

ОБЗОРНЫЙ ДОКЛАД: ДОЛГОВРЕМЕННОЕ ПОВЕДЕНИЕ ДЕРЕВЯННО-БЕТОННЫХ КОМПОЗИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

И. С. Сорокина 1, С. А. Агафонов

¹ студент, Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, (sorokina.is@edu.spbstu.ru)

² Ассистент — Высшая школа промышленно-гражданского и дорожного строительства, Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, (agafonov_sa@spbstu.ru)

Аннотация.

Предмет исследования: Предметом исследования является долговременное поведение деревянно-бетонных композитных (ДБК, англ. TCC — Timber–Concrete Composite) конструкций, применяемых в современном гражданском строительстве. Основные проблемы, на решение которых направлено исследование, связаны с недостаточной изученностью влияния ползучести, усадки бетона, механо-сорбтивного эффекта и циклического нагружения на деформативность и несущую способность ДБК в условиях реальной эксплуатации, а также с ограниченной нормативной базой для проектирования таких систем [1–4].

Цели: Целью работы является систематизация и анализ современных экспериментальных и теоретических данных о долговременном поведении ДБК-конструкций с учётом типа соединения, состава бетона, условий окружающей среды и характера нагружения, а также оценка соответствия существующих расчётных и нормативных подходов требованиям практики.

Материалы и методы: В обзоре использованы результаты исследований, опубликованных в ведущих научных журналах и отчётах [1–16], а также положения Eurocode 5 и проекта технической спецификации FprCEN/TS 19103 [4, 12]. Применены методы аналитического моделирования (модель эффективного модуля упругости) и численного анализа (МКЭ).

Результаты: Установлено, что kleевые соединения и применение ультравысокопрочный фибробетон (англ. UHPFRC — (Ultra-High-Performance Fiber Reinforced Concrete) обеспечивают наилучшую долговечность и стабильность жёсткости [1, 6, 10]. Циклическое нагружение при напряжениях $\leq 30\%$ от предела прочности не вызывает усталости, но усиливает ползучесть, особенно при переменной влажности [7, 8]. Остаточная прочность после длительного нагружения сохраняется или даже возрастает для систем с UHPFRC [1]. Данные по долговременному поведению соединений подтверждены как в лабораторных, так и в натурных испытаниях, включая многолетние исследования на образцах с различными типами креплений [4].

Выводы: Полученные результаты подтверждают высокий потенциал ДБК-конструкций для многоэтажного строительства. Рекомендуется развивать нормативную базу с учётом климатических факторов и новых материалов, а также стандартизировать методики испытаний соединений для обеспечения надёжного и устойчивого применения ДБК в практике [12, 14].

ВВЕДЕНИЕ

В современном строительстве наблюдается рост интереса к гибридным системам, сочетающим возобновляемые и традиционные материалы. Особое внимание привлекают древесно-бетонные композитные (ДБК, англ. TCC — Timber-Concrete Composite) конструкции, объединяющие высокую прочность древесины на растяжение и эффективную работу бетона на сжатие. Такой подход позволяет значительно повысить жёсткость, несущую способность и общую эффективность конструкций по сравнению с цельнодеревянными аналогами [1].

Однако при проектировании ДБК для зданий с длительным сроком службы необходимо учитывать долговременные эффекты: ползучесть, усадку, циклическое нагружение и влияние климатических факторов (в первую очередь — влажности). Эти явления могут существенно изменить деформативность и прочностные характеристики системы со временем [2, 3].

Целью настоящей работы является систематизация и анализ современных научных данных о долговременном поведении ДБК-конструкций с акцентом на тип соединения, состав бетона, условия эксплуатации и характер нагружения, а также оценка соответствия существующих нормативных и расчётных методик реальным условиям эксплуатации.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Анализ основан на результатах экспериментальных исследований, проведённых в лабораторных условиях при длительном и циклическом нагружении полноразмерных ДБК-образцов длиной до 8 м [1]. Использовались два типа бетона — обычный (C40/50) и ультравысокопрочный фибробетон (англ. UHPFRC — Ultra-High-Performance Fiber Reinforced Concrete) — и два типа армирования: стальная арматура и CFRP-стержни. Соединение древесины и бетона осуществлялось с помощью клеевой системы на основе эпоксидного клея с кварцевым песком [1, 6].

Особое внимание удалено работам Chuan DYE (2010), в которых проведены комплексные испытания ДБК-балок с различными типами соединителей (включая нарезные шурупы и вырезные соединения) под длительной нагрузкой в течение нескольких лет. Эти данные легли в основу современных подходов к оценке долговечности соединений [4].

Моделирование долговременного поведения выполнено с использованием аналитической модели эффективного модуля упругости [10] и численных моделей методом конечных элементов (МКЭ) [11, 15]. В качестве нормативной базы использованы Eurocode 5 и проект технической спецификации FprCEN/TS 19103 [4, 12].

Анализ охватывает следующие аспекты:

- Типы соединений: механические (шурупы, шпонки, гвозди), клеевые (эпоксидные/полиуретановые составы с кварцевым песком) и гибридные системы.
- Виды бетона: обычный (C25/30–C40/50) и ультравысокопрочный фибробетон (UHPFRC).
- Армирование: стальная арматура, CFRP-стержни, фибро- и текстильное армирование.
- Долговременные явления: ползучесть древесины и бетона, механо-сорбтивный эффект, усадка бетона.

- Нагружение: длительное статическое и циклическое (до 1 млн циклов, имитирующее эксплуатационные нагрузки в офисных зданиях).
- Методы моделирования: аналитические (модель эффективного модуля упругости) и численные (МКЭ с учётом нелинейности и повреждений).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Общие принципы работы ДБК.

Работа древесно -бетонных композитов во многом основана на формировании взаимодействия между деревянной частью (клёянной — КДК, ДПК или LVL) и бетонной. Эффективность композитного действия зависит от жесткости соединения, которая варьируется от полной совместной работы (Full composite action) до отсутствия совместной работы (No composite action). Идеальным считается полная совместная работа при котором жесткость соединение является бесконечной, так что обеспечивается полная передача горизонтального сдвига без проскальзывания. При нижнем пределе сила горизонтального сдвига не передается между слоями и каждый слой скользит как два независимых элемента с более высокой величиной скольжения. На практике чаще встречается частичная совместная работа (Partial composite action). Клеевые системы обеспечивают практически полное отсутствие скольжения даже после 1 млн циклов нагружения [1, 6]. В то же время механические соединители подвержены деградации из-за ползучести древесины и влажностных колебаний [9].

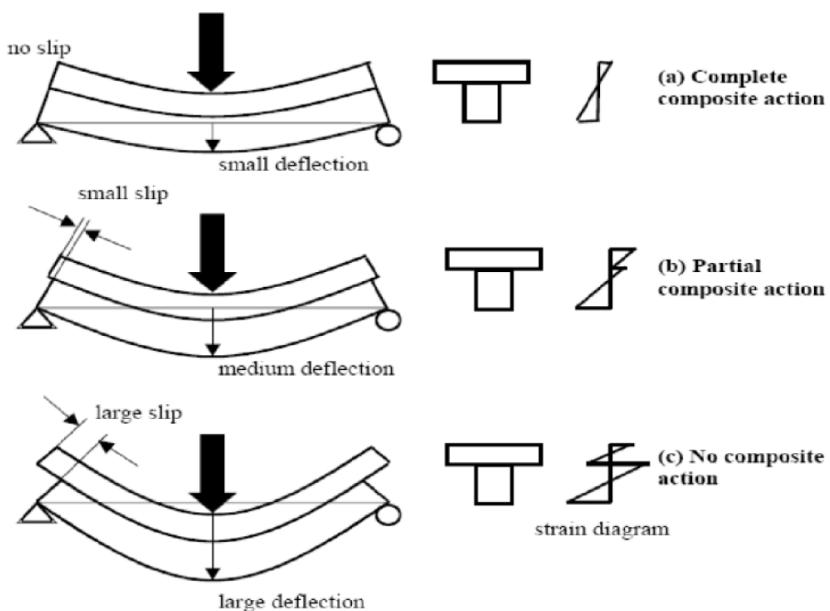


Рис. 1. Жесткости соединения: а) полная совместная работа, б) частичная совместная работа с) Отсутствие совместной работы [4]

Ползучесть и усадка.

Коэффициент ползучести древесины может превышать аналогичный для бетона в 2-3 раза, особенно при переменной влажности [2]. Это приводит к перераспределению внутренних усилий и росту прогибов. Усадка бетона в ранние сроки может вызывать отслоение плиты, если не применены меры по контролю твердения [3].

Циклическое нагружение.

Испытания при циклической нагрузке от 4 до 20 кН (соответствует эксплуатационным нагрузкам в офисных зданиях) показали, что при напряжениях $\leq 30\%$

от предела прочности усталостного разрушения не происходит [1]. Однако наблюдается монотонный рост прогибов за счёт ползучести.

Остаточная прочность.

Для ДБК с kleевым соединением и UHPFRC остаточная прочность после циклического нагружения сохраняется или увеличивается на 10–24 % за счёт дальнейшего набора прочности бетона [1]. В системах с обычным бетоном и стальной арматурой возможны отслоения плиты в приопорных зонах, что снижает несущую способность на 20–40 % [1].

Моделирование и нормы.

Аналитические модели позволяют достаточно точно прогнозировать эволюцию прогибов при постоянной влажности [9]. Однако существующие нормы недостаточно полно учитывают влияние переменной влажности и поведение новых материалов (UHPFRC, FRP) [12, 14].

ВЫВОДЫ

Древесно-бетонные композитные конструкции обладают высоким потенциалом для применения в многоэтажном и мостовом строительстве. Их долговременное поведение определяется:

- типом соединения: kleевые системы обеспечивают лучшую долговечность и стабильность жёсткости [1, 6];
- составом бетона: UHPFRC позволяет снизить вес и повысить трещиностойкость [1, 10];
- условиями эксплуатации: переменная влажность существенно ускоряет ползучесть [7];
- уровнем напряжений: при низких уровнях (≤ 30 % от предела) циклическое нагружение не вызывает усталости [1].

Были выявлены нерешённые вопросы:

- прогнозирование поведения в условиях реальной эксплуатации (с учётом климата, вибраций, пожарной нагрузки);
- разработка унифицированных методик испытаний соединений;
- интеграция современных материалов в нормативную базу [12, 14].

Решение этих задач позволит обеспечить надёжное, экономически эффективное и экологически устойчивое применение ДБК-конструкций в современном строительстве.

ЛИТЕРАТУРА

1. Augeard E., Ferrier E., Michel L. Mechanical behavior of timber–concrete composite members under cyclic loading and creep // Engineering Structures. – 2020. – Vol. 210. – P. 110289. – <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110289> .
2. Dias A., Skinner J., Crews K., Tannert T. Timber–Concrete Composites: Increasing the use of timber in construction // European Journal of Wood and Wood Products. – 2016. – Vol. 74, № 3. – P. 443–451. – <https://doi.org/10.1007/s00107-015-0975-0> .
3. Fragiacomo M., Lukaszewska E. Time-dependent behaviour of timber–concrete composite floors with prefabricated concrete slabs // Engineering Structures. – 2013. – Vol. 52. – P. 687–696. – <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.03.033> .

4. Chuan D. Y. E. Behaviour and Design of Timber-Concrete Composite Floor System. PhD Dissertation. – Christchurch: University of Canterbury, 2010.
5. CEN/TS 19103:2018. Eurocode 5: Design of timber structures – Structural design of timber-concrete composite structures. – Brussels: CEN, 2018.
6. Kong K., Ferrier E., Michel L., Agbossou A. Experimental and analytical study of the mechanical behaviour of heterogeneous glulam–UHPFRC beams assembled by bonding: Short- and long-term investigations // Construction and Building Materials. – 2015. – Vol. 100. – P. 136–148. – <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.09.022>.
7. O’Ceallaigh C., Sikora K., McPolin D., Harte A. M. An investigation of the viscoelastic creep behaviour of basalt fibre reinforced timber elements // Construction and Building Materials. – 2018. – Vol. 187. – P. 220–230. – <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.193>.
8. O’Ceallaigh C., Sikora K., McPolin D., Harte A. M. Mechano-sorptive Creep in Reinforced Glulam // Proc. WCTE 2018 World Conf. Timber Eng. – Seoul, Rep. of Korea, 2018.
9. Yeoh D., Fragiacomo M., Carradine D. Fatigue behaviour of timber–concrete composite connections and floor beams // Engineering Structures. – 2013. – Vol. 56. – P. 2240–2248. – <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.08.042>.
10. Khorsandnia N., Schänzlin J., Valipour H., Crews K. Coupled finite element–finite difference formulation for long-term analysis of timber–concrete composite structures // Engineering Structures. – 2015. – Vol. 96. – P. 139–152. – <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.03.047>.
11. Tao H., Yang H., Zhang J., Ju G., Xu J., Shi B. Nonlinear finite element analysis on timber–concrete composite beams // Journal of Building Engineering. – 2022. – Vol. 51. – P. 104259. – <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104259>.
12. Dias A., Schänzlin J., Dietsch P. (Eds.). Design of Timber–Concrete Composite Structures: A State-of-the-Art Report by COST Action FP1402/WG 4. – Aachen: Shaker Verlag, 2018. – 256 p. – <https://www.cost.eu/wp-content/uploads/2018/11/Design-of-Timber-Concrete-Composite-Structures.pdf>.
13. Shi B., Zhou X., Tao H., Yang H., Wen B. Long-Term Behavior of Timber–Concrete Composite Structures: A Literature Review on Experimental and Numerical Investigations // Buildings. – 2024. – Vol. 14, № 6. – P. 1770. – <https://doi.org/10.3390/buildings14061770>.
14. Cvetković R., Ranković S., Mišulić T. K., Kukaras D. Experimental Analysis of Mechanical Behavior of Timber–Concrete Composite Beams with Different Connecting Systems // Buildings. – 2024. – Vol. 14, № 1. – P. 79. – <https://doi.org/10.3390/buildings14010079>.
15. Ferrier E., Labossière P., Neale K. W. Modelling the bending behaviour of a new hybrid glulam beam reinforced with FRP and ultra-high-performance concrete // Applied Mathematical Modelling. – 2012. – Vol. 36, № 8. – P. 3883–3902. – <https://doi.org/10.1016/j.apm.2011.11.023>.
16. Naud N., Sorelli L., Salenikovich A., Cuerrier-Auclair S. Fostering GLULAM–UHPFRC composite structures for multi-storey buildings // Engineering Structures. – 2019. – Vol. 188. – P. 406–417. – <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.03.030>.