

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ КЛЕЁНЫХ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

УДК 69.011.14

DOI: 10.24412/1998-4839-2021-1-156-164

Э.А. Акшов*Московский архитектурный институт (государственная академия), Москва, Россия***Аннотация**

В статье рассмотрены технологические особенности клееных деревянных конструкций как перспективных строительных элементов, обладающих высокими прочностными характеристиками, легкостью транспортировки. Исследовано их производство и влияние на экологию. На основе данных о поглощении углекислого газа и удержании биогенного углерода продемонстрированы экологические преимущества использования клееных деревянных конструкций. В материале показана вариативность производства клееных деревянных конструкций с помощью стеклопластичного клея FRP или альтернативного метода, основанного на дюбельных соединениях.¹

Ключевые слова: экологическая парадигма, клееные деревянные конструкции в архитектуре, оценка жизненного цикла (ОЖЦ), LVL-брус, CLT-панели

TECHNOLOGICAL FEATURES OF GLUED WOODEN STRUCTURES

E. Akshov*Moscow Institute of Architecture (State Academy), Moscow, Russia***Abstract**

The article considers technological features of glued wooden structures as perspective building elements with high strength characteristics and ease of transportation. Their production and influence on the environment are researched. According to the data on carbon dioxide uptake and biogenic carbon retention, the ecological advantages of using glued wooden structures are showcased. The article shows the variability of the production of glued wooden structures using FRP fiberglass glue or an alternative method based on dowel joints.²

Keywords: ecological paradigm, glulam in architecture, life-cycle assessment (LCA), LVL-beam, CLT-panels

На сегодняшний день использование возобновляемых ресурсов, а также снижение негативных последствий антропогенного воздействия на природу в сфере строительства актуально как никогда. Для архитекторов задача подбора материала, соответствующего концепции экологического проектирования, становится первостепенной. Появление первых клееных деревянных конструкций в начале двадцатого века с их последующим развитием дало обществу новую технологию зеленого строительства. За последние десятилетия дерево прекрасно зарекомендовало себя в рамках парадигмы устойчивого развития.

¹ **Для цитирования:** Акшов Э.А. Технологические особенности клеёных деревянных конструкций // Architecture and Modern Information Technologies. – 2021. – №1(54). – С. 156–164. – URL: https://marhi.ru/AMIT/2021/1kvart21/PDF/10_akshov.pdf DOI: 10.24412/1998-4839-2021-1-156-164

² **For citation:** Akshov E. Technological Features of Glued Wooden Structures. Architecture and Modern Information Technologies, 2021, no. 1(54), pp. 156–164. Available at: https://marhi.ru/AMIT/2021/1kvart21/PDF/10_akshov.pdf DOI: 10.24412/1998-4839-2021-1-156-164

В архитектурно-строительной области интерес к возобновляемым материалам растет с каждым годом. Выбор новых материалов может оказать благоприятное влияние на окружающую среду, в частности на снижение парникового эффекта, так как деревья во время своего роста поглощают углекислый газ из атмосферы. Чистое потребление растениями углерода в атмосфере составляет около 5,5 тонн [1] на гектар для европейского лесного хозяйства. Для бамбуковых лесов это цифра значительно выше – 36,44 тонн CO₂/гектар [2]. Дерево и бамбук обладают возможностью хранить углерод в связанном виде в течение многих лет. Поэтому на сегодняшний день древесина и бамбук являются одними из самых перспективных для строительной отрасли с учетом возможности их вторичного использования, а также возобновления.

На Консорциуме по исследованию возобновляемых промышленных материалов в декабре 2009 года группой исследователей (Пересс-Гарсия, Брюс Липпке и др.) было продемонстрировано, что деревянные конструкции имеют лучшие показатели по сравнению с бетонными с точки зрения воздействия на окружающую среду. Так, ученые рассчитали, что деревянные перекрытия при строительстве потребляют на 67% меньше энергии, выделяют на 157% меньше углерода, а также на 312% меньше потребляют воды по сравнению с бетоном.

Особенности производства. Согласно данным американских исследователей Морин Пюттманн³, Ариджит Синха⁴, Индронейль Гангули⁵ в США на строительство и последующую эксплуатацию зданий приходится около 40% выбросов углекислого газа, а также 41% общего потребления энергии. Ещё до массового использования клееных деревянных конструкций дерево хорошо зарекомендовало себя в частном малоэтажном жилом строительном сегменте рынка. Внедрение новой технологии может стать выгодным новым производством на рынке строительных материалов, открывая возможности применения инженерной древесины [3].

Древесина обладает хорошим соотношением массы к прочности, высокими теплоизоляционными показателями, а также акустическими свойствами. Клееная древесина хорошо зарекомендовала себя для большепролетных конструкций. Из нее получают отличные балки, колонны, изолирующие оболочки, стеновые каркасы, стеновые панели, напольные покрытия и многое другое. Нельзя не учесть анизотропность материала с точки зрения сейсмической активности. Конструкции из дерева подходят для районов с высоким уровнем сейсмичности, их использование касается зданий различного назначения и даже таких сложных инженерных объектов, как мосты. Это связано с такими положительными характеристиками материала, как легкий вес, вязко-упругость, легкая деформируемость по сравнению со сталью и бетоном [3].

За прошедшие два десятилетия технология обработки дерева шагнула далеко вперед. Современная инженерная клееная древесина делится на несколько видов: LVL – «пиломатериал из слоёного шпона»; CLT – панели, поперечно-клеёные слои дерева; GLULAM – балки и колонны из клееной вдоль массива древесины.

Каждый вид конструктивной системы проходит около трех основных этапов обработки после стадии лесозаготовки: 1) стадия отслаивания древесной коры и поверхностных дефектов; 2) изготовление пиломатериалов, разрезка древесины на доски или слои шпона; 3) стадия технологической сушки с последующим соблюдением режима влажности хранения.

³ WoodLife Environmental Consultants, Corvallis, OR. maureen.puettmann@woodlifeconsulting.com

⁴ Dept. of Wood Science and Engineering, Oregon State University, Corvallis, OR. arijit.sinha@oregonstate.edu

⁵ Center for International Trade in Forest Products, School of Environmental and Forest Sciences, University of Washington, Seattle, WA. indro@uw.edu

Полученные пиломатериалы в сочетании с клеями становятся основой для различных инженерных строительных изделий: панелей, балок, колонн. На сегодняшний день конструкции CLT активно внедряются в коммерческий сектор высотного строительства. Эти панели представляют собой склеенные перпендикулярными слоями пиломатериалы. Полученная таким образом конструкция обладает рядом экологических преимуществ: панель служит естественным хранилищем углерода; производство таких конструкций практически безотходно; CLT конструкция легкая и обладает хорошими прочностными, сейсмическими, тепловыми характеристиками и противопожарными показателями.

Прекрасным примером применения такой технологии в строительстве является построенное здание Brock Commons Building в Ванкувере [4]. Проект выполнен преимущественно с использованием CLT-панелей. Железобетон также применялся, но в качестве внутреннего ядра жесткости. Высокая экологичность здания с точки зрения энергопотребления и климатического воздействия подтверждается методологической оценкой жизненного цикла здания LCA⁶ (рис. 1,2).



Рис. 1. Строительство Brock Commons Building в Ванкувере (дата съемки – май, 2016)

ОЖЦ (LCA) входит в ГОСТ Р ИСО 14040-2010. Основные расчеты ведутся в соответствии с рекомендациями, изложенными в этом документе. Рассматривается ряд показателей по этапам, в которые входит процесс проектирования здания вместе с поставкой и изготовлением строительных элементов. Важную роль играют данные, полученные после введения здания в эксплуатацию, а именно – рассматриваются коммунальные услуги, расход воды, электричества, отопления. Согласно детальному американскому исследованию [5] влияние лесозаготовительных действий на оценку ОЖЦ для CLT и LVL конструкций оказалось незначительным, что говорит об эффективности их использования в рамках парадигмы устойчивого развития.

⁶ LCA (Life Cycle Assessment) – оценка жизненного цикла зданий.



Рис. 2. Студенческое общежитие Университета Ванкувера Brock Commons Building (дата съёмки – июль, 2019)

На российском рынке CLT-панели только начинают свое развитие. Производство данных конструкций активно продвигает группа компаний «Сегежа». Компания совместно с архитектурной мастерской Тотана Кузембаева разработала концептуальный проект Wood City для застройки района Камушки в Москве. В рамках концепции было предложено сохранить существующие пятиэтажки, расширив дома с помощью надстроек с применением CLT конструкций (рис. 3).



Рис. 3. Архитектурная мастерская Тотана Кузембаева, Woodcity, визуализация 2018 г.

Композитные соединения материалов. Последние исследования в области применения CLT-панелей показывают, что их характеристики могут быть улучшены за счет применения бетонного основания. Группа ученых из университета Лаваль в Канаде экспериментально продемонстрировала преимущества совместного использования двух материалов. При соединении древесины с бетоном получается более эффективная конструкция с точки зрения прочности, жесткости, вибро- и звукоизоляции. Такие конструкции называются древесно-бетонные композитные панели (ТКС). В новых элементах эффективно используются преимущества обоих материалов: деревянная часть выдерживает силы натяжения, в то время как на бетонную приходятся силы сжатия. Вместе они принимают на себя изгибающий момент.

Выбор древесины. В странах Европы и в Канаде CLT-панели в основном производятся из таких пород дерева, как ель, сосна, пихта, дугласовая пихта, лиственница, южная сосна. Спрос на CLT-панели в последние годы вырос в несколько раз. Для улучшения производства были изучены особенности эксплуатации различных древесных пород, а также разработаны несколько видов модифицированных панелей таким крупным производителем, как Stora Enso. В данной области производства разными институтами по всему миру постоянно ведутся разработки клеевых связующих материалов [3, 4].

В азиатском сегменте рынка набирает популярность применение клееных конструкций на основе бамбука. Подобные инженерные изделия в основном производятся в Китае. Также как и CLT, они применяются в строительстве зданий и мостов. Сегодня все больше строительных и проектных организаций используют инженерный бамбук в качестве конструктивного материала. Такие конструкции получили названия: ламинированный бамбук (LBL), наборный бамбук (glubam) и параллельно-«прядевый» бамбук (Parallel-strand lumber, PSL) (рис. 4) [6].



Рис. 4 Пиломатериалы с параллельными прядями (англ. *Parallel-strand lumber*, PSL)

На рисунке 4 показан соединительный узел несущей колонны библиотеки, выполненный с применением технологии PSL в США. Объект, расположенный в городе Лафайетт, построен в 2009 году. Авторы проекта Killefer-Flammang Architects. Для Северной Америки клееные конструкции PSL, LVL довольно популярны. В начале широкое применение они получили в сельской архитектуре, в частности, при строительстве амбаров. На сегодняшний день в США этот тип клееных деревянных конструкции активно внедряются и в жилой, и общественный сектор.

Соединительные материалы и клеевые связующие. Как для CLT, так и LBL широкое распространение в качестве связующего получил армированный стекло-пластный клей (FRP). В настоящее время стеклопластиковые материалы считаются одним из лучших вариантов для усиления сцепления элементов различных конструкций, таких как дерево и бетон. Причиной широкого распространения именно этих клеевых связующих стала высокая прочность сцепления поверхностей и хорошие антикоррозионные характеристики. Сама технология появилась благодаря научным исследованиям, проводимым в 1990-х годах в США в Научно-техническом институте древесины в сотрудничестве с Университетом штата Орегон и компанией American Laminators, Inc. В результате совместных исследований было разработано такое связующее вещество, в котором в качестве главного элемента используется высокопрочный армированный волокном пластик (FRP). Оно получило название FiRP Armored panel (FiRP PR) и стало

использоваться в качестве нового связующего материала типа FRP для склеивания древесных слоев бруса и различных композитных материалов. Это связующее состоит из 100% выровненных высокомодульных волокон арамида, углерода и стекловолокна. При соединении с клеевым связующим эти компоненты становятся высокопрочным армированным клеем FiRP.

Идея использовать FRP-материалы в качестве армирующих связующих для деревянных элементов была предложена Николосом Плеврисом в 1992 году [7]. Позже, уже в 1996 году, группой канадских ученых во главе с Деном Тингли был разработан отдельный коммерческий запатентованный продукт, который состоял из клееного бруса, армированного стеклопластиком [8, 9]. Затем канадские ученые А.В. Дори и Р.Дж. Ченг впервые исследовали особенности использования углеродных и FRP соединений в качестве армирования клееных балок [10]. Согласно результатам их работ, прочность испытуемых образцов была значительно выше по сравнению с контрольными элементами, полученными классическим клеевым соединением. На основе проведенных ими опытов были разработаны разные типы армирующих элементов на основе FRP для усиления клееных деревянных элементов [8, 11].

Важным показателем исследований учёных стало соответствие FRP армирования требованиям LEED (Международный стандарт по энергоэффективному и экологическому проектированию). Но, поскольку FRP изготавливается на основе пластика, то возникает ряд вопросов, связанных с утилизацией и переработкой пластиковых отходов. Очевидно, что пластмасса, полученная из полимеров и мономеров, не всегда может быть переработана для вторичного использования. Согласно оценкам ученых в мире только 20-30% пластмасс могут быть переработаны и возвращены в свое изначальное состояние. Таким образом, армирование волокнами пластмасс связано с проблемами утилизации отходов. На сегодняшний день существуют два основных способа утилизации: сжигание связующих элементов с преобразованием полученной энергии в тепло и соответствующей фильтрацией при попадании выбросов в атмосферу; сжигание элементов в цементной печи, когда элементы преобразуются и становятся неотъемлемой частью литого материала [8].

Основная проблема утилизации данных соединений заключается в том, что FRP трудно разделить на основные материалы: волокно и матрицу, состоящую из углерода, арамида и стекловолокна, а матрицу – на полимеры и мономеры. В наше время использование пластмасс часто экономит энергию и ресурсы по сравнению с другими материалами, однако решение проблемы утилизации полученных изделий еще впереди. При разработке более экологических матриц соединения, таких как биопластики, УФ-разлагаемые пластмассы, FRP-технология приобретет более убедительную экологическую составляющую [8].

Дюбельные соединения. Для CLT панелей существует альтернативная технология для склеивания слоев. Вопросом – как улучшить свойства древесины без использования химических веществ? – задалась австрийская компания Thoma Holz GmbH. Соблюдая правильное время сушки древесины, а также время рубки леса в период сокового покоя (зимней спячки), она получает качественный материал, который устойчив к грибкам и насекомым.

Еще одним нюансом, который учитывает компания, является спил деревьев во время убывающей Луны. Согласно научным исследованиям, лунный цикл влияет на скопление воды в стволах (по принципу приливных волн в океане). Поэтому деревья, срубленные при убывающей Луне, в процессе сушки сохраняют больше воды в своей клеточной структуре. В итоге такая древесина больше сжимается и после своего высыхания становится плотнее и тяжелее.

Для соединения слоев древесины вместе компания Thoma Holz GmbH использует издревле известный метод – деревянные дюбели. За счет своего набухания эти

соединительные элементы становятся идеальной альтернативой клеевым связующим. На протяжении человеческой истории дубели использовали разные культуры. В древних храмах Азии жесткость соединения элементов обеспечивалась только дубелями и штекерными соединениями уже тысячи лет назад. Компания Thoma Holz GmbH совместно с техническими университетами Вены и Карлсруэ провели исследования таких систем крепления и разработали особые CLT-панели с дубелями, запатентованные, как HolziOO. Они представляют собой плоские деревянные элементы толщиной 364 мм, состоящие из поперечных и параллельных досок квадратного бруса, соединенных между собой дубелями из бука. Эти панели, как и другие CLT-панели, изготовленные на основе клеевых соединений, могут также использоваться для несущих стен, перекрытий и других специальных изделий в области проектирования и в строительстве из дерева.

Таким образом, производство клееных деревянных конструкций может быть важной составляющей зеленого строительства. Использование в архитектурно-строительной отрасли CLT и LVL конструкций оказывает благоприятное влияние на окружающую среду, в частности, на снижение парникового эффекта. Необходимо развивать исследования, посвященные вопросам организации полного цикла производства с включением вопросов возобновления ресурсов. Отдельными составляющими таких исследований будет решение вопросов о сортах древесины, способах ее обработки, использовании оптимальных приемов соединения слоев изделий. Большие перспективы видятся в разработке композитных соединений (дерево + бетон). Актуальными остаются вопросы комплексного рассмотрения не только цикла производства, но и приемов использования произведенной продукции, ее эксплуатации и утилизации. Развитие подобных технологий отвечает требованиям парадигмы устойчивого развития и устойчивой архитектуры, представляющих сегодня главный вектор организации и функционирования общества XXI века.

Источники иллюстраций

Рис. 1, 2. Brock Commons Building в Ванкувере. Строительство Brock Commons Building в Ванкувере. Источник Googlemaps, панорамы улиц (дата обращения: 18.12.2020).
Рис. 3. Parallel-strand lumber, PSL. – URL: <https://structurecraft.com/materials/engineered-wood/parallel-strand-lumber> (дата обращения: 18.12.2020).

Литература

1. Valentini R., Matteucci G., Dolman A.J., Schulze E.-D., Rebmann C., Moors E.J. et al. Respiration as the main determinant of carbon balance in European forests // *Nature*. – 2000. – Vol. 404. – P. 861–865.
2. Broadmeadow M., Matthews R. Forests, carbon and climate change: the UK contribution // *For. Comm. Inf.* – Note 48. – 2003. – P. 1–12.
3. Puettmann M., Sinha A., Ganguly I. Life cycle energy and environmental impacts of cross laminated timber made with coastal douglas-fir // *Journal of Green Building*. – 2019. – 14(4). – P. 17–33.
4. Деметьев Д.А. Современный опыт строительства многоквартирных деревянных домов в зарубежных странах // *Architecture and Modern Information Technologies*. – 2020. – №1(50). – С. 95–108. – URL: https://marhi.ru/AMIT/2020/1kvart20/PDF/06_dementiev.pdf DOI: 10.24411/1998-4839-2020-15006 (дата обращения: 25.01.2021).
5. Bowers T., M.E. Puettmann I. Ganguly, Eastin I. Cradle-to-gate life-cycle assessment of glue-laminated (glulam): Environmental Impacts from glulam produced in the US Pacific Northwest and southeast // *Forest Products Journal*. – 2017. – № 67(5/6). – P. 368–380.

6. Li Z., Zhou R., He M., Sun X. Modern timber construction technology and engineering applications in China // Proc. Inst. Civ. Eng. Civil Eng. – 2019. – № 172(5). – P. 17–27.
7. Plevris N., Triantafillou T.C. FRP-reinforced wood as structural materials // J. Mater. Civil Eng. – 1992. – № 4(3). – P. 300–317.
8. Tingley D.A. High-strength fiber-reinforced plastic of wood and wood composite // 41st international society for the advancement of material and process engineering (SAMPE) symposium. – Anaheim, California, 1996. – P. 667–673.
9. Tingley D.A. Over a decade of research results in new, improved glulam // Canadian Consulting Engineer. – 1996. – P. 24–28.
10. Dorey A.B., Cheng R.J. Development of composite glued laminated timber. Canadian Forest Service Cat // Fo42-91/146-1996E. Canadian-Alberta Partnership Agreement in Forestry. – Edmonton, Alta, 1996.
11. Hindman D.P., Bouldin J.C. Mechanical properties of southern pine cross-laminated timber // Journal of Materials in Civil Engineering. – 2015.

References

1. Valentini R., Matteucci G., Dolman A.J., Schulze E.-D., Rebmann C., Moors E.J. et al. Respiration as the main determinant of carbon balance in European forests. Journal Nature, 2000, vol. 404, pp. 861–865.
2. Broadmeadow M., Matthews R. Forests, carbon and climate change: the UK contribution. For. Comm. Inf. Note 48, 2003, pp. 1–12.
3. Puettmann M., Sinha A., Ganguly I. Life cycle energy and environmental impacts of cross laminated timber made with coastal douglas-fir. Journal of Green Building, 2019, 14(4), pp. 17–33.
4. Dementev D. Modern Experience of Multi-Apartment Wooden Houses Construction in Foreign Countries. Architecture and Modern Information Technologies, 2020, no. 1(50), pp. 95–108. Available at: https://marhi.ru/AMIT/2020/1kvart20/PDF/06_dementiev.pdf
5. Bowers T., M.E. Puettmann I. Ganguly, Eastin I. Cradle-to-gate life-cycle assessment of glue-laminated (glulam): Environmental Impacts from glulam produced in the US Pacific Northwest and southeast. Forest Products Journal, 2017, no. 67(5/6), pp. 368–380.
6. Li Z., Zhou R., He M., Sun X. Modern timber construction technology and engineering applications in China. Proc. Inst. Civ. Eng. Civil Eng., 2019, no. 172(5), pp. 17–27.
7. Plevris N., Triantafillou T.C. FRP-reinforced wood as structural materials. J. Mater. Civil Eng., 1992, no. 4(3), pp. 300–317.
8. Tingley D.A. High-strength fiber-reinforced plastic of wood and wood composite. 41st international society for the advancement of material and process engineering (SAMPE) symposium. Anaheim, California, 1996, pp. 667–673.
9. Tingley D.A. Over a decade of research results in new, improved glulam. Canadian Consulting Engineer, 1996, pp. 24–28.

10. Dorey A.B., Cheng R.J. Development of composite glued laminated timber. Canadian Forest Service Cat. Fo42-91/146-1996E. Canadian-Alberta Partnership Agreement in Forestry. Edmonton, Alta, 1996.
11. Hindman D.P., Bouldin J.C Mechanical properties of southern pine cross-laminated timber. Journal of Materials in Civil Engineering, 2015.

ОБ АВТОРЕ

Акшов Эмиль Альмирович

Аспирант, Учебно-научный центр «Архитектура и компьютерные технологии» (УНЦ АКИТ), Московский архитектурный институт (государственная академия), Москва, Россия

e-mail: e.akshov@markhi.ru

ABOUT THE AUTHOR

Akshov Emil

Postgraduate of the Educational and Scientific Center «Architecture and Computer Technologies», Moscow Institute of Architecture (State Academy), Moscow, Russia

e-mail: e.akshov@markhi.ru