

## ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И АРХИТЕКТУРА

Научная статья



УДК/UDC 721.023:691.11:004.9

DOI: 10.24412/1998-4839-2026-1-263-281

EDN: YVIODS



CC BY-NC-SA 4.0

**Параметрическое проектирование деревянных соединений для конструкций криволинейных оболочек****Качана Касулу<sup>1✉</sup>, Ольга Владимировна Воличенко<sup>2</sup>**<sup>1,2</sup>Российский университет дружбы народов, Москва, Россия<sup>1</sup>kasulukachana23@gmail.com <sup>2</sup>volichenko-ov@rudn.ru

**Аннотация.** В статье рассматривается эффективное применение параметрического подхода к проектированию деревянных конструктивных систем сложной формы, включая разработку инновационных соединительных узлов. Интеграция компьютерного моделирования, определение качественных характеристик материалов и цифровых процессов изготовления позволяет решать задачи создания сложных геометрических конструкций с использованием традиционных столярных изделий. Анализируется разработка алгоритмических стратегий для улучшения эксплуатационных характеристик соединений, обеспечения сочетания прочности конструкции и эстетической совместимости, оптимизация геометрии креплений для снижения концентрации напряжений, повышения прочности и минимизации отходов. Такая параметрическая структура представляет собой фундаментальный шаг вперед в использовании потенциала дерева для архитекторов, открывая новые возможности для экологически чистых, сложных криволинейных оболочек.

**Ключевые слова:** параметрическое проектирование, деревянные соединения, криволинейные оболочки, структурная оптимизация креплений, цифровое производство

**Для цитирования:** Касулу К. Параметрическое проектирование деревянных соединений для конструкций криволинейных оболочек / К. Касулу, О.В. Воличенко // Architecture and Modern Information Technologies. 2026. № 1(74). С. 263-281. URL:

[https://marhi.ru/AMIT/2026/1kvart26/PDF/17\\_kasulu.pdf](https://marhi.ru/AMIT/2026/1kvart26/PDF/17_kasulu.pdf) DOI: 10.24412/1998-4839-2026-1-263-281 EDN: YVIODS

## INFORMATION TECHNOLOGIES AND ARCHITECTURE

Original article

**Parametric design of wooden joints for curved shell structures****Kachana Kasulu<sup>1✉</sup>, Olga V. Volichenko<sup>2</sup>**<sup>1,2</sup>RUDN University, Moscow, Russia<sup>1</sup>kasulukachana23@gmail.com <sup>2</sup>volichenko-ov@rudn.ru

**Abstract.** The paper explores a parametric design approach to create innovative, effective wooden joints for structural systems with intricate forms. Integrating computational modelling, material characterisation, and digital fabrication processes addresses the challenges of constructing complex geometric structures with traditional joinery. The study pushes forward algorithmic strategies to improve joint performance and ensure a combination of structural strength and aesthetic consistency, optimising the geometry of joints to reduce stress concentrations, increase strength, and minimise waste. This parametric structure represents a

fundamental step forward in harnessing the potential of wood for architects, opening new opportunities for eco-friendly, complex curved shells.

**Keywords:** parametric design, timber joints, curved shell structures, structural optimisation of joints, digital fabrication

**For citation:** Kasulu K., Volichenko O.V. Parametric design of wooden joints for curved shell structures. *Architecture and Modern Information Technologies*, 2026, no. 1(74), pp. 263-281. Available at: [https://marhi.ru/AMIT/2026/1kvart26/PDF/17\\_kasulu.pdf](https://marhi.ru/AMIT/2026/1kvart26/PDF/17_kasulu.pdf) DOI: 10.24412/1998-4839-2026-1-263-281 EDN: YVIODS

## Введение

Деревянные соединения играли ключевую роль в архитектуре с древнейших времен, обеспечивая структурную целостность зданий. Ранние примеры включают примитивные врезные системы, где мастера создавали прочные крепления из местных материалов [1, с.45]. Доступность ресурсов и развитие строительных практик способствовали совершенствованию технологий деревообработки. Переход к полумеханизированному производству в конце XIX века, как отмечает А. Смит, значительно продвинул технологии обработки древесины и стандартизировал компоненты для сложных архитектурных проектов [2].

Традиционные методы, такие как «ласточкин хвост», «внахлестку» и «косынка», основаны на трении, сжимающих усилиях и точности исполнения. В исторических зданиях эти соединения эффективно выдерживали нагрузки, демонстрируя региональное ремесленное мастерство [3]. Современные технологии, напротив, используют передовые материалы (клееный брус (LVL), поперечно-слоистый брус (CLT)<sup>3</sup> и механические крепежные элементы (металлические пластины, винты), обеспечивая превосходные несущие свойства и геометрическую гибкость [4]. Однако критики выражают опасения, что широкое применение металлических соединителей может нарушить целостность контакта дерева с деревом и привести к различному перемещению разнородных материалов [5]. Сторонники же утверждают, что надежность и скорость сборки современных соединителей перевешивают потенциальную потерю аутентичности [6].

Современные технологические достижения кардинально изменили подходы к проектированию и изготовлению деревянных соединений. Системы автоматизированного проектирования (САПР) и числового управления (ЧПУ) обеспечивают беспрецедентную точность и позволяют создавать конструкции высокой сложности, превосходящие возможности традиционных методов [7]. Благодаря передовым технологиям ЧПУ стало возможным изготовление сложных форм и высокоточных креплений в промышленных масштабах, что значительно расширяет геометрические границы, ранее накладываемые ручной сборкой. Более того, программное обеспечение для параметрического проектирования позволяет инженерам еще до начала производства моделировать распределение напряжений в соединительных элементах, оптимизируя их характеристики путем быстрых итераций [8, с.161].

---

<sup>3</sup> CLT – Cross laminated timber (поперечно-слоистый брус) – это изделие из массивной древесины, изготовленное из нескольких слоев досок, уложенных крест-накрест (обычно под углом 90° друг к другу) и скрепленных конструкционными клеями для образования больших жестких панелей. Поперечное слоение улучшает стабильность размеров, уменьшает анизотропное перемещение и позволяет панелям выдерживать нагрузку в нескольких направлениях, что делает CLT пригодным для применения в таких конструкциях, как стены, полы и крыши в средне- и высотном деревянном строительстве. URL: <https://doi.org/10.1007/s00107-015-0999-5> (дата обращения: 29.12.2024).

## Эволюция дизайна соединений и архитектурные стили

Развитие деревянных креплений тесно связано с эволюцией архитектурной мысли. В готический период, когда акцент делался на вертикальность, были разработаны эффективные стропильные системы [9]. С расцветом декоративно-прикладного искусства в конце XIX – начале XX веков возродился интерес к ремесленному мастерству и открытым столярным конструкциям [10, с.118]. Современные архитекторы, такие как Менгес [11], пропагандируют инновационные и гибкие деревянные конструкции, подчеркивая важность междисциплинарного сотрудничества. В то время как сторонники традиционных подходов предостерегают от чрезмерных экспериментов, которые могут поставить под угрозу долговечность [12], многие современные исследователи убеждены, что передовые инженерные решения способны успешно сочетать инновации с надежностью [13, с.219-230].

Деревянные соединения играют ключевую роль в достижении баланса между функциональностью и эстетикой зданий. Они служат для передачи нагрузок между конструктивными элементами, обеспечивая целостность и гармоничное единство сооружения [14]. Эти видимые элементы часто становятся определяющими для датировки архитектурного объекта и характеристики его стилевых особенностей. Так, традиционные врезные и шиповые соединения передают ощущение мастерства и аутентичности материалов, тогда как современные фрезерные соединения, выполненные с помощью ЧПУ, символизируют дух современности (рис. 1). Таким образом, конструкция узловых соединений оказывает значительное влияние как на прочность деревянных конструкций, так и на их визуальную привлекательность [3].



а)

б)

Рис. 1. Варианты соединений деревянных конструктивных элементов: а) карниз доугун храма Конфуция в Цюйфу (КНР), 478 г. до н. э. (традиционное ручное изготовление); б) современные узлы, изготовленные на фрезеровальных станках с ЧПУ

Древесина остается предпочтительным строительным материалом благодаря своей возобновляемости, высокому соотношению прочности к весу и более низкому воздействию на окружающую среду по сравнению со сталью или бетоном [12]. Ее универсальность позволяет создавать разнообразные формы, а прогресс в производстве изделий из древесины значительно повысил их несущую способность. Однако естественные вариации древесины, такие как ориентация волокон, наличие сучков и различия во влажности, могут усложнять проектирование соединений в крупномасштабных конструкциях [15]. Сохраняются и вызовы, связанные с долговечностью, обусловленные воздействием климата, пожаров и вредителей. Некоторые эксперты считают, что эти проблемы решаются за счет продуманной конструкции и защитных покрытий, в то время как другие настаивают на необходимости дополнительных исследований и стандартизированных испытаний для обеспечения стабильной эксплуатации [5].

## Материалы и технологии для архитектурного проектирования свободных форм

Развитие нелинейной архитектуры неразрывно связано с прогрессом в области инструментов проектирования. Параметрическое программное обеспечение, многоосевые станки с ЧПУ и роботизированные производственные системы [16] открывают новые возможности для создания сложных изгибов и нестандартных форм (рис. 2). Эти технологии позволяют архитекторам использовать инновационные деревянные изделия, такие как поперечно-ламинированный брус (CLT) и клееный брус (glulam), которые отличаются превосходными структурными свойствами и высокой стабильностью.

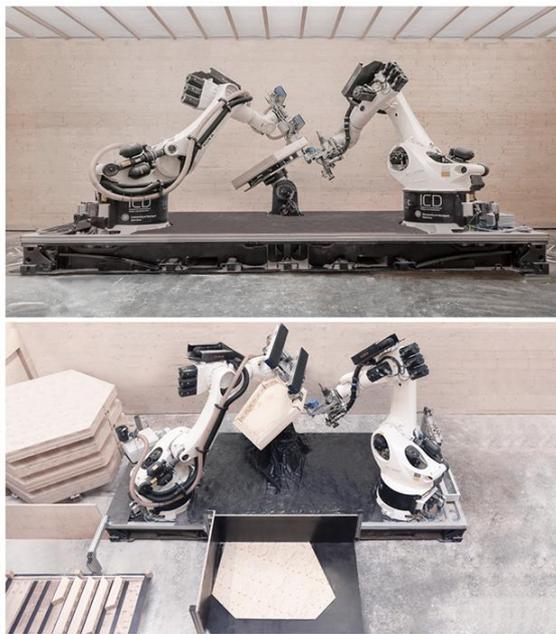


Рис. 2. Роботизированное изготовление деревянных деталей

Однако нелинейное строительство сопряжено с рядом вызовов. К ним относятся потребность в специализированном оборудовании, необходимость соблюдения строгих допусков при изготовлении и тщательная документация для предотвращения ошибок на этапе планирования [4]. Кроме того, анизотропная природа древесины требует детального структурного анализа для обеспечения целостности конструкции. Как отмечает Менгес [11], сочетание параметрического проектирования с непрерывной обратной связью в процессе конструирования может оптимизировать форму и детали посредством итеративных процессов.

Традиционные методы соединения древесины, высоко ценимые за их ремесленные качества, сталкиваются с трудностями при создании сложных конструкций. Такие техники, как врезка, шиповые соединения и «ласточкин хвост», прекрасно подходят для более простых форм, но оказываются неэффективными при работе со сложными многоугольными пересечениями [5]. Менгес подчеркивает, что ограничения ручного изготовления становятся очевидными при использовании геометрии свободной формы поскольку плоские вырезы и стандартные углы стыков затрудняют эффективное соединение деревянных деталей и равномерное распределение нагрузок [11]. Традиционные соединения часто не обеспечивают равномерного распределения нагрузок в изогнутых или двойных рамах, что может приводить к возникновению внутренних напряжений и повышению риска разрушения. Современные строительные нормы и правила требуют более высокой несущей способности, которая может превышать допустимые значения для обычных креплений [13, с.219-230]. Это также может привести к неэффективному использованию материалов из-за отходов при резке и необходимости дополнительного армирования [3]. Более того, сложность криволинейных конструкций

может вынудить архитекторов идти на компромисс, отказываясь от своих первоначальных замыслов в пользу более простых плоских решений [6].

Параметрическое проектирование становится ключевым подходом в деревянном строительстве, предлагая эффективные решения для согласования конструктивных требований, свойств материалов и сложных пространственных форм. В отличие от традиционных методов, опирающихся на стандартизированные крепления, параметрические рабочие процессы позволяют создавать индивидуальные, основанные на данных решения, учитывающие конкретные критерии производительности, такие как траектории нагрузки и производственные ограничения. Такой подход способствует итеративному совершенствованию геометрии, достигая оптимального баланса между эффективностью конструкции, экономией материалов и эстетикой.

Несмотря на очевидные преимущества, внедрение параметрического проектирования сталкивается с рядом серьезных проблем. Одной из главных является отсутствие надежных отраслевых норм, которые бы интегрировали параметрическое проектирование, инженерную оценку и стандарты цифрового производства [17]. Хотя некоторые экспериментальные инициативы демонстрируют многообещающие результаты, широкому распространению этих систем препятствует потребность в специализированных знаниях в области вычислительного проектирования и эксплуатации станков с ЧПУ, а также отсутствие интегрированных стандартизированных платформ для обмена параметрическими данными [3].

Кроме того, скептики предупреждают, что параметрические модели могут приводить к созданию сложных геометрических форм, требующих современного оборудования и трудоемких технологий сборки, что потенциально увеличивает затраты и углеродный след [12]. Тем не менее сторонники параметрического проектирования видят в нем революционную тенденцию, эффективно сочетающую традиционное мастерство с современными технологиями. Они утверждают, что цифровые методы плотницких работ способны преобразить деревянное строительство, позволяя создавать конструкции беспрецедентной сложности при сохранении целостности конструкции и эффективности использования материалов [7].

Данное исследование фокусируется на подходе, основанном на данных, который использует структурное моделирование, характеристики материалов, геометрические данные и данные о допусках при изготовлении для концептуализации деревянных соединений. Цель – эффективно удовлетворить растущий спрос на геометрически сложные, но при этом прочные деревянные здания замысловатых форм. Мы подчеркиваем, что вычислительные процессы, глубокое понимание свойств древесины, алгоритмическое формирование формы и передовые методы изготовления позволяют создавать значительно более эффективные, надежные и эстетически универсальные соединения, чем те, которые изготавливаются традиционными методами.

Применяя комплексный подход к непрерывному процессу проектирования и строительства, который объединяет такие критерии эффективности, как целостность конструкции, эффективность материалов, технологичность изготовления и архитектурная выразительность, мы сочетаем креативность геометрии с точностью и практичностью в строительстве.

### **Новый подход к проектированию**

В среде Rhinoceros 3D Grasshopper выступает в качестве основного параметрического движка, а подключаемый модуль Karamba3D обеспечивает обратную связь в режиме реального времени, используя метод конечных элементов для анализа поведения анизотропной древесины. В совокупности это создает единый, визуально управляемый рабочий процесс для проектирования сложных соединений (рис. 3).

Основанный на узлах интерфейс Grasshopper позволяет проектировщику редактировать углы, глубину выступов или рельефные вырезы и мгновенно видеть, как эти изменения отражаются на модели. Одновременно Karamba3D «на лету» пересчитывает траектории нагрузки и поля напряжений. Такая оперативность имеет решающее значение: даже поворот на два градуса или удаление материала на несколько миллиметров могут существенно повлиять на распределение усилий в соединении и, как следствие, на эффективность изготовления и монтажа узла. Интегрируя анализы Karamba3D непосредственно в определение Grasshopper, команда оценивает конструктивные характеристики, использование материалов и ограничения по зазору для инструмента с ЧПУ в едином параметрическом сценарии, что устраняет необходимость в обмене данными между отдельными платформами моделирования и проектирования [18].

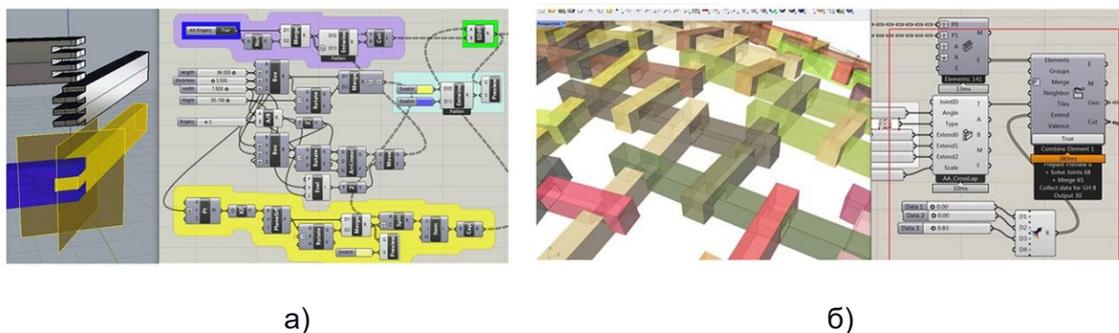


Рис. 3. Методы оптимизации деревянных соединений на платформе Grasshopper: а) деревянные элементы, соединенные и стабилизированные для распределения нагрузки при различных условиях пересечения; б) процесс совместного создания и оптимизации проектирования в Grasshopper

Параметрическое проектирование деревянных конструкций часто основывается на принципах, ориентированных на производительность, с использованием интегрированных вычислительных платформ [3; 19]. Для создания компонентов, адаптирующихся к различным нагрузкам, применяется ряд правил. Например, стыковочные узлы могут быть алгоритмически скорректированы в зависимости от изгибающих моментов или сдвигающих усилий для повышения стабильности. Оптимизация структурной топологии также способна улучшить границы раздела врезки за счет уменьшения избытка материала при сохранении целостности [14]. Такой подход сочетает геометрическую сложность с производственными ограничениями, повышая эффективность использования материалов и архитектурную выразительность фиксирующих деталей.

Разработка концепции сложных соединений в параметрической системе начинается с анализа свойств материала, кинематики их сочетания и путей передачи нагрузки. Кодирование поведения древесины при растяжении, сжатии и сдвиге в параметрической логике необходимо для обеспечения прочности конструкции при изменении геометрии крепежных фиксаторов [19].

Указанные аспекты влияют на конструкцию взаимосвязанных элементов и геометрию поверхностей (например, в виде «ласточкиного хвоста» и зубьев), повышая сопротивление трению и несущую способность. С точки зрения производства, параметрические модели должны учитывать ограничения обработки с ЧПУ, такие как траектории движения инструмента и диаметр фрезы. Это облегчает переход от проектирования к практической реализации с использованием цифровых технологий.

Методы структурного анализа и оптимизации, дополненные методом конечных элементов (FEA), могут быть интегрированы в скрипты Grasshopper для быстрой обратной связи по предварительным прототипам на основе распределения напряжений [13, с.219-230]. Подобный итеративный подход позволяет исследовать геометрическое расположение

стыковочных узлов и траектории нагрузки, что дает проектировщикам возможность уточнять размеры и конфигурацию соединений. Алгоритмы оптимизации, такие как генетические или градиентные методы, помогают определить конструкции, которые минимизируют использование материалов при максимизации несущей способности и целостности конструкции [17].

Создание физических прототипов на станках с ЧПУ имеет решающее значение для проверки правильности цифровых конструкций. Фрезерные станки с ЧПУ предпочтительнее из-за их точности и возможности адаптации к нестандартным геометрическим формам [6]. После изготовления опытные образцы подвергаются механическим испытаниям, таким как воздействие нагрузки до отказа и контроль смещения, а также оценке долговечности в условиях окружающей среды (например, воздействие влажности и ускоренное старение) [12]. В ходе таких испытаний сравниваются стандартная конструкционная древесина и изделия из искусственной древесины с контрольными образцами для оценки структурных характеристик и повышения влагостойкости.

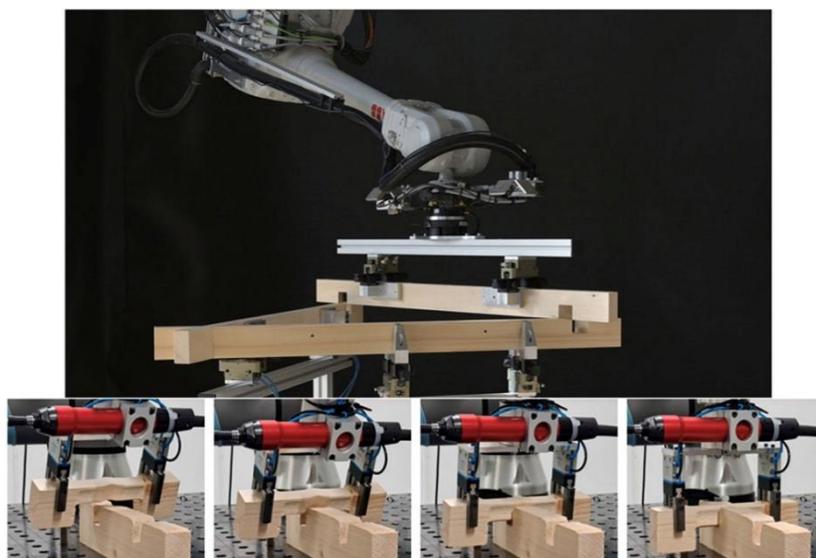


Рис. 4. Создание физических прототипов на станках с ЧПУ и проверка правильности их соединения

В Таблице 1 представлены результаты серии оценок нагрузки и разрушений для тестовых креплений, разработанных с использованием параметрических методов. Данные, полученные в ходе современных экспериментальных исследований [12], показывают, что параметрические соединения могут увеличить несущую способность на 15-25% по сравнению с традиционными конструкциями, выполненными из аналогичных материалов и с теми же геометрическими ограничениями [20, 21, 22].

Таблица 1. Результаты сравнения традиционных и параметрических соединений [21,22]

Тип соединения	Средняя грузоподъемность (кН)	Стандартное отклонение (кН)	Изменение показателей (%)
Обычное соединение А	12.4	1.2	N/A
Параметрическое соединение А	15.1	1.0	+21.8%
Обычное соединение В	10.8	1.4	N/A
Параметрическое соединение В	13.4	1.1	+24.1%

Сравнительная диаграмма распределения напряжений (рис. 5), полученная с помощью метода конечных элементов (FEA), демонстрирует, как удаление материала посредством вычислительной оптимизации приводит к более однородным полям напряжений и снижению пиковых концентраций напряжений в критических узлах.

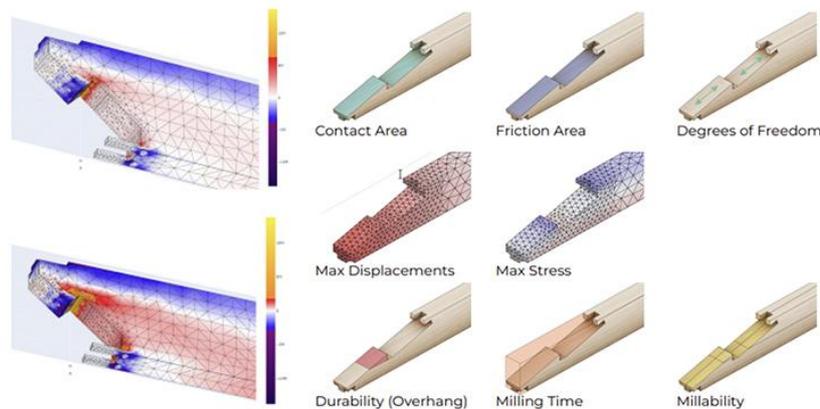


Рис. 5. Сравнительная диаграмма распределения напряжений, полученная с помощью конечно-элементного моделирования (FEA), демонстрирует, как удаление материала посредством вычислительной оптимизации приводит к более равномерному распределению напряжений и снижению пиковых концентраций напряжений в критических соединениях [22]

Экспериментальная система для проверки работоспособности шарниров обычно включает в себя стандартные нагрузочные устройства, датчики перемещения и системы сбора данных, которые отслеживают реакцию на деформацию и нагрузку в режиме реального времени [19]. Шарниры монтируются на платформах, воспроизводящих практические граничные условия для обеспечения точного сбора данных. Показатели эффективности выходят за рамки базовых показателей целостности конструкции, таких как предел текучести, и включают эффективность использования материалов и эстетическую адаптируемость [3]. В то время как некоторые исследователи подчеркивают архитектурные преимущества сложных параметрических проектов из-за их эстетического и пространственного потенциала [11], другие акцентируют внимание на необходимости баланса между производством и стоимостью, выступая за использование показателей оценки жизненного цикла для оценки воздействия на окружающую среду [8, с.161].

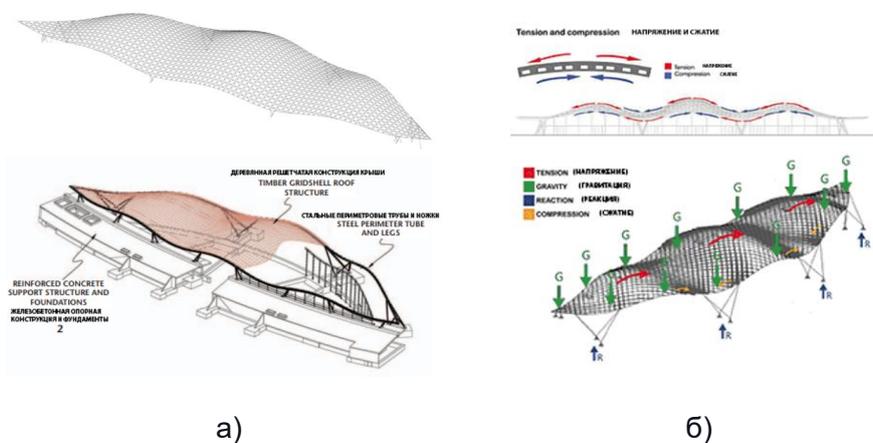
Изначально исследования параметрических деревянных креплений фокусировались на структурной оптимизации. Однако со временем подход изменился, став более целостным и охватывающим такие аспекты, как экологичность, цифровое производство и данные из искусственной среды. Если ранние работы акцентировали внимание на формальных сложностях, то более поздние исследования включили в себя вопросы изготовления, устойчивости и производственных ограничений [14; 12]. Эта конвергенция вычислительного проектирования, материаловедения и технологий изготовления привела к созданию более эффективных, экологически чистых и архитектурно адаптируемых деревянных соединений.

### Павильон Savill Garden Gridshell: синтез инноваций и традиций

Павильон Savill Garden Gridshell, расположенный в Большом Виндзорском парке (Беркшир, Англия), является ярким примером такого синтеза. Здание, спроектированное архитекторами Glenn Howells Architects и построенное в 2006 году совместно с инженерами-конструкторами Buro Happold и специалистами-плотниками из Green Oak, демонстрирует уникальное сочетание передового компьютерного дизайна и традиционного мастерства.

Оболочка Savill Garden<sup>4</sup> отличается элегантной двойной кривизной, сформированной из решетки тонких деревянных планок, расположенных нелинейно. Сложная геометрия требует изгиба и скручивания древесины, в результате чего получается прочная оболочка, эффективно перераспределяющая нагрузки по кривым траекториям. Подобная нелинейная конструкция не только повышает визуальную привлекательность, но и оптимизирует использование материалов, эффективно управляя циркуляцией сил внутри конструкции.

С конструктивной точки зрения, определение несущей способности оболочки Savill Garden имело решающее значение (рис. 6). Деревянные элементы должны были выдерживать нагрузки на сжатие, растяжение и изгиб, сохраняя при этом целостность конструкции. Оценка напряжений показала, что правильно расположенные деревянные планки способны выдерживать нагрузки от силы тяжести, ветра и снега с достаточным запасом прочности. Соединения были тщательно проверены с помощью экспериментов и вычислительных расчетов, чтобы убедиться в их необходимой жесткости и прочности для эффективной передачи сил без ущерба для формы и долговечности.



в)

Рис. 6. Конструктивные особенности павильона Savill Garden Pavilion в Виндзорском Большом парке, построенного в 2006 году архитектурным бюро Glenn Howells Architects: а) трехпролетная двояковогнутая конструкция синусоидальной формы и составляющие ее слои; б) конструкция оболочки, в которой необходимо учитывать концентрацию нагрузки: деревянная оболочка работает с контурной балкой по периметру, передающей нагрузку на опоры; в) общий вид конструкции в процессе монтажа

<sup>4</sup> Архивы проекта Savill Garden Gridshell (2023). URL: [https://www.istructe.org/journal/volumes/volume-86-\(published-in-2008\)/issue-17/the-savill-garden-gridshell-design-and-constructio/](https://www.istructe.org/journal/volumes/volume-86-(published-in-2008)/issue-17/the-savill-garden-gridshell-design-and-constructio/) (дата обращения: 29.12.2024).

Главным препятствием стала сложность стыковочных узлов. Пересечения решетки под нестандартными углами и различной кривизны делали стандартные сопряжения неэффективными. Для изготовления оболочки Savill Garden была выбрана древесина лиственницы благодаря ее отличным изгибающим свойствам и высокой несущей способности. Детали креплений были тщательно разработаны и рассчитаны на способность выдерживать многоосные нагрузки в соответствии с кривизной конструкции.

Создание элементов фиксации для покрытия включало несколько ключевых этапов. Параметрическая модель решетчатой конструкции позволила использовать итерационный подход, учитывающий нелинейную кривизну оболочки и различные параметры, такие как углы наклона шарниров и нагрузка (рис. 7). Каждый узел сети был алгоритмически доработан для оптимизации глубины врезки, длины шпонки и сечения рельефа. Это осуществлялось в режиме реального времени с помощью анализа методом конечных элементов (FEA), что позволило снизить концентрацию напряжений, минимизировать отходы материала и оптимизировать рабочий процесс изготовления.

Уникальная геометрия узлов оболочки тщательно продумана для обеспечения равномерного распределения нагрузки по всей конструкции. Это достигается за счет учета кривизны оболочки и значительного уменьшения локальной концентрации напряжений. Такая конфигурация позволяет гибко подгонять деревянные рейки к их окончательной форме, сохраняя при этом прочность всей конструкции.

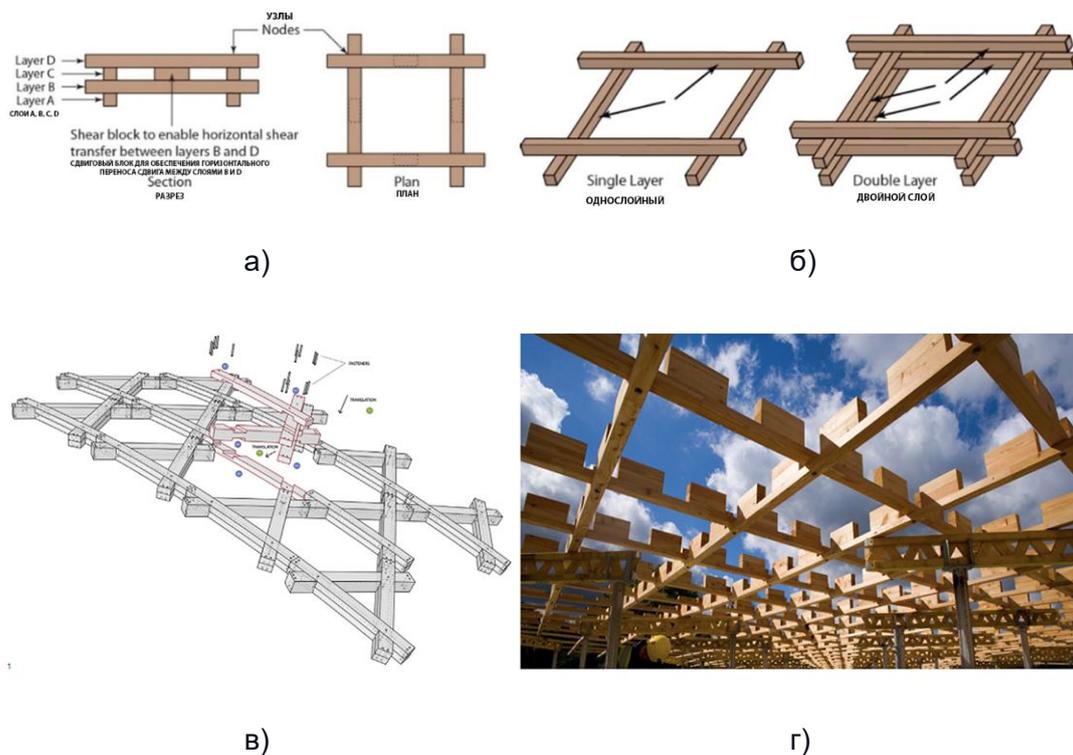


Рис. 7. Система соединений решетчатой оболочки Savill Garden, в которой тонкие деревянные элементы конструкции сходятся в заранее определенных узлах, каждый из которых имеет параметрически определенные пазы и шипы или соединения с замковым механизмом: а) поперечное сечение и план структурного модуля соединений; б) аксонометрия конструктивной соединительной модульной системы; в, г) вид сетки соединений во время сборки

Параметры изготовления были интегрированы в модель с целью исключения ограничений по размерам резания и возможности столкновения инструментов. Это обеспечило плавный переход от цифрового проектирования к изготовлению, автоматически генерируя профили резки, соответствующие геометрии каждого крепления. Была разработана инновационная

стратегия сборки, при которой плоские или слегка изогнутые планки предварительно собирались на месте, а затем формировались в 3D-сетку. Этот метод «сгибания в форму» минимизировал напряжение на стыках во время установки, что способствовало повышению точности и надежности конструкции.

На рисунке 8 показаны контурные детали (а, б) деревянных клееных элементов оболочки со стальными кронштейнами (г). В них используется двухслойная конструкция, позволяющая согнуть решетку до нужной геометрии в каждом стальном элементе. Это обеспечивает большую внеплоскостную прочность и жесткость, а также более равномерное распределение нагрузки от оболочки к стальным кронштейнам.

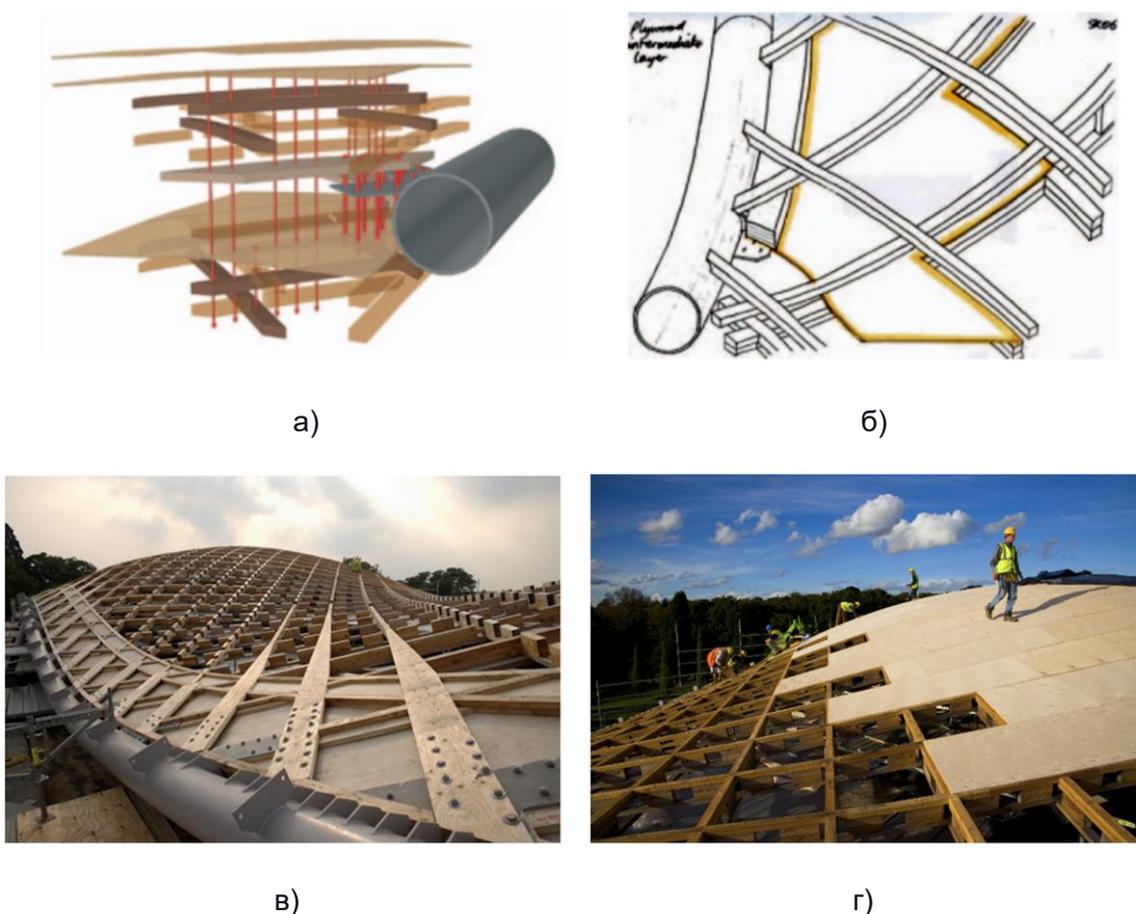


Рис. 8. Соединения деревянной решетчатой оболочки со стальными конструкциями крыши Savill Garden: а, б) схемы контурных соединений; в, г) внешний вид оболочки на разных стадиях монтажа

Параметрические стыковочные узлы демонстрируют значительное повышение стабильности конструкции по сравнению с обычными. Нагрузочные испытания, проведенные в рамках проекта Savill Garden, показали следующие результаты:

- увеличение несущей способности: на 31% для параметрических узлов;
- снижение деформации при пиковой нагрузке: на 26% для параметрических узлов;
- контролируемая деформация: в отличие от стандартных креплений, которые часто разрушались на врезном крае, параметрические соединения демонстрировали более контролируемую деформацию, что свидетельствует о более стабильной работе;
- снижение напряжений: оценка напряжений показала снижение максимальных напряжений при изгибе и сдвиге на 19% и 22% соответственно, а также снижение общей концентрации напряжений на 17%.

Эти результаты, основанные на адаптированных данных и анализе документальных исследований из архива проекта Savill Garden Gridshell<sup>5</sup>, включают всесторонние отчеты о структурных испытаниях, моделирование с помощью анализа конечных элементов (FEA) и оценку характеристик материалов. Систематические исследования, проведенные инженерными и архитектурными группами, участвовавшими в разработке Savill Garden Gridshell, подчеркивают повышенную прочность и долговечность деревянных оболочек при многократных циклах нагрузки (таблицы 2, 3).

Таблица 2. Сравнительные показатели структурной стабильности параметрических и стандартных соединений<sup>6</sup>

Тип соединения	Средняя грузоподъемность (кН)	Деформация при максимальной нагрузке (мм)	Режим сбоя
Стандартное соединение	18.2 ± 0.8	12.7 ± 1.2	Расщепление по краю паза
Параметрическое соединение	23.9 ± 1.1	9.4 ± 0.9	Контролируемая пластическая деформация

Таблица 3. Сравнительные показатели напряжений и характеристики деревянных реек для обеспечения распределенной нагрузки на оболочку с параметрической и стандартными системами соединения

Условие тестирования	Максимальное напряжение при изгибе (МПа)	Напряжение сдвига (МПа)	Снижение концентрации напряжений (%)	Остаточная деформация (мм)
Стандартная соединительная система	35.2 ± 2.0	4.1 ± 0.5	-	2.9 ± 0.4
Параметрическая соединительная система	28.4 ± 1.8	3.2 ± 0.4	~17%	2.1 ± 0.3

Этот пример наглядно демонстрирует, как параметрическое проектирование открывает новые возможности для создания деревянных конструкций сложной формы. Оно позволяет сохранить их архитектурную выразительность, структурную надежность и экологичность. Особо стоит отметить, что оптимизированные крепления дают возможность формировать сложные геометрические конфигурации в виде криволинейных оболочек, не снижая несущей способности и долговечности (рис. 9). Разработанные соединительные элементы эффективно распределяют напряжения по всей оболочке, повышая общую прочность решетчатой конструкции и продлевая срок службы здания. Тщательно продуманная геометрия каждого соединения также минимизирует локальные концентрации напряжений, предотвращая преждевременное разрушение или деформацию.

С эстетической точки зрения, параметрический подход позволил воплотить гладкие, сложные формы криволинейных оболочек, учитывая природные свойства древесины. Вместо ограничений, налагаемых стандартизированными компонентами, он обеспечивает гибкость, гармонирующую с природой дерева и его анизотропией. Полученный архитектурный стиль характеризуется сбалансированным сочетанием рациональности и

<sup>5</sup> Архивы проекта Savill Garden Gridshell (2023). URL: [https://www.istructe.org/journal/volumes/volume-86-\(published-in-2008\)/issue-17/the-savill-garden-gridshell-design-and-constructio/](https://www.istructe.org/journal/volumes/volume-86-(published-in-2008)/issue-17/the-savill-garden-gridshell-design-and-constructio/) (дата обращения: 29.12.2024).

<sup>6</sup> Архивы проекта Savill Garden Gridshell (2023). URL: [https://www.istructe.org/journal/volumes/volume-86-\(published-in-2008\)/issue-17/the-savill-garden-gridshell-design-and-constructio/](https://www.istructe.org/journal/volumes/volume-86-(published-in-2008)/issue-17/the-savill-garden-gridshell-design-and-constructio/) (дата обращения: 29.12.2024).

выразительности, ручного труда и компьютерных технологий. Помимо эстетики и дизайна, оптимизация приносит ощутимые экологические преимущества. Она не только улучшает геометрию соединений для сокращения отходов древесины, но и оптимизирует процесс изготовления, гарантируя соответствие каждого элемента проектным требованиям. Это полностью соответствует современному архитектурному тренду на низкоуглеродное строительство и эффективное управление отходами.

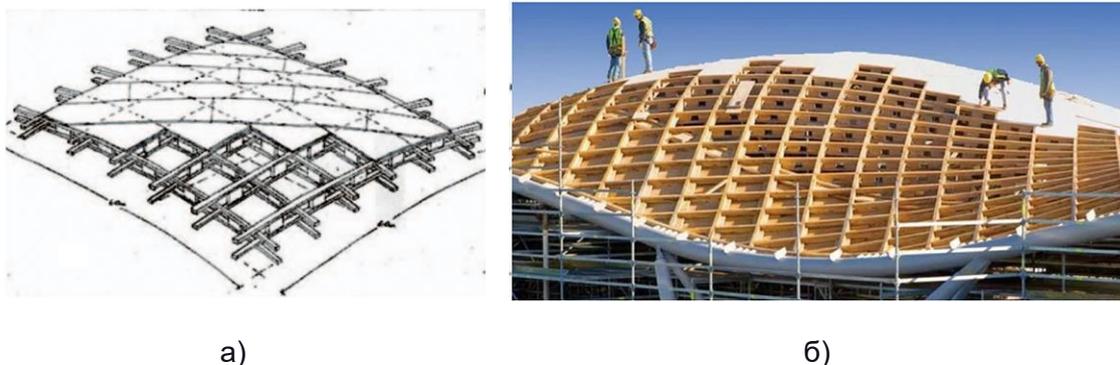


Рис. 9. Конструкция деревянной криволинейной оболочки с покрытием из двух слоев фанеры: а) схема раскладки; б) внешний вид крыши

Несмотря на значительные успехи, параметрическое проектирование на стадии тестирования сталкивается с рядом ограничений. Одной из ключевых проблем является масштабируемость. Хотя современное программное обеспечение способно обрабатывать сложные взаимодействия, увеличение размера или сложности проекта неизбежно ведет к росту вычислительных потребностей. Это, в свою очередь, требует более мощного оборудования, увеличивает время обработки и диктует необходимость в оптимизированных алгоритмах.

Важным аспектом являются и производственные затраты. Изготовление сложных деталей с индивидуальной детализацией, особенно при фрезеровании, может потребовать специализированного оборудования и высокой точности. Это значительно увеличивает как первоначальные капитальные, так и эксплуатационные расходы. Кроме того, критически важно найти баланс между сложностью проектирования и ясностью процесса. По мере усложнения параметрических моделей проектные команды должны обеспечить прозрачность рабочих процессов и строгие нормы контроля качества.

Эти ограничения отражают внутреннее противоречие, присущее разработке архитектурных инноваций с использованием цифровых подходов. Тем не менее, по мере постоянного совершенствования параметрических инструментов и методов, можно ожидать дальнейшего развития вычислительных возможностей, более совершенных алгоритмов и стратегий, которые позволят снизить эксплуатационные расходы, сохраняя при этом высокую точность и детализацию. В этом контексте параметрическое проектирование идеально вписывается в основные тенденции цифровой архитектуры, где процессы проектирования и изготовления все теснее переплетаются. Расширенная возможность объединять создание форм, оптимизацию материалов и аспекты экологичности в единой вычислительной структуре соответствует ключевым целям устойчивого дизайна, который служит стратегической основой для будущих начинаний. Совершенствуя параметрические методы, эффективно используя вычислительные ресурсы и постоянно адаптируясь к меняющимся стандартам экологичности, архитекторы и инженеры смогут продолжать создавать деревянные конструкции сложных форм, отличающиеся повышенной прочностью, эстетической привлекательностью и более рациональным использованием древесины.

Подход к проектированию, примененный при создании Оболочки Savill Garden, стал важным ориентиром для архитекторов и инженеров, работающих с криволинейными оболочками из деревянных конструкций. Главный вклад проекта Savill Garden заключается в демонстрации того, как можно создать сложную конфигурацию двойной кривизны, используя комбинацию вычислительного проектирования, изготовления на станках с ЧПУ и стратегических параметрических усовершенствований.

Интегрировав структурный анализ непосредственно в процесс проектирования, команда Savill Garden создала механизм обратной связи между геометрией, распределением нагрузки и поведением материалов – задачу, координация которой ранее представляла значительные трудности. Вместо того чтобы полагаться исключительно на данные или проверку проекта после его завершения, параметрический подход способствовал итеративному формированию конструкции. Это позволило вносить изменения, ориентированные на эксплуатационные характеристики, благодаря чему каждый шов и каждая рейка были точно откалиброваны в соответствии с их конкретной функцией в деревянной оболочке.

В ходе проекта были разработаны инновационные решения для обработки кривизны непосредственно на строительной площадке. Вместо традиционной предварительной обработки каждого деревянного элемента в контролируемых условиях, проект позволил гибко изменять их форму в процессе сборки. При этом в параметрической модели учитывались допуски на изгиб, углы стыков и пути нагрузки, даже если эти данные были смоделированы и подтверждены в ходе испытаний.

Подобные методы имеют широкое применение в параметрическом проектировании древесины. Архитекторы могут наглядно продемонстрировать, как сложные рабочие процессы стимулируют новые исследования в области автоматизированного производства, методов «активного сгибания» легких конструкций и подходов к проектированию, основанных на данных, сочетающих цифровые и традиционные ремесленные технологии. Развитие этих инноваций подтверждает, что параметрические деревянные узлы могут гармонично объединять ремесленное мастерство и технологические достижения, обеспечивая сочетание эстетической сложности и конструктивной эффективности. В этом контексте модель Оболочки сада Savill служит убедительным доказательством концепции. Она демонстрирует, что такие интегративные стратегии не только не жертвуют дизайнерскими амбициями или прочностью конструкции, но и улучшают их, открывая путь для применения подобных достижений в будущих криволинейных деревянных оболочках.

## **Выводы**

Параметрический подход открывает новые горизонты для использования древесины в строительстве. Он позволяет точно моделировать сложные формы, оптимизируя расход материалов и обеспечивая высокую структурную надежность криволинейных конструкций. Это подтверждает, что параметрическое проектирование делает древесину более эффективным и универсальным материалом для амбициозных и экологических проектов.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на изучение того, как инженерные древесные изделия, например, перекрестно-ламинированная древесина (CLT), могут улучшить дизайн соединений. Совершенствование вычислительных алгоритмов и интерфейсов снизит затраты на проектирование и производство. Параметрическое проектирование обладает огромным потенциалом, позволяя архитекторам применять передовые знания в области геометрии, материаловедения и технологий изготовления для более сложного и эффективного использования древесины.

**Источники иллюстраций**

- Рис. 1 а) URL: <https://archinect.com/news/article/150019184/2-500-year-old-chinese-wood-joints-that-make-buildings-earthquake-proof> (дата обращения: 22.12.2024); б) URL: <https://www.stonebridge.com/post/the-meticulous-art-of-traditional-japanese-woodworking> (дата обращения: 22.12.2024).
- Рис. 2. URL: <https://www.itke.uni-stuttgart.de/research/built-projects/buga-wood-pavilion-2019/> (дата обращения: 22.12.2024).
- Рис. 3 а) URL: <https://discourse.mcneel.com/t/parametric-japanese-timber-joinery-for-post-and-beam-construction/89932/12> (дата обращения: 22.12.2024); б) URL: <https://discourse.mcneel.com/t/parametric-japanese-timber-joinery-for-post-and-beam-construction/89932/12> (дата обращения: 22.12.2024).
- Рис. 4. URL: <https://gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/d/forschung/369.html>  
<https://www.frontiersin.org/journals/robotics-and-ai/articles/10.3389/frobt.2021.768038/full> (дата обращения: 22.12.2024).
- Рис. 5. URL: <https://fewrightstannergate.wordpress.com/2013/02/04/structural-inspiration-savill-gardens-gridshell/> (дата обращения: 22.12.2024).  
<https://ehrw.co.uk/assets/Projects/Savill-Gardens/3b7bbd0a-eeb0-4802-936f-a830049fe82c.pdf> (дата обращения: 22.12.2024)
- Рис. 6 а) URL: <https://www.ehrw.co.uk/assets/Projects/Savill-Gardens/3b7bbd0a-eeb0-4802-936f-a830049fe82c.pdf> (дата обращения: 22.12.2024); б) URL: [https://www.behance.net/gallery/145546969/CASE-STUDY-THE-SAVILL-BUILDING?tracking\\_source=search\\_projects%7Csavill+building&l=0](https://www.behance.net/gallery/145546969/CASE-STUDY-THE-SAVILL-BUILDING?tracking_source=search_projects%7Csavill+building&l=0) (дата обращения: 22.12.2024); в) URL: <https://www.ehrw.co.uk/projects/savill-gardens-windsor/> (дата обращения: 22.12.2024).
- Рис. 7 а) URL: <https://parametrichouse.com/timber-gridshells1/> (дата обращения: 22.12.2024); б) URL: <https://blog.iaac.net/timber-grid-shell-2/> (дата обращения: 22.12.2024); в) URL: [https://vbn.aau.dk/ws/portalfiles/portal/385638248/Design\\_Transactions.pdf](https://vbn.aau.dk/ws/portalfiles/portal/385638248/Design_Transactions.pdf) (дата обращения: 22.12.2024); г) URL: <https://fewrightstannergate.wordpress.com/2013/02/04/structural-inspiration-savill-gardens-gridshell/> (дата обращения: 22.12.2024).
- Рис. 8 а,б) URL: <https://fewrightstannergate.wordpress.com/2013/02/04/structural-inspiration-savill-gardens-gridshell/> (дата обращения: 22.12.2024); в, г) URL: <https://ehrw.co.uk/assets/Projects/Savill-Gardens/3b7bbd0a-eeb0-4802-936f-a830049fe82c.pdf> (дата обращения: 22.12.2024).
- Рис. 9 а) URL: <https://ehrw.co.uk/assets/Projects/Savill-Gardens/3b7bbd0a-eeb0-4802-936f-a830049fe82c.pdf> (дата обращения: 22.12.2024); б) URL: <https://timberdevelopment.uk/case-studies/the-savill-building-windsor-great-park/> (дата обращения: 22.12.2024).

**Список источников**

1. Harris R. Discovering Timber-Framed Buildings. Shire Publications, 1997. 96 p.
2. Smith A. Historical Developments in Woodworking Machinery // Wood Industry Innovations. Timber Press, 2003. P. 25-43.
3. Menges A. Material Information: Integrating Material Characteristics and Behavior // Computational Design for Performative Wood Construction. 2010. P. 151-158. DOI: <https://doi.org/10.52842/conf.acadia.2010.151>
4. Rogeau N. An Integrated Design Tool for Timber Plate Structures to Generate Joints Geometry, Fabrication Toolpath, and Robot Trajectories / N. Rogeau, P. Latteur, Y. Weinand // Automation in Construction. 2021. Vol. 130, October. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021>
5. Rogeau N. A Collaborative Workflow to Automate the Design, Analysis, and Construction of Integrally-Attached Timber Plate Structures // Post-Carbon: Proceedings of the 27th CAADRIA Conference, Sydney, 9-15 April 2022 / J. van Ameijde, N. Gardner, Kyung Hoon Hyun, Dan Luo, U. Sheth (Eds.). CUMINCAD, 2022. P. 151-160. URL:

- [https://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/paper/caadria2022\\_69](https://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/paper/caadria2022_69) (дата обращения: 29.12.2024).
6. Digital Fabrication for Circular Timber Construction: A Case Study / D. Reisach, S. Schütz, J. Willman, S. Schneider // *Journal of Circular Economy*. 2024. № 1(2). DOI: <https://doi.org/10.55845/VWGD7873> (дата обращения: 29.12.2024).
  7. Urbach Tower: Integrative Structural Design of a Lightweight Structure Made of Self-Shaped Curved Cross-Laminated Timber / S. Bechert, et al. // *Structures*. 2021. Vol. 33, October. P. 3667-3681. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.06.073> (дата обращения: 29.12.2024).
  8. Dunn N. *Digital Fabrication in Architecture*. Laurence King Publishing, 2012. 192 p.
  9. Heyman J. *The Stone Skeleton: Structural Engineering of Masonry Architecture*. Cambridge University Press, 2003. 160 p. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9781107050310> (дата обращения: 29.12.2024).
  10. Pevsner N. *Pioneers of Modern Design: From William Morris to Walter Gropius*. Penguin, 1991. 264 p.
  11. Menges A. *Material Computation – Higher Integration in Morphogenetic Design* // *Architectural Design*. 2012. № 82(2). P. 14-21.
  12. Experimental Testing on Timber Connections Considering the Influence of Gap Size and Intumescent Sealants / M. Du Plessis, et al. // *Fire and Materials*. 2023. Vol. 48. № 1, June. P. 39-61. DOI: <https://doi.org/10.1002/fam.3164> (дата обращения: 29.12.2024).
  13. *Shell Structures for Architecture: Form Finding and Optimization* / ed. by S. Adriaenssens, et al. Routledge, 2017. 340 p. DOI: <https://doi.org/10.4324/9781315849270> (дата обращения: 29.12.2024).
  14. Kilian A. Particle-Spring Systems for Structural Form Finding / A. Kilian, J. Ochsendorf // *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures*. 2005. № 46(2). P. 77–84.
  15. Novel Engineered Wood and Bamboo Composites for Structural Applications: State-of-art of Manufacturing Technology and Mechanical Performance Evaluation / Sun Xiaofeng, et al. // *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 249, March. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118751> (дата обращения: 29.12.2024).
  16. Gramazio F. *The Robotic Touch: How Robots Change Architecture* / F. Gramazio, M. Kohler, J. Willmann. Park Books. 2014. 488 p.
  17. Application of Timber and Wood-Based Materials in Architectural Design Using Multi-Objective Optimisation Tools / Stefańska A. et al. // *Construction Economics and Building*. 2021. Vol. 21, № 3. DOI: <https://doi.org/10.5130/AJCEB.v21i3.7642> (дата обращения: 29.12.2024).
  18. Preisinger C. Linking structure and parametric geometry // *Architectural Design*. 2013. № 83(2). P. 110–113. DOI: <https://doi.org/10.1002/ad.1564> (дата обращения: 29.12.2024).
  19. Computational analysis of hygromorphic self-shaping wood gridshell structures / P. Grönquist, P. Panchadcharam, D. Wood et al. // *Royal Society Open Science*. 2020. Vol. 7, № 7. DOI: <http://dx.doi.org/10.1098/rsos.192210> (дата обращения: 29.12.2024).
  20. Robotic Fabrication of Bespoke Timber Frame Modules / A. Thoma, A. Adel, M. Helmreich et al. // *Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design (ROBARCH 2018)*: conference

proceedings / J. Willmann, P. Block, M. Hutter et al. (eds). Springer, 2019. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-92294-2\\_34](https://doi.org/10.1007/978-3-319-92294-2_34) (дата обращения: 29.12.2024).

21. Akiyoshi K. Local-reconfigurable Freeform surface with plywood / K. Akiyoshi H. Tanaka // eCAADe 2014. Fusion: Proceedings of the 32nd International Conference on Education and research in Computer aided Architectural Design in Europe, Newcastle upon Tyne, England, UK, 10-12 September 2014. P. 527-535. URL: [https://ecaade.org/downloads/eCAADe2014\\_volume1.pdf](https://ecaade.org/downloads/eCAADe2014_volume1.pdf) (дата обращения: 10.02.2026).
22. Li Di. Digital fabrication as a tool for investigating traditional Chinese architecture / Di Li, M. Knight, A. Brown // eCAADe 2014. Fusion: Proceedings of the 32nd International Conference on Education and research in Computer aided Architectural Design in Europe, Newcastle upon Tyne, England, UK, 10-12 September 2014. P.623-632. URL: [https://ecaade.org/downloads/eCAADe2014\\_volume1.pdf](https://ecaade.org/downloads/eCAADe2014_volume1.pdf) (дата обращения: 10.02.2026).
23. Apolinarska A.A. Complex Timber Structures from Simple Elements. Computational Design of Novel Bar Structures for Robotic Fabrication and Assembly: Doctoral Thesis / Aleksandra Anna Apolinarska. Zurich, 2018. 154 p. ETH Zurich Research Collection. DOI: <https://doi.org/10.3929/ethz-b-000266723> (дата обращения: 29.12.2024).
24. Brandner, R., Flatscher, G., Ringhofer, A., Schickhofer, G., & Thiel, A. (2016). Cross laminated timber (CLT): Overview and development. European Journal of Wood and Wood Products, 74(3), 331–351. <https://doi.org/10.1007/s00107-015-0999-5>

## References

1. Harris R. Discovering Timber-Framed Buildings. Shire Publications, 1997, 96 p.
2. Smith A. Historical Developments in Woodworking Machinery. Wood Industry Innovations, Timber Press, 2003, pp. 25-43.
3. Menges A. Material Information: Integrating Material Characteristics and Behavior. Computational Design for Performative Wood Construction, 2010, pp. 151-158. DOI: <https://doi.org/10.52842/conf.acadia.2010.151>
4. Rogeau N. et al. An Integrated Design Tool for Timber Plate Structures to Generate Joints Geometry, Fabrication Toolpath, and Robot Trajectories. Automation in Construction, 2021, vol. 130, October. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021>
5. Rogeau N. A Collaborative Workflow to Automate the Design, Analysis, and Construction of Integrally-Attached Timber Plate Structures. J. van Ameijde et al. (eds.) POST-CARBON- Proceedings of the 27th CAADRIA Conference, Sydney, 9-15 April 2022, CUMINCAD, 2022, pp. 151-160. Available at: [https://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/paper/caadria2022\\_69](https://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/paper/caadria2022_69). (date of access: 29.12.2024)
6. Reisach D., Schütz S., Willman J., Schneider S. Digital Fabrication for Circular Timber Construction: A Case Study. Journal of Circular Economy, 2024, no 1(2). DOI: <https://doi.org/10.55845/VWGD7873>
7. Bechert S. et al. Urbach Tower: Integrative Structural Design of a Lightweight Structure Made of Self-Shaped Curved Cross-Laminated Timber. Structures, 2021, vol. 33, Oct, pp. 3667-3681. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.06.073>
8. Dunn N. Digital Fabrication in Architecture. Laurence King Publishing, 2012, 192 p.
9. Heyman J. The Stone Skeleton: Structural Engineering of Masonry Architecture, Cambridge University Press, 2003, 160 p. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9781107050310>

10. Pevsner N. *Pioneers of Modern Design: From William Morris to Walter Gropius*, Penguin, 1991, 264 p.
11. Menges A. *Material Computation – Higher Integration in Morphogenetic Design*. *Architectural Design*, 2012, no 82(2), pp.14-21.
12. Du Plessis M. et al. Experimental Testing on Timber Connections Considering the Influence of Gap Size and Intumescent Sealants. *Fire and Materials*, 2023, vol. 48, no 1, June, pp. 39-61. DOI: <https://doi.org/10.1002/fam.3164>
13. Adriaenssens S. et al. (eds.). *Shell Structures for Architecture: Form Finding and Optimization*, Routledge, 2017, 340 p. DOI: <https://doi.org/10.4324/9781315849270>
14. Kilian A., Ochsendorf J. Particle-Spring Systems for Structural Form Finding. *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures*, 2005, no 46(2), pp. 77-84.
15. Sun X. et al. Novel Engineered Wood and Bamboo Composites for Structural Applications: State-of-art of Manufacturing Technology and Mechanical Performance Evaluation. *Construction and Building Materials*, 2020, vol. 249, March. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118751>
16. Gramazio F., Kohler M., J. Willmann. *The Robotic Touch: How Robots Change Architecture*, Park Books, 2014, 488 p.
17. Stefańska A. et al. Application of Timber and Wood-Based Materials in Architectural Design Using Multi-Objective Optimisation Tools. *Construction Economics and Building*, 2021, vol. 21, no 3, Aug. DOI: <https://doi.org/10.5130/AJCEB.v21i3.7642>
18. Preisinger C. Linking structure and parametric geometry. *Architectural Design*, 2013, no 83(2), pp. 110–113. DOI: <https://doi.org/10.1002/ad.1564>
19. Grönquist P., Panchadcharam P., Wood D. et al. Computational analysis of hygromorphic self-shaping wood gridshell structures. *Royal Society Open Science*, 2020, vol. 7, no 7, DOI: <http://dx.doi.org/10.1098/rsos.192210>
20. Thoma A., Adel A., Helmreich M. et al. (2019). Robotic Fabrication of Bespoke Timber Frame Modules. *Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2018 (ROBARCH 2018)*, Springer, 2019. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-92294-2\\_34](https://doi.org/10.1007/978-3-319-92294-2_34)
21. Akiyoshi K., Tanaka H., Local-reconfigurable Freeform surface with plywood. *eCAADe 2014. Fusion: Proceedings of the 32nd International Conference on Education and research in Computer aided Architectural Design in Europe*, Newcastle upon Tyne, England, UK, 10-12 September 2014, pp. 527-535. Available at: [https://ecaade.org/downloads/eCAADe2014\\_volume1.pdf](https://ecaade.org/downloads/eCAADe2014_volume1.pdf)
22. Li Di, Knight M., Brown A. Digital fabrication as a tool for investigating traditional Chinese architecture. *eCAADe 2014. Fusion: Proceedings of the 32nd International Conference on Education and research in Computer aided Architectural Design in Europe*, Newcastle upon Tyne, England, UK, 10-12 September 2014, pp. 623-632. Available at: [https://ecaade.org/downloads/eCAADe2014\\_volume1.pdf](https://ecaade.org/downloads/eCAADe2014_volume1.pdf)
23. Apolinarska A.A. *Complex Timber Structures from Simple Elements (Doctoral Thesis)*, Zurich, ETH, 2018, 154 p. DOI: <https://doi.org/10.3929/ethz-b-000266723>
24. Brandner, R., Flatscher, G., Ringhofer, A., Schickhofer, G., & Thiel, A. (2016). Cross laminated timber (CLT): Overview and development. *European Journal of Wood and Wood Products*, 74(3), 331–351. <https://doi.org/10.1007/s00107-015-0999-5>

**ОБ АВТОРАХ****Качана Касулу**

Соискатель степени кандидата архитектуры, кафедра архитектуры, реставрации и дизайна, Инженерная академия, Российский университет Дружбы народов, Москва, Россия

[kasulukachana23@gmail.com](mailto:kasulukachana23@gmail.com)

**Воличенко Ольга Владимировна**

Доктор архитектуры, профессор кафедры основ архитектуры и художественных коммуникаций НИУ Московский государственный строительный университет, Москва, Россия;

профессор кафедры архитектуры, реставрации и дизайна, Инженерная Академия, Российский Университет Дружбы Народов, Москва, Россия

[volichenko-ov@rudn.ru](mailto:volichenko-ov@rudn.ru)

**ABOUT THE AUTHORS****Kachana Kasulu**

Applicant PhD in Architecture, Department of Architecture, Restoration and Design, Engineering Academy, RUDN University, Moscow, Russia

[kasulukachana23@gmail.com](mailto:kasulukachana23@gmail.com)

**Volichenko Olga V.**

Doctor of Architecture, Professor, Department of Architecture Fundamentals and Artistic Communications, Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia;

Professor, Department of Architecture, Restoration, and Design, Engineering Academy, RUDN University, Moscow, Russia

[volichenko-ov@rudn.ru](mailto:volichenko-ov@rudn.ru)