкции осуществляется за счет механического зацепления бетонной шпонки, возникающих сил трения между материалами и склеивания бетона и древесины.

Для предварительной оценки влияния бетонной шпонки на жесткость и прочность соединения были проведены поисковые натурные испытания образцов деревобетона, в которых рассматривался вариант соединения бетона и древесины на бетонных шпонках различного диаметра, определены предпосылки для расчета прочности данного вида соединения бетона и древесины.

Методика проведения экспериментальных исследований. Испытания проводились на деревобетонных образцах (рисунок 1), которые подвергались сдвигу при изгибе.

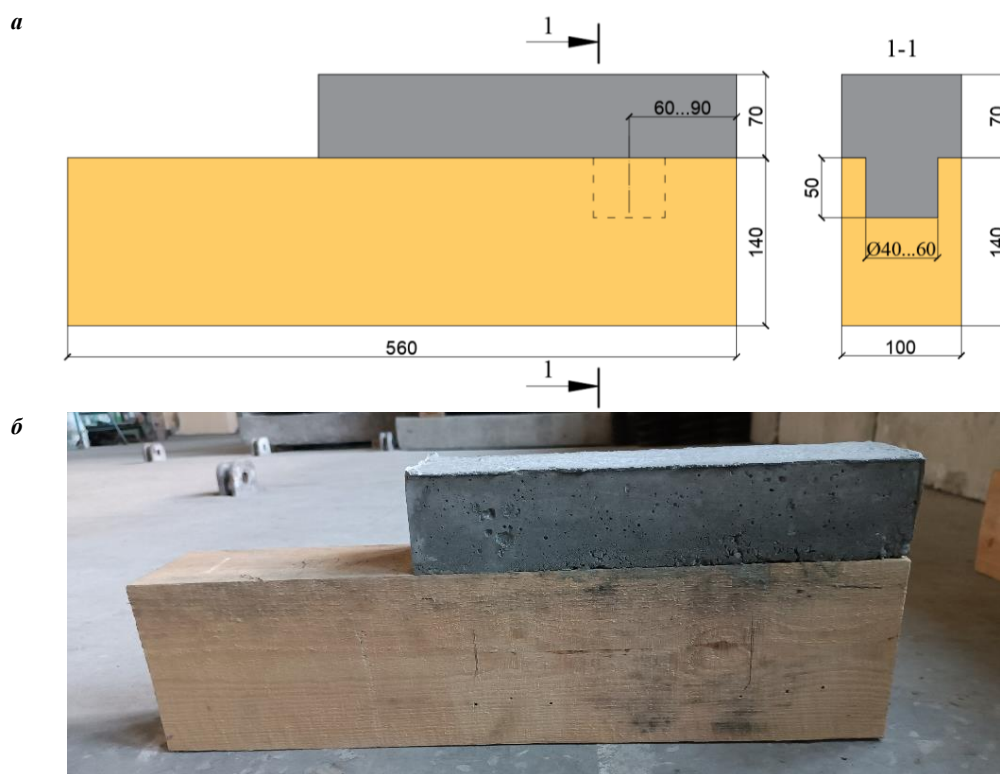


Рисунок 1. – Схема (а) и общий вид (б) экспериментальных деревобетонных образцов

Деревобетонные образцы представляли собой две призмы, соединенные между собой бетонной шпонкой. В деревянной части высверливалось круглое отверстие на глубину 50 мм. Варьируемыми факторами при исследованиях были диаметр отверстия для шпонки и его расстояние от свободного торца образца.

Изготовление опытных образцов осуществлялось в испытательной лаборатории Полоцкого государственного университета имени Евфросинии Полоцкой. В подготовленном деревянном образце высверливалось отверстие под шпонку, устанавливалась опалубка и заполнялась бетонной смесью, уплотнение производилось вибрированием. В период бетонирования влажность деревянной части образца составляла 9,6%. Твердение бетона проходило в нормальных условиях при температуре окружающего воздуха 22 °С, относительной влажности 67% в течение 28 суток. Для определения физико-механических характеристик бетона одновременно с бетонированием образцов формовались призмы размером 100×100×400 мм и кубы размером 100×100×100 мм, которые твердели в тех же условиях. Образцы бетона испытывались при сжатии и скалывании (для определения прочности при растяжении) по методике^{5,6}. Для определения прочности деревянной части образца из древесины той же партии изготавливались призмы размером 100×100×600 мм и образцы «восьмерки», которые испытывались соответственно при сжатии и растяжении, по методике⁷ [9].

На предварительном этапе исследований было изготовлено 2 опытных деревобетонных образца. Результаты определения физико-механических характеристик материалов и параметры опытных деревобетонных образцов представлены в таблице 1.

⁵ СТБ EN 12390-3-2012. Методы испытаний бетона. Часть 3. Определение прочности на сжатие испытываемых образцов. – Введ. 01.01.2013. – Минск: Госстандарт, 2013. – 10 с.

⁶ СТБ EN 12390-6-2012. Методы испытаний бетона. Часть 6. Определение прочности испытываемых образцов на растяжение при скалывании. – Введ. 01.01.2013. – Минск: Госстандарт, 2013. – 19 с.

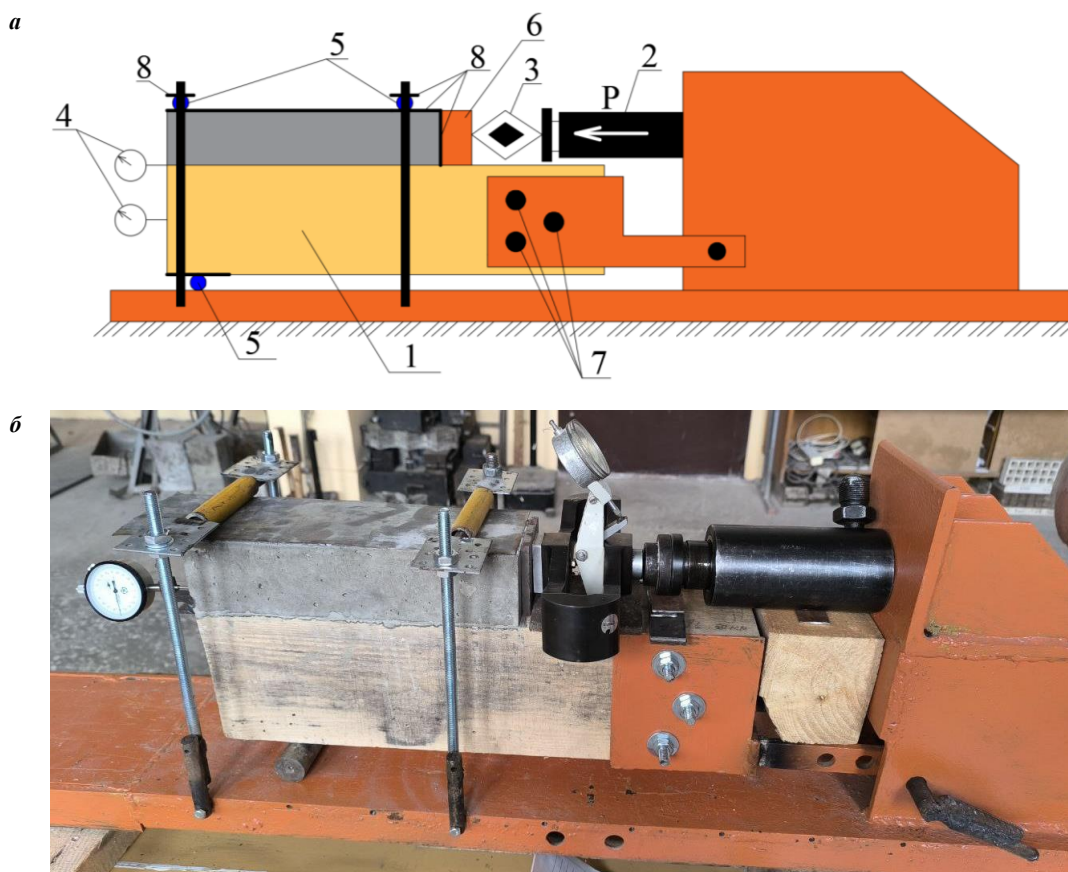
⁷ СТБ EN 384-2011. Древесина конструкционная. Определение характеристических значений механических свойств и плотности. – Введ. 01.01.2012. – Минск: Госстандарт, 2012. – 16 с.

Таблица 1. – Параметры опытных деревобетонных образцов

№ образца	Диаметр шпонки, мм	Расстояние центра шпонки от свободного торца, мм	Древесина		Бетон	
			Прочность при сжатии, МПа	Прочность при растяжении, МПа	Прочность при сжатии, МПа	Прочность при растяжении, МПа
1	40	60	47,2	55,2	39,4	3,9
2	60	60	47,2	55,2	8,4	0,97

При испытании деревобетонный образец помещался в специальный стенд (рисунок 2), к бетонной части образца горизонтально прикладывалась нагрузка от домкрата, усилие которого контролировалось образцовым динамометром ДОР-20. Деревянная часть образца шпильками прикреплялась к стенду, что обеспечивало ее неподвижность при испытании. Для исключения перемещения бетона относительно дерева по вертикали и моделирования реальной совместной работы бетона и дерева при изгибе, сверху образец прижимался двумя шарнирными опорами, которые обеспечивали свободный ход бетонной части без трения об верхнюю упорную пластину, при этом исключался отрыв бетонной части от деревянной по вертикали.

На каждой стадии загрузки фиксировались показания приложенной нагрузки и перемещения бетонной части образца относительно деревянной.



1 – опытный образец; 2 – домкрат; 3 – образцовый динамометр; 4 – индикатор часового типа; 5 – шарнирная опора; 6 – упорная пластина; 7 – болты крепления деревянной части образца к стенду; 8 – упругая пластина

Рисунок 2. – Схема (а) и общий вид (б) стенда для испытания образцов на сдвиг

Анализ результатов исследований. В результате проведенных экспериментальных исследований получена общая картина совместной работы бетона и древесины. На начальных этапах нагружения практически сразу происходило отслаивание бетона от древесины. На последующих этапах происходил прямо пропорциональный приложенной нагрузке сдвиг бетона относительно древесины с линейным распределением перемещений. При этом отмечено, что на стадиях линейного сдвига нарушения целостности шпонки и древесины вблизи нее практически не наблюдалось. Разрушение образца (полный сдвиг бетона относительно древесины) происходило по хрупкой схеме из-за среза бетонной шпонки по линии контакта древесины и бетона. На образцах отмечены следы пластического деформирования древесины в виде местного смятия в области шпонки (рисунки 3, 4). Разрушение образца 1 произошло при сдвигающем усилии равном 25 кН, образца 2 – 7,5 кН. Расхождение между результатами свидетельствует, что существенное влияние в прочности данного вида соединения оказывают физико-механические характеристики бетона.



Рисунок 3. – Общий вид образца 1 после разрушения



Рисунок 4. – Общий вид образца 2 после разрушения

Предварительные экспериментальные исследования позволили сделать вывод об эффективности рассматриваемого вида соединения. Разрушение бетонной шпонки при срезе оказалось определяющим фактором при оценке прочности соединения, что позволяет использовать основные предпосылки методики оценки прочности при изгибе с учетом сдвига деревянных конструкций [10].

Разработанная методика [10] предполагает проводить оценку возникающего при изгибе сдвигающего усилия в контактной зоне бетона и древесины, рассматривая опасные поперечные сечения (в данном случае сечения с бетонными шпонками) по длине элемента. Нормальные напряжения при сжатии и растяжении в любых точках деревобетонной конструкции по длине при изгибе определяются по деформационной модели [11; 12].

Исходя из вышесказанного, применительно к деревобетонным изгибаемым конструкциям учет сдвига может быть осуществлен следующим образом: при известном распределении нормальных напряжений по высоте рассматриваемого поперечного сечения определяются сдвигающие усилия при заданном нагружении T_E , Н:

$$T_E = \sum (\sigma_{w,i} \cdot h_{w,i} + \sigma_{c,i} \cdot h_{c,i}) \cdot b, \quad (1)$$

где $\sigma_{w,i}$, $\sigma_{c,i}$ – нормальные напряжения сжатия в середине i -й элементарной площадки рассматриваемого поперечного сечения элемента соответственно из древесины и бетона;

$h_{w,i}$, $h_{c,i}$ – линейный размер i -й элементарной площадки по высоте поперечного сечения соответственно из древесины и бетона;

b – ширина элемента в рассматриваемом поперечном сечении.

Сдвигающее усилие сопротивления, воспринимаемое одной бетонной шпонкой в рассматриваемом поперечном сечении $T_{R,i}$:

$$T_{R,i} = \frac{\pi \cdot d_{sh}^2}{4} \cdot \tau_{Rd}, \quad (2)$$

где d_{sh} – диаметр бетонной шпонки;

τ_{Rd} – расчетное сопротивление бетона срезу.

Проверка прочности на сдвиг в рассматриваемом поперечном сечении изгибаемого деревянного элемента при заданном нагружении производится из условия (3), при этом при рассмотрении участков, на которых задействовано несколько бетонных шпонок, сдвигающее усилие T_R в рассматриваемом сечении определяется суммой всех сдвигающих усилий, воспринимаемых бетонными шпонками на данном участке:

$$T_E \leq T_R. \quad (3)$$

Невыполнение условия (3) для одного из поперечных сечений свидетельствует о разрушении элемента при сдвиге (т.е. срезе одной или нескольких бетонных шпонок).

Заключение. Проведенные исследования позволили сделать вывод об эффективности применения механического соединения бетона и древесины в виде бетонных шпонок круглого поперечного сечения. Апробированная методика экспериментальных исследований позволит получить данные о прочности и деформативности соединения. Данные результатов исследования прочности контакта деревобетонных изгибаемых элементов позволяют применить методику расчета прочности деревобетонных изгибаемых элементов при сдвиге по контакту древесины и бетона на основе деформационной расчетной модели поперечных сечений, изложенную в [10].

ЛИТЕРАТУРА

1. Ceccotti A. Composite concrete-timber structures // Progress in Structural Engineering and Materials. – 2002. – Vol. 4, iss. 3. – P. 264–275. DOI: 10.1002/pse.126.
2. Experimental study and numerical simulation of adhesively bonded timber-concrete composite panels: bending behavior, adhesive shear and peel stress distributions / A.N. Giv, Q. Fu, Z. Chen et al. // Engineering Structures. – 2024. – Vol. 307. DOI: 10.1016/j.engstruct.2024.117872.
3. Behavior of adhesively bonded engineered wood – wood chip concrete composite decks: Experimental and analytical studies / Q. Fu, L. Yan, T. Ning et al. // Construction and Building Materials. – 2020. – Vol. 247. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118578.
4. Effects of concrete type, concrete surface conditions and wood species on interfacial properties of adhesively-bonded timber – concrete composite joints / Q. Fu, L. Yan, N.A. Thielker et al. // International Journal of Adhesion and Adhesives. – 2021. – Vol. 107. DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2021.102859.
5. Frohnmüller J, Fischer J, Seim W. Full-scale testing of adhesively bonded timberconcrete composite beams // Materials and Structures. – 2021. – Vol. 54. DOI: 10.1617/s11527-021-01766-y.
6. Push-out tests of wet-process adhesive-bonded beech timber-concrete and timber-polymer-concrete composite connections / M. Füchslin, P. Grönquist, S. Stucki et al. // WCTE. – 2023. – P. 3241–3247. DOI: 10.52202/069179-0422.
7. О развитии и совершенствовании деревобетонных мостов / В.А. Уткин, П.Н. Кобзев, Е.Е. Басич и др. // Вестник СибАДИ. – 2025. – Т. 22, № 2. – С. 296–318. DOI: 10.26518/2071-7296-2025-22-2-296-318.
8. Design and analysis of timber-concrete-based civil structures and its applications: a brief review / M. Hosseini, M. Gaff, J. Lair et al. // Advanced Materials Science. – 2023. – Vol. 62, iss. 1. DOI: 10.1515/rams-2022-0321.
9. Гиль А.И., Лазовский Д.Н. Моделирование диаграмм деформирования древесины при одноосном кратковременном сжатии и растяжении // Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации [Электронный ресурс]: сб. материалов IX междунар. науч.-практ. конф., приуроченной к 120-летию со дня рождения К.А. Артемьева, Омск, 21–22 ноября 2024 г. / СибАДИ; редкол.: А.П. Жигадло (отв. ред.) и др. – Омск: СибАДИ, 2024. – С. 466–471.
10. Лазовский Д.Н., Гиль А.И., Глухов Д.О. Деформационный подход к расчету прочности при поперечном изгибе деревянных элементов с учетом сдвига // Вестник МГСУ. – 2025. – Т. 20, № 8. – С. 1187–1198. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.8.1187-1198.

11. Лазовский Д.Н., Гиль А.И., Глухов Д.О. Диаграммный подход при расчете деревянных конструкций по СП 5.05.01-2021. – Вестник БрГТУ. – 2024. – № 2(134). – С. 66–72. DOI: 10.36773/1818-1112-2024-134-2-66-72.
12. Lazovskiy D.N., Hil A.I., Genina E.E. Modeling of the Stress-strain State of Bent Concrete Elements with Composite Rod Reinforcement // *Russian Journal of Building Construction and Architecture*. – 2025. – № 3(67). – P. 6–15. DOI: 10.36622/2542-0526.2025.67.3.001.

REFERENCES

1. Ceccotti, A. (2002). Composite concrete-timber structures. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 4(3), 264–275. DOI: 10.1002/pse.126.
2. Giv A.N. et al. Experimental study and numerical simulation of adhesively bonded timber-concrete composite panels: bending behavior, adhesive shear and peel stress distributions // *Engineering Structures*. – 2024. – Vol. 307. DOI: 10.1016/j.eng-struct.2024.117872.
3. Fu, Q., Yan, L., Ning, T., Wang, B., & Kasal, B. Behavior of adhesively bonded engineered wood – wood chip concrete composite decks: Experimental and analytical studies // *Construction and Building Materials*. – 2020. – Vol. 247. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118578.
4. Fu, Q., Yan, L., Thielker, N.A., & Kasal, B. Effects of concrete type, concrete surface conditions and wood species on interfacial properties of adhesively-bonded timber – concrete composite joints // *International Journal of Adhesion and Adhesives*. – 2021. – Vol. 107. DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2021.102859.
5. Frohnmüller, J., Fischer, J., Seim, W. Full-scale testing of adhesively bonded timberconcrete composite beams // *Materials and Structures*. – 2021. – Vol. 54. DOI: 10.1617/s11527-021-01766-y.
6. Füchslin, M., Grönquist, P., Stucki, S., Mamie, T., Kelch, S., Burgert, I., & Andrea Frangi, A. Push-out tests of wet-process adhesive-bonded beech timber-concrete and timber-polymer-concrete composite connections // *WCTE*. – 2023. – P. 3241–3247. DOI: 10.52202/069179-0422.
7. Utkin, V.A., Kobzev, P.N., Basich, E.E., & Skiba, V.V. O razvitii i sovershenstvovanii derevobetonny`x mostov // *Vestnik SibADI*. – 2025. – T. 22, № 2. – S. 296–318. DOI: 10.26518/2071-7296-2025-22-2-296-318. (In Russ., abstr. in Engl.).
8. Hosseini, M., Gaff, M., Lair, J., Hui, D., Haitao, L., Hosseini, A., Ghosh, P., & Jian, B. Design and analysis of timber-concrete-based civil structures and its applications: a brief review // *Advanced Materials Science*. – 2023. – Vol. 62, iss. 1. DOI: 10.1515/rams-2022-0321.
9. Gil`, A.I., & Lazovskij D.N. Modelirovanie diagramm deformirovaniya drevesiny` pri odnoosnom kratkovremennom szhatii i rastyazhenii // *Arxitekturno-stroitel`ny`j i dorozhno-transportny`j kompleksty`: problemy`, perspektivy`, innovacii [E`lektronny`j resurs]*: sb. materialov IX mezhdunar. nauch.-prakt. konf., priurochennoj k 120-letiyu so dnya rozhdeniya K.A. Artem`eva, Omsk, 21–22 noyabrya 2024 g. / SibADI; redkol.: A.P. Zhigadlo (otv. red.) i dr. – Omsk: SiBADI, 2024. – S. 466–471. (In Russ.).
10. Lazovskij, D.N., Gil`, A.I., & Gluxov, D.O. Deformacionny`j podxod k raschetu prochnosti pri poperechnom izgibe derevyanny`x e`lementov s uchetoм sdviga // *Vestnik MGSU*. – 2025. – T. 20, № 8. – S. 1187–1198. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.8.1187-1198. (In Russ., abstr. in Engl.).
11. Lazovskij, D.N., Gil`, A.I., & Gluxov, D.O. Diagramny`j podxod pri raschete derevyanny`x konstrukcij po SP 5.05.01-2021 // *Vestnik BrGTU*. – 2024. – № 2(134). – S. 66–72. DOI: 10.36773/1818-1112-2024-134-2-66-72. (In Russ., abstr. in Engl.).
12. Lazovskiy, D.N., Hil, A.I., & Genina, E.E. Modeling of the Stress-strain State of Bent Concrete Elements with Composite Rod Reinforcement // *Russian Journal of Building Construction and Architecture*. – 2025. – № 3(67). – P. 6–15. DOI: 10.36622/2542-0526.2025.67.3.001.

Поступила 01.09.2025

PROSPECTS FOR THE USE OF MECHANICAL JOINTS IN THE FORM OF CONCRETE DOWELS IN WOOD-CONCRETE STRUCTURES

D. LAZOUSKI, A. HIL, A. KHATKEVICH, G. TSIPAN
(*Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk*)

The main mechanical joints of wood and concrete in wood-concrete structures are considered, and a type of connection is proposed by means of concrete dowels formed during concreting of a wooden element with a drilled hole. A methodology for conducting experimental studies and a special test bench for determining the strength and deformability of samples during shear has been developed, which makes it possible to simulate the operation of a wood-concrete element during bending. Samples of wood-concrete structures have been manufactured and tested. The destruction of the sample (complete displacement of concrete relative to wood) occurred according to a brittle pattern due to the cut of the concrete dowel along the contact line of wood and concrete. The analysis of the results showed that the strength of concrete and the geometric dimensions of the cross-section of concrete dowels have a significant effect on the strength of the considered type of joint. A method for calculating the strength of wood-concrete bendable elements during shear along the contact of wood and concrete, based on the positions of the deformation calculation model, is proposed. The conducted studies have led to the conclusion about the effectiveness of the mechanical connection of concrete and wood in the form of concrete dowels of circular cross-section and the need for additional experimental and theoretical studies in composite wood-concrete bendable elements.

Keywords: wood-concrete structures, shear, experimental studies, test bench, deformation model.