

УДК 624.073

СОЕДИНЕНИЕ ДРЕВЕСИНЫ И БЕТОНА В ДЕРЕВОБЕТОННЫХ ПЕРЕКРЫТИЯХ

Г.О. Ципан

Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой,
г. Новополоцк, Республика Беларусь
e-mail: tsipan.grisha@bk.ru

В работе приведены результаты исследования механического соединения бетона и древесины бетонными шпонками. Испытаниями опытных односрезных образцов получены усилия и деформации сдвига, позволивших разработать расчетные предпосылки и рекомендации по применению таких соединений в деревобетонных перекрытиях.

Ключевые слова: древесина, бетон, механическое соединение, деревобетонные фрагменты.

TIMBER AND CONCRETE CONNECTION IN TIMBER-CONCRETE SLABS

G. Tsipan

Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk, Novopolotsk, Republic of Belarus
e-mail: tsipan.grisha@bk.ru

This paper presents the results of a study of mechanical connections between concrete and timber using concrete dowels. Tests of single-shear experimental specimens yielded shear forces and deformations, enabling the development of design assumptions and recommendations for the use of such connections in timber-concrete floors.

Keywords: wood, concrete, mechanical connection, wood-concrete fragments.

Введение. Современное строительство стремительно развивается и предъявляет все более высокие требования к зданиям и сооружениям. Создание комфортных, энергоэффективных и экологически устойчивых зданий из подходящих материалов остается актуальной задачей. В этом контексте древесина занимает особое место благодаря своим экологическим и эксплуатационным характеристикам [1]. В последние годы наблюдается растущий интерес к деревобетонным композитным конструкциям, которые объединяют преимущества древесины и бетона. Благодаря их благоприятным физико-механическим свойствам и возможности совместной работы в рамках единой системы, такие конструкции приобретают все большую популярность в строительной отрасли.

Деревобетонные перекрытия имеют ряд существенных преимуществ благодаря своей уникальной конструкции, сочетающей бетон и древесину [2]. Одним из главных достоинств является относительно небольшой вес, что значительно облегчает монтажные работы и позволяет использовать более экономичную строительную технику. Это способствует ускорению строительства и снижению затрат на транспортировку и монтаж элементов перекрытий. Также важным преимуществом является высокая огнестойкость: такие перекрытия способны долго сохранять свою несущую способность при пожаре, обеспечивая безопасность здания и предоставляя дополнительные временные ресурсы для эвакуации.

Кроме того, деревобетонные перекрытия хорошо поглощают звук благодаря массе бетонной части, что особенно важно при проектировании жилых и коммерческих зданий. В сочетании с использованием звукоизоляционных материалов эта характеристика становится

еще более эффективной. Конструкции отличаются низкой восприимчивостью к вибрациям благодаря разным физическим свойствам древесины и бетона, что помогает снизить влияние динамических нагрузок и повысить звукоизоляцию.

Еще одним важным преимуществом является высокая степень заводской сборки, которая обеспечивает качество, точность изготовления и сокращает сроки монтажа. Производство элементов на специализированных предприятиях позволяет учитывать размещение коммуникаций внутри плит, что особенно актуально для многоэтажных зданий. Такой подход способствует рациональному использованию пространства, повышает эстетику интерьера и снижает риск повреждения коммуникационных систем.

Хотя в Республике Беларусь деревобетонные плиты не используются, за рубежом они активно применяются в масштабных строительных проектах. Среди наиболее значимых примеров – здание Illwerke Zentrum, являющееся крупнейшим в Европе сооружением с использованием деревожелезобетонных плит. Это офисное здание гидроэнергетической компании, расположенное в альпийской долине над искусственным озером, демонстрирует высокую скорость возведения: каждый этаж площадью более 2000 м² строился всего за 7 дней. Проект включает в себя офисные помещения, ресторан, центр для посетителей и зоны отдыха [3].

Другим примером является здание Handwerkerhaus Uberseestadt, возведенное за рекордные 10 дней, что оказалось на 4 дня быстрее запланированного срока. Этот проект не только подтвердил высокую скорость строительства, но и продемонстрировал значительное снижение экологического воздействия: выбросы углекислого газа сократились на 80%, а общий вес конструкции – на 50% по сравнению с традиционными строительными материалами [4].

Третьим примером является офисное здание, состоящее из трех этажей и предназначенное для многопрофильного использования. Это здание, расположенное в центре Меммингена, было построено с применением сборных деревобетонных плит и также отличалось высокой скоростью возведения [5].

Экспериментальная часть. Одним из важных вопросов при использовании деревобетонных конструкций является надежное соединение бетона и древесины. Существуют два типа соединений по степени жесткости: гибкие и жесткие [6].

Гибкие соединения, такие как стержни, винты и наклонные элементы, позволяют уменьшить сдвиговые деформации, но не обеспечивают полную совместную работу материалов, что снижает эффективность передачи нагрузок. Они требуют большого количества элементов для достижения нужных характеристик.

Жесткие соединения, наоборот, обеспечивают неподвижность элементов при нагрузках и передают усилия без заметных потерь, позволяя конструкциям работать как единое целое и равномерно распределять напряжения [7].

Примером жестких соединений являются пазовые, создаваемые путём вырезания участков древесины на определенную глубину и последующего бетонирования. Одним из вариантов такого механического соединения являются бетонные шпонки, которые формируют путем высверливания отверстий в деревянных элементах и их бетонирования. Взаимодействие древесины и бетона осуществляется за счет механического зацепления шпонки, а также сил трения и адгезии между двумя материалами.

Для предварительной оценки влияния бетонных шпонок на жесткость и прочностные характеристики соединений в деревобетонных конструкциях были изготовлены экспериментальные образцы в виде фрагментов деревобетона. Их изготовление осуществлялось в испытательной лаборатории Полоцкого государственного университета имени Евфросинии Полоцкой. Образцы представляли собой односрезное соединение из двух призм бетона и древесины, соединенных между собой бетонной шпонкой (рисунок 1). В деревянной части высверливалось отверстие на глубину 50 мм. Варьируемыми параметрами принимался диаметр шпонки – 40, 60 и 80 мм, а также расстояние от шпонки до края образца. После установки опалубки происходило бетонирование с уплотнением бетонной смеси вибрированием.

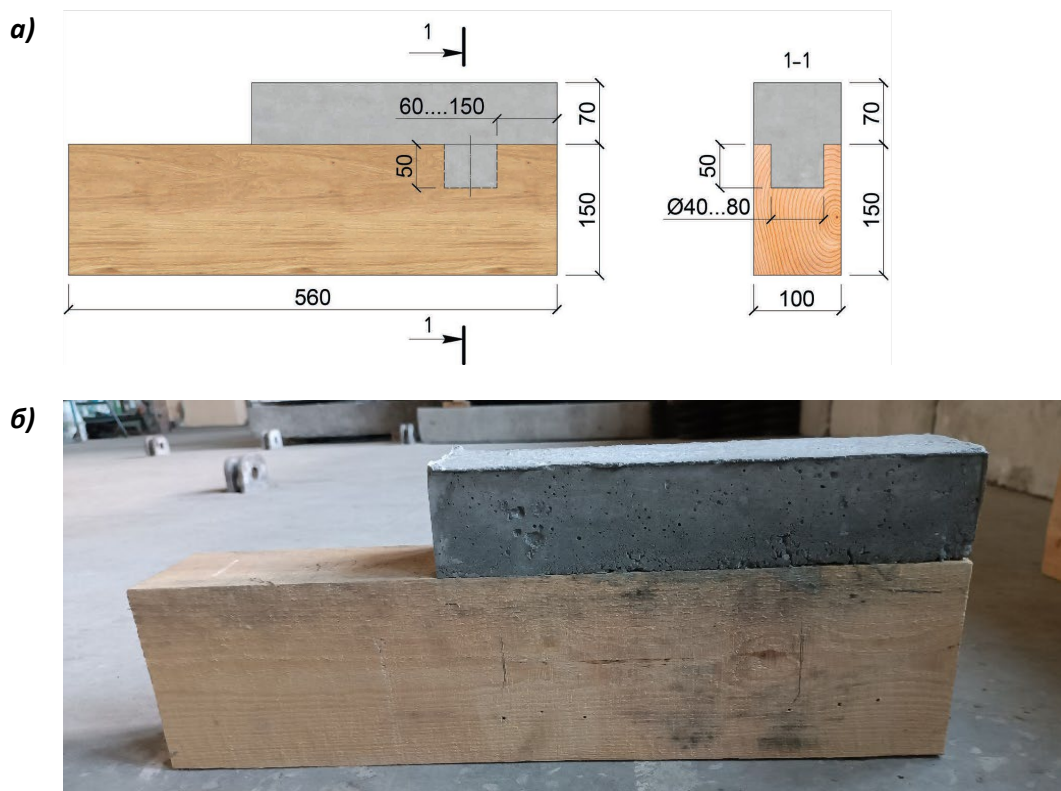


Рисунок 1. – Схема (а) и общий вид (б) экспериментальных деревобетонных образцов

Были определены физико-механические характеристики материалов, используемых при изготовлении образцов.

Для определения характеристик бетона испытывались кубы 100×100×100 мм и призмы 100×100×400 мм, которые твердели при 22°С и 67% влажности в течение 28 дней. Испытания на сжатие проводились гидравлическим прессом Пр-125. Средний предел прочности при сжатии у образцов составил около 65 МПа, а предел скалывания – 6,8 МПа. Модуль упругости бетона, определённый по призмам, составил 27,27 ГПа (рисунок 2).

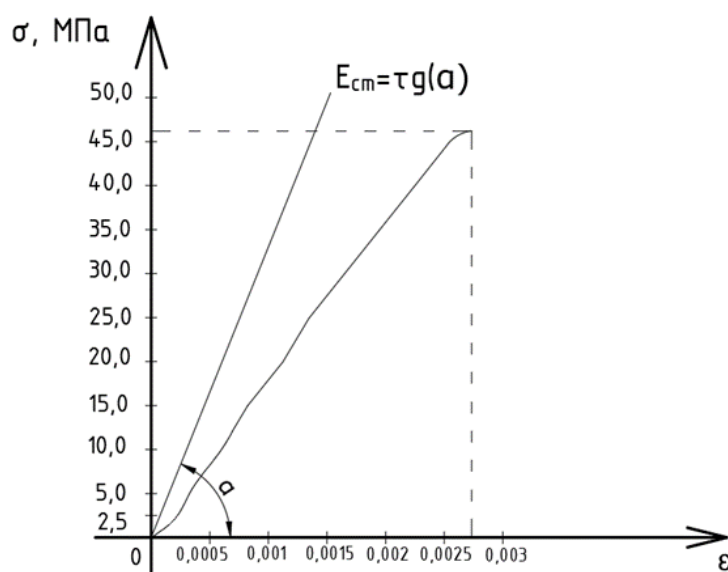


Рисунок 2. – Диаграмма зависимости между напряжениями и деформациями в бетоне при сжатии

Для оценки механических свойств древесины использовались образцы в виде призм, восьмерок и Т-образных элементов [8]. В результате испытаний были получены следующие характеристики древесины:

$$f_{c,о,м} = 49,35 \text{ МПа};$$

$$E_{c,о,м} = 14,125 \text{ ГПа};$$

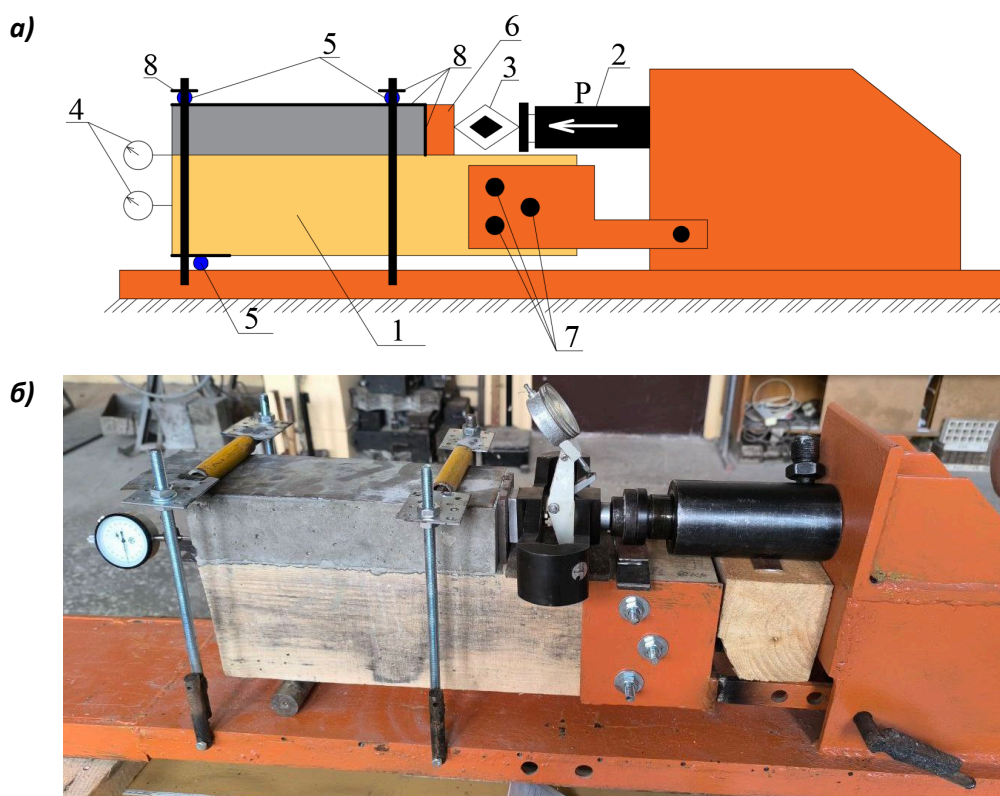
$$f_{t,о,м} = 83,53 \text{ Мпа};$$

$$E_{t,о,м} = 18,015 \text{ Гпа};$$

$$f_{v,м} = 2,12 \text{ Мпа}.$$

Полученные характеристики использовались для предварительного расчета предельных усилий сдвига, которое выдерживает экспериментальное соединение древесины и бетона.

Во время проведения испытаний фрагмент деревобетонной конструкции помещался в специализированный тестовый стенд, рисунок 3.



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 3 – Схема (а) и общий вид (б) стенда для испытания образцов на сдвиг

Для приложения горизонтальной нагрузки 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 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 приложенной домкратом нагрузки и величина смещения бетонной части относительно деревянной. Результаты исследования образцов деревобетона представлены в таблице 1.

Таблица 1. – Результаты испытаний образцов деревобетона на сдвиг

№ образца	Диаметр шпонки, мм	Расстояние от края шпонки до свободного торца, мм	Предельная нагрузка, кН	Предельные деформации, мм	Характер разрушения
ДБ1	40	60	25	0,49	Срез шпонки по контакту древесины и бетона
ДБ2	40	150	18	1,21	
ДБ3	60	60	17	0,68	
ДБ4	60	150	23	0,84	
ДБ5	80	60	50	0,98	

В ходе испытаний механического соединения бетона и древесины установлено, что при 5% от предельной нагрузки происходит потеря адгезии между бетоном и древесиной. После этого наблюдается линейная зависимость между приложенной сдвигающей силой и величиной сдвига бетонной части относительно деревянной. Разрушение соединения происходит мгновенно, по хрупкому механизму, вследствие среза бетонной шпонки (рисунок 4).



а)

б)

Рисунок 7. – Общий вид образца ДБ2 после разрушения

В области шпонки на деревянных элементах наблюдались локальные деформации в виде смятия древесины, что свидетельствует о концентрации напряжений в данной зоне.

Первые эксперименты показали, что исследуемое механическое соединение эффективно. Ключевым фактором его прочности при срезе стало разрушение бетонной шпонки.

Вследствие этого, 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 $T_{E,H}$ [9]:

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

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 сдвигу, 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:

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

При этом при рассмотрении участков, на которых задействовано несколько бетонных шпонок, сдвигающее усилие T_R в рассматриваемом сечении определяется суммой всех сдвигающих усилий, воспринимаемыми бетонными шпонками на данном участке.

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

Заключение. Деревобетонные перекрытия – это современное и перспективное решение в строительстве, которое отлично подходит как для новых зданий, так и для реконструкции старых.

В ходе исследований были проведены испытания механических соединений в деревобетонных элементах, что позволило определить ключевые прочностные и деформационные характеристики. На основе этих данных был разработан алгоритм для оптимального выбора количества бетонных шпонок в перекрытиях, а также методика их расчета с учетом всех характеристик. Эти результаты служат основой для практических рекомендаций по проектированию деревобетонных перекрытий, что расширяет их применение в строительстве.

ЛИТЕРАТУРА

1. Электронный сборник трудов молодых специалистов Полоцкого государственного университета имени Евфросинии Полоцкой [Электронный ресурс]: Полоц. гос. ун-т им. Евфросинии Полоцкой, 2024. – Вып. 54 (124). Прикладные науки. Строительство. – Новополоцк, 2024. – 95 с.
2. Электронный сборник трудов молодых специалистов Полоцкого государственного университета имени Евфросинии Полоцкой [Электронный ресурс]: Полоц. гос. ун-т им. Евфросинии Полоцкой, 2024. – Вып. 54 (124). Прикладные науки. Строительство. – Новополоцк, 2024. – 97 с.
3. Illwerke Zentrum [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www-hkarchitekten-at.translate.google/en/project/izm-illwerke-zentrum-montafon>. – Дата доступа: 15.11.2024.
4. Cree Buildings [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.creebuildings.com/project/handwerkerhaus-uberseestadt>. – Дата доступа: 16.11.2025.
5. Cree Buildings [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.creebuildings.com/project/office-building-memmingen>. – Дата доступа: 16.11.2025.

6. Zuschnitt Zeitschrift über Holz als Werkstoff und Werke in Holz [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.proholz.at/fileadmin/flippingbooks/zuschnitt54/files/assets/common/downloads/publication.pdf>. – Дата доступа: 15.11.2025.
7. Лазовский Д.Н., Гиль А.И., Хаткевич А.М., Ципан Г.О. Перспективы применения механического соединения в виде бетонных шпонок в деревобетонных конструкциях // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F. Строительство. Прикладные науки № 3(42). – Новополоцк, 2025. – С. 2–7.
8. 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. Том 8, выпуск 8. – С. 1187–1198. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.8.1187-1198. EDN DKHHQX.
9. Лазовский Д.Н., Гиль А.И., Глухов Д.О. Диаграмный подход при расчете деревянных конструкций по сп 5.05.01-2021. Вестник БрГТУ 2024, 66-72. DOI: 10.36773/1818-1112-2024-134-2-66-72.