

УДК 624.011.2

**ИССЛЕДОВАНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ
ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ В ДЕРЕВОЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ
КОНСТРУКЦИЯХ**

Г.О. ЦИПАН

(Представлено: д-р техн. наук, проф. Д.Н. Лазовский, канд. техн. наук А.М. Хаткевич)

Представлен инновационный подход к экспериментальному исследованию прочности деревобетонных конструкций на сдвиг. Изготовлены и подвергнуты испытаниям образцы деревобетонных соединений. На основе полученных данных подтверждена возможность применения методики расчета прочности изгибаемых деревобетонных элементов на сдвиг по контактной зоне древесины и бетона, базирующейся на деформационной модели.

В современных строительных конструкциях все больше внимания уделяется использованию комбинированных материалов в единой конструктивной системе, каковой являются деревожелезобетонные конструкции. Одним из ключевых вопросов является обеспечение надежного соединения различных материалов для совместной работы и долговечности конструкции. В настоящее время ведутся активные исследования по вопросам совместной работы бетона и древесины в деревожелезобетонных конструкциях, при этом особое внимание уделяется как механическим, так и клеевым соединениям [1]. Клеевые соединения, обладающие меньшей деформативностью, однако требуют высокой тщательности подготовки поверхности и соблюдения технологических режимов для обеспечения долговечности, в тоже время значительные разногласия в результатах экспериментальных исследований затрудняют однозначное определение жесткости и надежности таких соединений. Механические соединения более стабильные и обеспечивают большую предсказуемость в поведении под нагрузкой и меньшую зависимость от качества подготовки поверхности [2].

Одним из подходов к реализации жесткого механического соединения является использование бетонных шпонок, которые формируются путем высверливания специальных отверстий в деревянных элементах, после чего эти отверстия заполняются бетоном для обеспечения надежного сцепления между материалами. Такой метод позволяет создавать прочные и долговечные соединения, сочетающие преимущества древесины и бетона. Совместная работа деревянной и бетонной части конструкции осуществляется за счет механического зацепления бетонной шпонки, возникающих сил трения между материалами и склеивания бетона и древесины. Использование таких пазовых соединений является перспективным решением для повышения эффективности и надежности деревожелезобетонных конструкций в современном строительстве [1].

Для первоначальной оценки воздействия бетонных шпонок на жесткость и прочностные характеристики соединения были изготовлены экспериментальные образцы в виде фрагментов деревобетона. Изготовление опытных образцов осуществлялось в испытательной лаборатории Полоцкого государственного университета имени Евфросинии Полоцкой. В исходной деревянной балке высверливалось отверстие глубиной 50 мм под шпонку, диаметром 40, 60 и 80 мм, далее устанавливалась опалубка и все пространство заполнялось 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 $22\pm5^{\circ}\text{C}$, относительной влажности $67\pm10\%$ в течение 28 суток [3]. Также параллельно изготавливались образцы материалов, из которых выполнены деревобетонные фрагменты.

На предварительном этапе исследований было изготовлено 5 опытных деревобетонных фрагментов, которые подвергались сдвигу при изгибе. Результаты определения физико-механических характеристик материалов и параметры опытных деревобетонных образцов представлены в таблице 1.

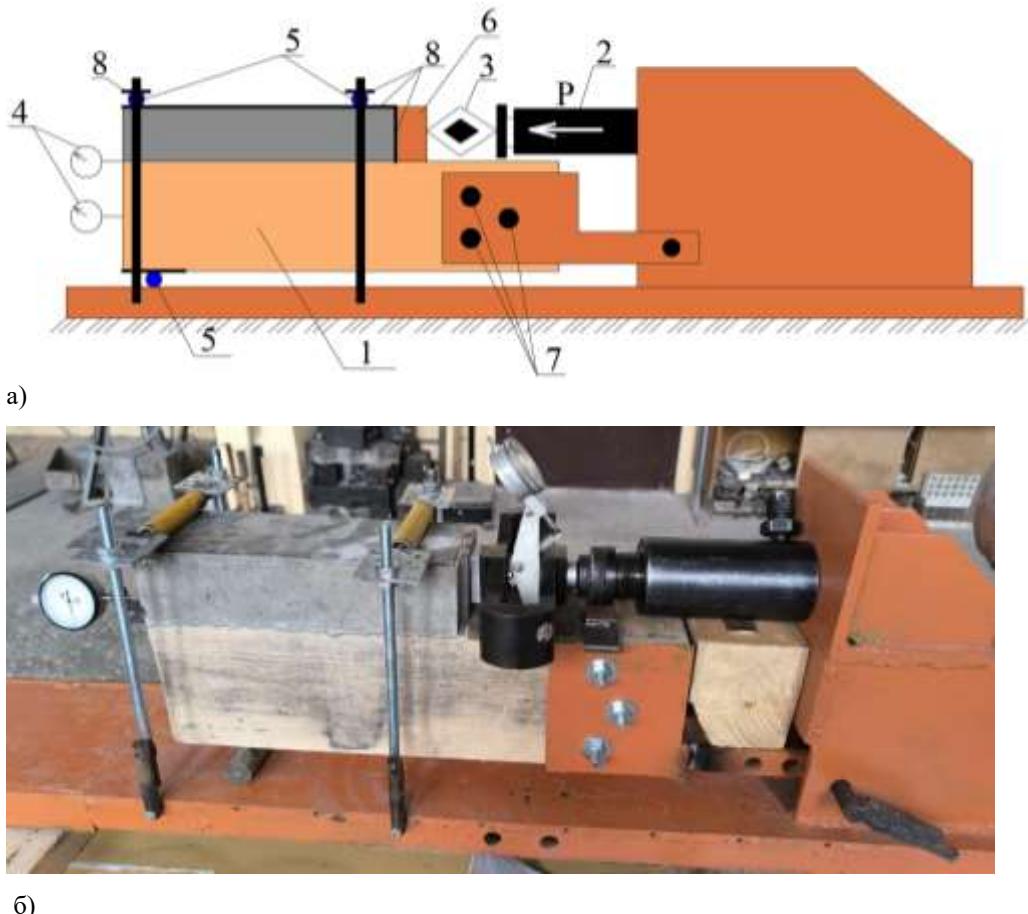
Таблица 1—Результаты испытания опытных деревобетонных образцов

№ образца	Диаметр шпонки, мм	Расстояние от края шпонки до свободного торца, мм	Предельная нагрузка, кН	Предельные деформации, мм	Характер разрушения
1	40	60	25	0,49	Срез шпонки по контакту древесины и бетона
2	40	150	18	1,21	
3	60	60	17	0,68	
4	60	150	27	0,84	
5	80	60	50	0,98	

Во время проведения испытаний фрагмент деревобетонной конструкции помещался в специализированный тестовый стенд (рис. 1). Для приложения горизонтальной нагрузки, приложенной по центру

бетонной части образца, использовался домкрат, усилие которого контролировалось при помощи образцового динамометра ДОР-20. Деревянная часть крепилась к стенду шпильками, обеспечивая неподвижность конструкции в ходе испытания. Чтобы имитировать совместную работу бетона и дерева при изгибе и предотвратить вертикальное смещение бетона относительно дерева, сверху образец фиксировался двумя шарнирными опорами. Эти опоры позволяли бетонной части свободно перемещаться без трения о верхнюю пластину, исключая отрыв бетона от дерева по вертикали.

Во время каждой фазы нагружения фиксировались показания нагрузки и величина смещения бетонной части 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 1. – Схема (а) и общий вид (б) стенда для испытания образцов на сдвиг

В ходе экспериментов по изучению взаимодействия бетона и дерева были выявлены следующие особенности. Сразу после начала приложения нагрузки наблюдалось отслоение бетона от древесины. Затем, по мере увеличения нагрузки, происходил равномерный сдвиг бетона относительно дерева, при этом величина сдвига прямо пропорционально зависела от приложенной нагрузки. Важно отметить, что на стадии линейного сдвига повреждения шпонки и прилегающей к ней древесины были незначительными. Разрушение образца, образованное путем полного сдвига бетона относительно дерева, происходило внезапно, по хрупкому типу, из-за среза бетонной шпонки по границе контакта с деревом. В области шпонки на деревянных элементах наблюдались локальные деформации в виде смятия древесины.

Следовательно, для учета влияния сдвига в деревобетонных изгибаемых конструкциях можно использовать следующий подход: зная распределение нормальных напряжений по высоте поперечного сечения, вычисляются сдвигающие усилия, соответствующие определенной нагрузке T_E , Н [4,5]:

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

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

$h_{w,i}$, $h_{c,i}$ – линейный размер i -той 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 изгибающего деревянного элемента при заданном загружении производится из условия (3), при этом при рассмотрении участков, на которых задействовано несколько бетонных шпонок, сдвигающее усилие T_E в рассматриваемом сечении определяется суммой всех сдвигающих усилий, воспринимаемыми 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. На основании проведенных экспериментальных исследований установлено, что использование бетонных шпонок в деревобетонных конструкциях обеспечивает надежное механическое соединение. В ходе испытаний выявлено, что ключевым фактором, определяющим предел прочности соединения, является разрушение бетонной шпонки при срезе по границе контакта с древесиной. Полученные результаты подтверждают эффективность данного типа соединений и позволяют рекомендовать их использование для проектирования деревожелезобетонных конструкций. Также подтверждена возможность использования подхода, основанного на учете сдвиговых воздействий, который включает нелинейное распределение нормальных напряжений и сдвигающих усилий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ceccotti A. Composite concrete-timber structures // Prog. Struct. Engng Mater. 2002; 4:264–275. DOI: 10.1002/pse.126
2. Yeoh D. E. C. Behaviour and design of timber-concrete composite floor system. – 2010. [PhD Thesis, University of Canterbury, New Zealand]
3. 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.
4. Лазовский, Д. Н.; Гиль, А. И.; Глухов, Д. О. Диаграммный подход при расчете деревянных конструкций по сп 5.05.01-2021. Вестник БрГТУ 2024, 66-72. DOI: <https://doi.org/10.36773/1818-1112-2024-134-2-66-72>
5. Лазовский, Д.Н. Деформационный подход к расчету прочности при поперечном изгибе деревянных элементов с учетом сдвига / Д.Н. Лазовский, А.И. Гиль, Д.О. Глухов // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 8. С. 1187–1198. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.8.1187-1198.