

В течение XX века железобетон приобрел статус ведущего строительного материала. Его широкое применение повлияло на технологии строительства и планировку городов и в значительной степени сформировало эстетику модернизма. В начале текущего столетия стоимость производства цемента и бетона демонстрирует быстрый рост, а нагрузка на окружающую среду при производстве цемента становится все более неприемлемой. Экономические и экологические факторы заставляют искать замену железобетону. В частности, возобновляется интерес к строительным материалам на основе древесины. Проблема заключается в том, что доминирование бетона сформировало устойчивую ориентацию архитекторов на специфический набор свойств – изотропность, высокую плотность, пожарную безопасность и т. д., которые отсутствуют у древесины. Компромиссным вариантом является поперечно-клееная древесина (CLT), которая при этом обладает собственными недостатками и ограничениями. В статье сделан вывод о необходимости диверсификации палитры строительных материалов и разработки специальных программ обучения архитекторов работе с широким спектром строительных материалов.

**Ключевые слова:** архитектура; строительство; материалы; бетон; клееная древесина; CLT.

During the twentieth century, reinforced concrete acquired a status of a leading building material. Its wide application influenced the construction technologies and the layout of cities and largely shaped the aesthetics of modernism. At the beginning of this century, the cost of cement and concrete production is showing rapid growth, and the environmental burden from cement production is becoming increasingly unacceptable. Economic and environmental factors force us to look for a replacement for reinforced concrete. In particular, there is renewed interest in wood-based building materials. The problem is that the dominance of concrete has formed a stable orientation of architects to a specific set of properties – isotropy, high density, fire safety, and so on, which are absent from wood. A compromise option is cross-laminated timber (CLT), which at the same time has its own disadvantages and limitations. The article concludes that it is necessary to diversify the palette of building materials and develop special training programs for architects to work with a wide range of building materials.

**Keywords:** architecture; construction; materials; concrete; laminated timber; CLT.

## Материальная палитра архитектора / The architect's material palette

текст

**Алексей Буйнов**

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

**Константин Лидин**

Федерация «Союз соотечественников» (Болгария) /

text

**Alexei Buiinov**

National Research Moscow State University of Civil Engineering

**Konstantin Lidin**

Federation of Fellow Citizens (Bulgaria)

### Его величество бетон

Прошлый, XX век нередко характеризовали как «век железобетона». Портландцемент и бетон из него почитательно именовали «хлебом промышленности». Основатели модернизма считали изобретение бетона величайшей удачей современной архитектуры, сформировавшей и эстетику, и экономику этого течения. Ле Корбюзье необычайно высоко ценил этот материал, считал его вершиной строительных технологий и стремился использовать как можно шире: так, для проекта Марсельской жилой единицы он предложил бетонную лампу *Vorne Béton*. Лампа предлагалась в двух размерах – побольше (для освещения садовых дорожек вокруг дома) и поменьше (для интерьерного использования). Из бетона делалась мебель, декоративные панели, памятники, дорожные покрытия... Перечисление можно продолжать до бесконечности.

Железобетон, действительно, необычайный материал, и даже история его изобретения напоминает авантурный роман. Четыре человека практически одновременно получили патенты на использование железобетона в разных областях. В 1848 году Жан Луи Ламбо, адвокат по профессии, первым соорудил лодку из железобетона. Показанная в 1855 году на Парижской выставке лодка Ламбо произвела настоящую сенсацию. Материал он назвал ферроцементом. В 1849 году парижский садовник Жозеф Монье изготовил кадку для садовых растений, обмазав проволочный каркас цементным раствором. Именно сочетание этих двух материалов стало называться железобетоном. В 1854 году штукатур Вильям Уилкинсон получил патент на конструкцию огнестойкого перекрытия, состоящего из железных полос, укладываемых на расстоянии два фута друг от друга и заливаемых бетоном. Уилкинсон разработал систему рационального армирования и даже построил небольшой домик из железобетона, но его идеи не привлекли широко внимания. И наконец, в 1855 году Франсуа Куанье получил патент на метод армирования, предложив перекрестное размещение арматуры. Он приложил много усилий по пропаганде нового материала, а с 1873 по 1885 год получил множество патентов разных стран (включая Россию) на изделия из него: железобетонный мост, шпалы, пере-

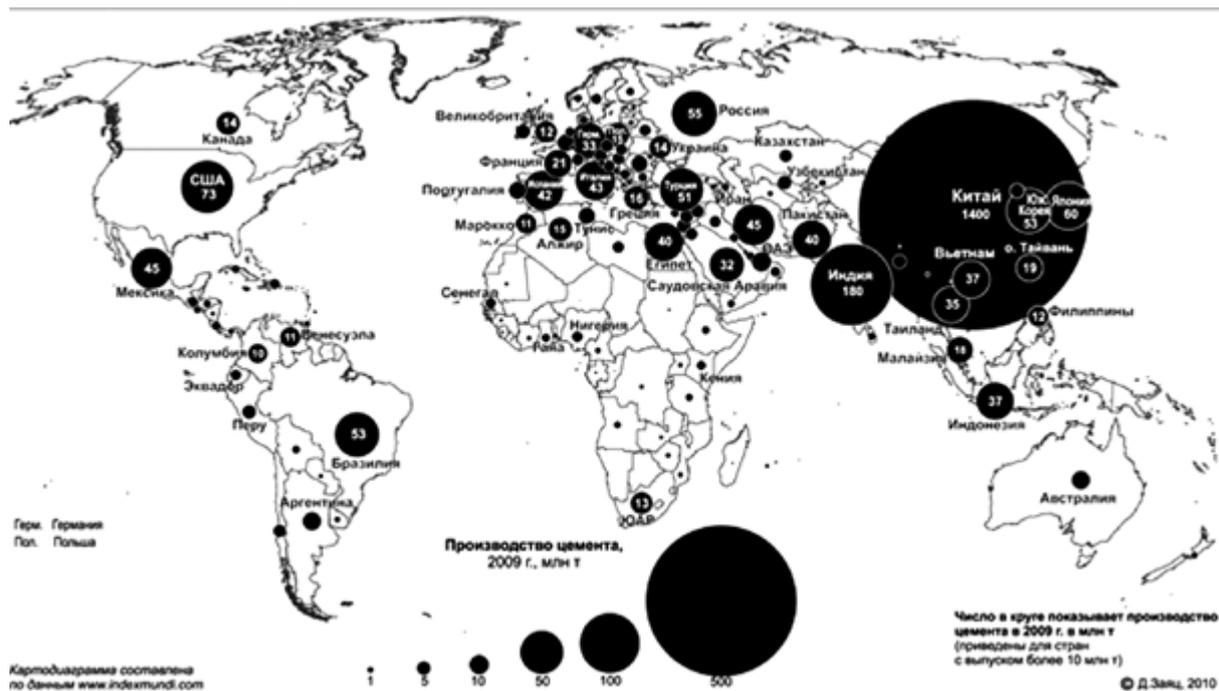
крытия, балки, своды и железобетонные трубы. Именно 1855 год считается официальной датой рождения строительного железобетона [1].

За прошедшие с тех пор полтора века бетон действительно стал основой строительных технологий. Появляется множество разновидностей бетона в широком диапазоне прочности, плотности, стойкости к различным средам, по видам наполнителей и т. д. Возникающие прямо сейчас строительные технологии завтрашнего дня (например, 3D-печать) полностью ориентированы на бетонные смеси или их производные [2]. Применение железобетона настолько распространилось в различных сферах, что этот материал начал как будто претендовать на универсальность: кажется, что он уже способен остаться единственным строительным материалом, вытеснив собой все остальное. Добавим к железобетону немного кирпича для пластика, немного стекла для инсоляции – и вот универсальная строительная технология, которой не нужны больше никакие материалы. Брутализм наиболее близко подошел к этому минимальному набору, а его всемирное распространение, казалось, создало поистине универсальный международный стиль. Однако по мере расширения сфер, в которых воцаряется бетон, становятся виднее принципиальные недостатки этого материала.

### Не панацея

На рубеже прошлого и нынешнего веков на первый план вышли два момента в производстве цемента, заставляющие сомневаться в универсальности этого материала. Во-первых, производство цемента весьма энергоемко. Спекание клинкера происходит при температуре около полутора тысяч градусов, для производства тонны цемента нужно 200 кг условного топлива (т. е. качественного каменного угля или его эквивалентов). Плюс к этому помол клинкера до состояния цементного порошка требует расходов электроэнергии в количестве около 30 кВт•ч на один килограмм цемента.

Второй врожденный порок технологий цементных бетонов – это их экологическая опасность. Большие выбросы углекислого газа при обжиге клинкера складываются с неизбежным выделением огромного количе-



< Рис. 2. Производство цемента по странам мира

ства ядовитой цементной пыли при помоле и ситовании готового продукта [3].

Именно эти особенности производства цемента в конце XX века вызвали его перетекание в страны Юго-Восточной Азии (в основном Китай и Индию), где экологическое законодательство менее строгое, а электроэнергия дешевле, чем в Европе. К началу текущего века больше половины мирового производства цемента базировалось в Китае, на втором месте с восьмикратным отставанием находилась Индия, а все остальные производители (США, Япония, Корея, Россия, Бразилия и т. д.) уступали ей еще в три-четыре раза [4].

В течение 2010-х годов объемы строительства в Китае и Индии росли опережающими темпами и внутреннее потребление цемента превысило экспорт. К тому же стремление Китая любой ценой оставаться на западных рынках заметно ослабло. Разбогатевший Китай больше не видел смысла в том, чтобы удерживать низкие цены на свою продукцию ради сохранения позиции на западных рынках. Одновременно с этими процессами набирала обороты санкционная война Евросоюза с Ираном и Россией, основными поставщиками энергоресурсов в Европу, а в самих европейских странах «зеленые» становились все более влиятельными и агрессивными. Все это привело к стремительному росту стоимости цемента и, как следствие, всех разновидностей бетона. В начале 2020-х годов цены на цемент росли со скоростью 10–15% в год, опережая инфляцию и делая бетонные строительные технологии все менее привлекательными. Сложилась экономическая база для поиска принципиально иных строительных материалов, способов строительства и архитектурных решений.

Соединенное давление экологии и экономики заставило искать альтернативы цементу и бетону. Стало понятно, что один материал, каким бы разнообразным он ни был, не способен заменить палитру строительных технологий. На первый план вышла необходимость диверсификации, и вот на рубеже тысячелетий архитекторы вспомнили о древесине. Начало меняться отношение к деревянному домостроению: из символа смешного и наивного прошлого дерево превращалось в знак прогресса и заботы о будущем.

### Дерево как бетон

Проблема, однако, оказалась в следующем: за столетие доминирования бетона и нормативы, и приемы проектирования, и само мышление архитекторов сосредоточились именно на этом материале или его аналогах. В практику архитектурно-строительной сферы прочно вошел набор свойств материалов негорючих, изотропных, тяжелых, хорошо работающих на сжатие, а в сочетании со стальным каркасом – на изгиб.

Строительная древесина выглядит прямой противоположностью перечисленному набору свойств. Дерево горит, у него ярко выраженная анизотропная (слоистая и волокнистая) структура, дерево легче воды и прекрасно работает на изгиб, но хуже – на сжатие. Оно обладает высокой пористостью, отсюда его воздухо- и водопроницаемость. Кроме того, без специальной защиты древесина является комфортной средой для проживания нежелательных «соседей» человека – насекомых, плесневых грибов, грызунов. Есть и еще один существенный фактор: даже самые передовые технологии выращивания и сушки деловой древесины не способны полностью устранить различия между отдельными растениями. Будучи живыми существами, деревья отличаются друг от друга, и стандарты на изделия из деловой древесины никогда не смогут быть такими точными и жесткими,



< Рис. 1. Лампа Borne Béton Petite. Дизайн Ле Корбюзье, 1952



< Рис. 3. Павильон IAAE + Bauhaus Earth в Барселоне – манифест технологии CLT. Реплика ониксовой стены прототипа – павильона Миса ван дер Роэ и Лилли Райх 1929 года

как стандарты на строительные детали из бетона, керамики или металла.

Переход к проектированию и строительству из дерева дополнительно столкнулся с проблемой психологического плана: навыки такого строительства оказались забыты, а само дерево успело приобрести клеймо опасного и слабого строительного материала. К тому же экологический кризис на рубеже тысячелетий в основном связывали не с выбросами углекислоты, а с вырубкой лесов – отсюда дополнительная стигматизация древесины, ведь бревна – это «трупы убитых деревьев».

Компромисс был найден в виде поперечно-клееной древесины (cross-laminated timber, CLT). Несколько (не менее трех) слоев древесины, склеенных под прямым углом, во многом повторяют свойства бетона. Плиты CLT обладают одинаковой жесткостью по двум осям (т. е. они частично изотропны), пористость древесины понижена при пропитке клеящими смолами, за счет чего усилена стойкость к огню, воде и нежелательным «жильцам». Строительные детали из поперечно-клееной древесины могут быть стандартизованы с такой же точностью, как изделия из неорганических материалов.

Среди первых «прорывов», связанных с поперечно-клееной древесиной, в крупномасштабном строительстве следует назвать проекты 2015 года – проект десятиэтажного жилого дома The Cube вниз по дороге в Хакни в Лондоне британской студии «Хокинс/Браун» (плиты CLT, собранные на стальном каркасе) и проект Albina Yard студии LEVER Architecture в Портленде (каркас из клееного бруса и плиты CLT). Перелом в общественном отношении к клееной древесине принято отсчитывать от широко разрекламированного проекта здания «Улыбка» (Smile). В сентябре 2016 года Alison Brooks Architects в сотрудничестве с Американским советом по экспорту лиственных пород (АНЕС), Arup в рамках Лондонского фестиваля дизайна построили Smile в художественном колледже Челси в Лондоне. Здание имеет оригинальную форму, похожую на «банан в профиль»: оно опирается на фундамент своей средней частью, а оба его конца консольно висят в воздухе. Изгиб длиной 34 м демонстрирует надежность и прочность клееной древесины на высоте до 3 м над землей, без дополнительной поддержки [5].

В 2021 году Международный совет по строительным нормам постановил, что CLT-здания могут попадать под действие Международного строительного кодекса IV-A, что означает, что максимальная высота деревянных небоскребов (CLT skyscraper) может достигать 270 футов (90 м). Центр Sara Kulturhus в Швеции (студия White Arkitekter) высотой более 260 футов в настоящее время является одним из самых высоких в мире деревянных сооружений с деревянным каркасом и ограждающими конструкциями.

Исследования также показали, что, хотя поперечно-клееная древесина легко воспламеняется, она обладает огнестойкостью REI 90 (т. е. сохраняет достаточную несущую способность в течение 90 минут после воспламенения) по сравнению с незащищенной сталью REI 15.

Тем не менее стереотипы мышления в «бетонном стиле» остаются весьма влиятельными. Яркий пример – недавняя инсталляция «Масса – это больше» (Mass is more – намек на знаменитый слоган минимализма: Less is more) от IAAE + Bauhaus Earth в Барселоне. Этот павильон является местом проведения церемонии вручения премий Европейской биеннале в области современной архитектуры. Проект полностью выполнен в технологии поперечно-клееной древесины, но его формы буквально повторяют известный Немецкий павильон Людвиг Мис ван дер Роэ и Лилли Райх на Барселонской выставке 1929 года. Даже знаменитая стена из оникса воспроизведена в технике фрезерованной многослойной панели из испанской древесины нескольких пород. Проект призван убедить архитекторов и строителей в том, что древесина ничуть не хуже бетона и камня.

#### **Популярный, но не универсальный**

Справедливости ради подчеркнем, что клееная древесина никак не претендует на то, чтобы заменить бетон в роли единственного или хотя бы доминирующего строительного материала. У клееной древесины – свои особенности и недостатки. Так, стоимость производства CLT все еще остается весьма высокой. По данным Concrete Reinforcing Steel Institute, стоимость конструкций из клееной древесины на 16–29% выше, чем для аналогичных строений из железобетона [6]. По этой причине

проекты на основе CLT в основном реализуются в богатых регионах. Так, по данным Grand View Research, объем мирового рынка клееной древесины в 2022 году оценивался в 1,17 млрд долларов США, и ожидается, что совокупный годовой темп роста (CAGR) составит 14,9% с 2023 по 2030 год. Но при этом европейский рынок составляет около 60% глобального рынка CLT, еще около 20% приходится на Северную Америку, около 10% – на «нефтяные монархии» Персидского залива, и лишь 10% – на весь остальной мир [7].

Еще один существенный недостаток клееной древесины – присутствие в ее составе значительного количества синтетических смол. В основном в качестве клея используются полиуретановые смолы (PUR), но также часто встречаются фенол-резорциновые и фенол-формальдегидные (PRF), меламин-формальдегидные смолы и составы на основе меламин-мочевины (MUF). Все эти составы сертифицируются как безопасные для человека, в том числе при нагревании (например, в случае пожара). Однако это относится только к чистым, высококачественным смолам. Большинство примесей, которые могут содержаться в смолах среднего и низкого качества, при нагреве способствуют образованию крайне опасных выбросов ядовитых газов. При массовом использовании строительных деталей из клееной древесины всегда есть вероятность, что в случае пожара люди погибнут не от огня, а от отравления.

#### Диверсификация палитры материалов

Приведенные факты свидетельствуют, что ни один из строительных материалов не может рассматриваться в качестве единственного или хотя бы преобладающего в общем потоке архитектурно-строительных решений. Только сочетание материалов и технологий способно дать эффективные варианты, соблюдающие баланс между экономикой, безопасностью для людей и окружающей среды, долговечностью. Здесь уместно вспомнить опыт одного из самых ярких и блистательных периодов в развитии российской архитектуры – опыт движения конструктивистов. Небольшая по объему книга «Жилище» М. Я. Гинзбурга вышла из печати в 1934 году. Книга содержит несколько прекрасных примеров сочетания массивного дерева с металлом, камнем, бетоном и кирпичом. Эта же идеология лежала в основе учебных программ ВХУТЕМАСа, где будущие архитекторы осваивали работу с различными материалами как теоретически, так и «руками», в столярных и слесарных мастерских. И это не случайно. Работа с широкой палитрой строительных материалов требует от архитектора не только эрудиции и сильной базовой подготовки в строительной физике. Необходимо также развитое ощущение материала, понимание особенностей каждого из них на уровне телесных переживаний. Материал важно чувствовать руками. К сожалению, ничего подобного мы не видим в сегодняшних архитектурных вузах, которые все больше сосредотачиваются на компьютерных методах проектирования. Конструкции, которые создаются в виртуальных пространствах специализированными программами, не способны опереться на ощущение материала, они не могут (да и не должны) выстраивать диалог архитектора с материалом – такой, чтобы материал работал на пределе своих возможностей, со всем своим уникальным характером и потенциалом. Именно в этом случае возникают прекрасные произведения архитектурного искусства, такие как деревянные церкви Русского Севера, металлические, парящие в воздухе конструкции Сантьяго Калатравы или изысканные формы монолитного бетона капеллы Роншан Ле Корбюзье.

Возрождение уважительного и комплексного отношения архитекторов ко всему богатству строительных материалов и технологий, накопленных человечеством за ты-

сячелетия, – задача непростая и небыстрая. Упрощенное отношение к работе с материалом в последние годы помножилось на массовое увлечение компьютерными методами проектирования. Архитектор, сосредоточенный на экранной картинке, зачастую забывает о том, как эта картинка будет выглядеть в реальном строении – особенно через несколько лет или десятилетий эксплуатации. А ведь все строительные материалы стареют по-разному, и эти процессы сильно зависят от грамотного и уважительного отношения к ним со стороны проектировщика. Есть ли еще шансы, что молодое поколение архитекторов выйдет из-под гипноза компьютерных визуализаций и вернется из виртуальной реальности в физическую реальность дерева, металла, керамики и стекла (разумеется, принеся с собой и все возможности цифрового проектирования)? Но эти вопросы мы планируем обсудить в следующих статьях.

#### Литература

1. Гаузе, Ф. Г. Железобетон в XX веке. – Москва, 1927. – 108 с.
2. Иноземцев, А. С., Королев, Е. В., Зюонг, Т. К. Анализ существующих технологических решений 3D-печати в строительстве // Вестник МГСУ. – 2018. – Т. 13, вып. 7 (118). – С. 863–876.
3. Green Building with Concrete: Sustainable Design and Construction / Ed. M. S. Gajanan. – London: Taylor & Francis, 2015. – 459 p.
4. Cement: 2023 World Market Review and Forecast to 2032. – London: Merchant Research & Consulting Ltd. – 181 p.
5. Wormald, J. The Meteoric Rise of Cross-Laminated Timber Construction: 50 Projects that Use Engineered-Wood Architecture. ArchDaily. – URL: <https://www.archdaily.com/996319/the-meteoric-rise-of-cross-laminated-timber-construction-50-projects-that-use-engineered-wood-architecture> (дата обращения: 24.06.2023).
6. Cost Comparison of Cross Laminated Timber (CLT) and Cast-in-place Reinforced Concrete Structures // Resources.crsi.org. – 2018. – URL: [file:///C:/Users/user/Downloads/CRSI-ETN-D-5-18\\_CostofCLTVsCIPRC.pdf](file:///C:/Users/user/Downloads/CRSI-ETN-D-5-18_CostofCLTVsCIPRC.pdf) (дата обращения: 24.06.2023).
7. Cross Laminated Timber Market Size, Share & Trends Analysis Report By Product (Adhesive Bonded CLT, Mechanically Fastened CLT), By Application (Residential, Institutional), By Region, And Segment Forecasts, 2023–2030. Grand View Research. – URL: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/cross-laminated-timber-market> (дата обращения: 25.06.2023).

#### References

- Cement: 2023 World Market Review and Forecast to 2032.* (2023). London: Merchant Research & Consulting Ltd.
- Cross Laminated Timber Market Size, Share & Trends Analysis Report By Product (Adhesive Bonded CLT, Mechanically Fastened CLT), By Application (Residential, Institutional), By Region, And Segment Forecasts, 2023-2030.* (2023). Grand View Research. Retrieved June 25, 2023, from <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/cross-laminated-timber-market>
- Fanella, D. A. (2018). *Cost Comparison of Cross Laminated Timber (CLT) and Cast-in-place Reinforced Concrete Structures.* Resources.crsi.org. Retrieved June 24, 2023, from [file:///C:/Users/User/Downloads/CRSI-ETN-D-5-18\\_CostofCLTVsCIPRC.pdf](file:///C:/Users/User/Downloads/CRSI-ETN-D-5-18_CostofCLTVsCIPRC.pdf)
- Gajanan, M. S. (Ed.). (2015). *Green Building with Concrete: Sustainable Design and Construction.* London: Taylor & Francis.
- Gauze, F. G. (1927). *Zhelezobeton v XX veke [Reinforced concrete in the XX century].* Moscow.
- Inozemtcev, A. S., Korolev, E. V., & Duong, T. Q. (2018). Analysis of existing technological solutions of 3D-printing in construction. *Vestnik MGSU*, 13(7 (118)), 863-876.
- Wormald, J. (2023, May 27). *The Meteoric Rise of Cross-Laminated Timber Construction: 50 Projects that Use Engineered-Wood Architecture.* ArchDaily. Retrieved June 24, 2023, from <https://www.archdaily.com/996319/the-meteoric-rise-of-cross-laminated-timber-construction-50-projects-that-use-engineered-wood-architecture>