

# 110 лет

КОНДИЦИОНИРУЕМ ВОЗДУХ



turn to the experts<sup>SM</sup>



ИЗОБРЕТАТЕЛЬ ПЕРВОГО КОНДИЦИОНЕРА ВОЗДУХА, АВТОР ТЕОРИИ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ  
**УИЛЛИС КЕРРИЕР**, ОСНОВАТЕЛЬ АМЕРИКАНСКОЙ КОМПАНИИ CARRIER



В 1902 ГОДУ ОН СОЗДАЛ ПЕРВУЮ В МИРЕ СИСТЕМУ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ,  
А В 1931 ГОДУ – ПЕРВЫЙ БЫТОВОЙ КОНДИЦИОНЕР ДЛЯ ДОМА

[www.ahi-carrier.ru](http://www.ahi-carrier.ru)

июнь/август 02/19

# ВЫСОТЫЕ ЗДАНИЯ

W350  
ДЕРЕВО ДЛЯ  
ГОРОДА

W350  
Wood for Metropolis

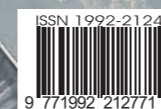
КЛАСТЕРНАЯ  
ГЕОМЕТРИЯ  
НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

Next-Generation  
Cluster Geometry

ПАРЯЩАЯ ТРОПА  
Aerial Trail

«Высотные здания» Tall buildings

12+



Tall Buildings 2/19  
журнал высотных технологий



# НАВСТРЕЧУ «ЗЕЛЕННОЙ» АРХИТЕКТУРЕ



К 2050 году Швейцария решила стать более энергетически независимой страной и сократить выбросы парниковых газов. Основная часть реализации этих планов связана с концепцией строительства зданий. Как минимум 40–60% от общего объема потребляемых ресурсов зависят от качества недвижимости. Поэтому архитекторы и разработчики должны досконально изучить вопрос со всех сторон! Но сегодня дискуссии о будущем в основном фокусируются на технологиях, а не на дизайне, формах и материалах. Команда молодых швейцарских архитекторов задалась вопросом: способна ли задача устойчивого развития стать формообразующей? Предложенная JOM Architekten разработка называется Timber Structures 3.0 («Деревянные конструкции 3.0») – это совершенно новая технология, позволяющая создавать тонкие, высокоэффективные деревянные конструкции, хорошо выдерживающие многоосное напряжение.

Ключевые слова: стыковое соединение, двухосная нагрузка, плоская деревянная плита, многослойная клееная деревянная панель (CLT)

Материалы предоставлены JOM ARCHITEKTEN,  
Текст: СТЕФАН ЁШГЕР, СТЕФАН ЗЕЛЛИГ, АНДРЕА ФРАНГИ, ШТЕФФЕН ФРАНКЕ, МАРСЕЛЬ МУСТЕР

## ВВЕДЕНИЕ

В прошлом году, в рамках проходящего в Екатеринбурге 100+ Forum Russia, директор и основатель цюрихского архитектурного бюро JOM Architekten Стефан Ёшгер представил несколько тезисных положений «зеленой» архитектуры и проиллюстрировал их примерами разработок коллектива компании. Он подробно рассказал о деревянных конструкциях, так как, учитывая природные ресурсы России, они могут иметь большое значение для страны. Чтобы ответить на вопрос о проектном потенциале экологически устойчивой архитектуры, конструкторы из компании JOM Architekten провели серию дискуссий в рамках форума World in 2050. С экспертами в области проектирования, строительства, дизайна и науки обсуждались будущее архитектуры и новые перспективные инженерные решения. Сводный отчет с выводами о реализации концепций «зеленой» архитектуры будущего был опубликован в ведущем архитектурном журнале «Werk, Bauen + Wohnen». Также архитекторы бюро JOM разработали ориентированный на будущее проект деревянного высотного здания.

Базовые тезисы разработчиков представлены здесь:

1. Как известно, в течение нескольких десятилетий человеческая цивилизация использует источники энергии, которые были накоплены под поверхностью земли в течение миллионов лет, а это вызывает изменение климата.
2. Было бы крайне безответственно, если бы архитекторы не пытались бороться с глобальным потеплением. В настоящее время нефтепродукты используются для утепления фасада, природный газ – для изготовления кирпичей, а каменный уголь сжигается в процессе выпуска цемента. На одно лишь производство цемента приходится более 5% выбросов CO<sub>2</sub> во всем мире. На самом деле эта цифра как минимум вдвое выше, если учитывать движение воздушных масс в атмосфере Земли.
3. Полезные ископаемые не должны расходоваться на здания: ни в процессе эксплуатации, ни в процессе строительства, ни в производстве

строительных материалов – этот сдвиг парадигмы неизбежен!

4. Очевидно, что строить дома будут из возобновляемых материалов или таких, которые можно повторно использовать в технологическом цикле. Конструктивные сочленения в проектах будущего предполагается выполнять в виде вставок, зажимов и винтовых соединений, без гвоздей, раствора или отливки.

5. Ни один архитектор в здравом уме не станет отказываться от «зеленых» строительных компонентов. Потому что то, что еще не существует, может быть изменено: тектоника систем несущих конструкций из ламинированной древесины, логика узлов угловых соединений из переработанной стали, правильная форма балконных перил из переработанных полимеров с печатью и многое другое!

6. Предполагается, что ручная и машинная обработка сольются воедино. Строительная площадка станет местом сборки, а средством выражения





Рис. 1. Деревянные конструкции 1.0: колонны и балки

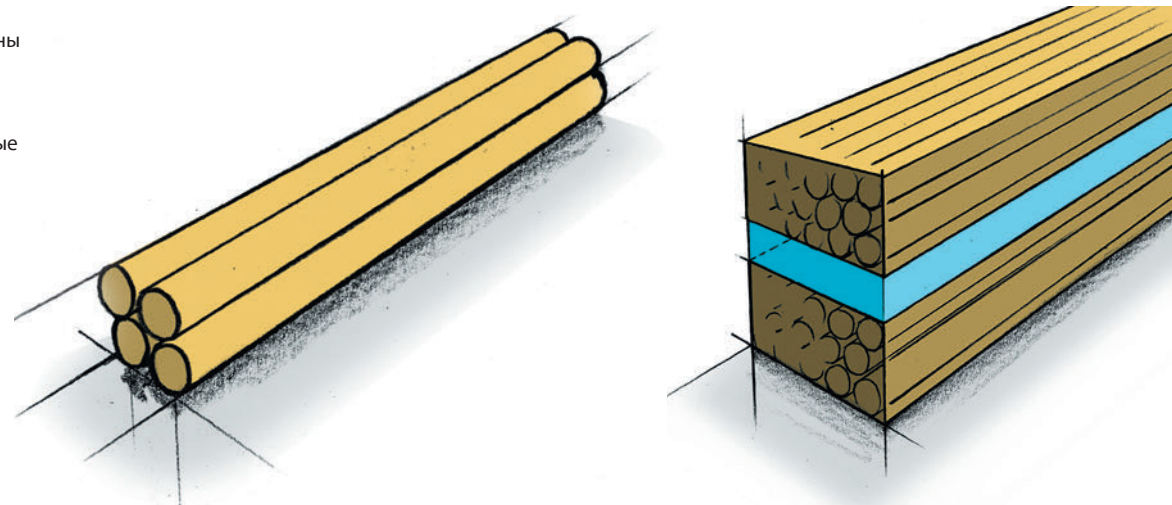
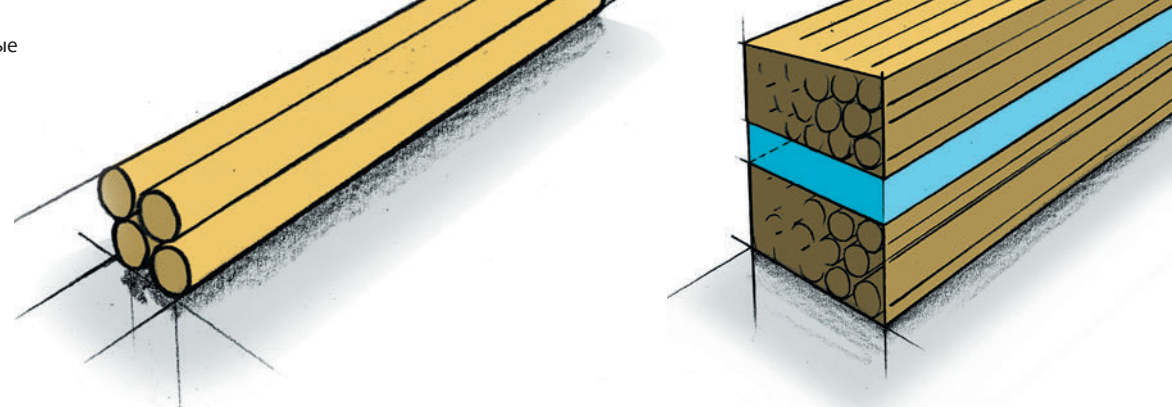


Рис. 2. Деревянные конструкции 2.0: клееные брусья и панели CLT



творческих идей архитекторов будет разработка соединений.

7. Никто не станет препятствовать развитию привлекательной «зеленой» архитектуры, если она останется открытой. Это позволит предложить множество остроумных технических подходов, которых нет в нормативных документах и руководствах по стандартам. Появятся беспрецедентно мощные инструменты планирования. От динамических солнцезащитных штор до тепловых буферных зон, которые обеспечивают комфорт, – во всех случаях клиентов можно будет убедить в эффективности новых дизайнерских решений при помощи визуального моделирования.

8. Потребители приветствуют внимание к вопросам о том, как создается климат в помещении и как генерируется энергия. Необходимую циркуляцию воздуха обеспечит изменение высоты помещения, а большие поверхности конструкций будут использоваться для плавного нагрева и охлаждения. Насыщенный ландшафт крыш заполняют солнечные арки и уголки с растениями.

9. Имеющая культурную ценность архитектура может возникнуть только как ответ на вызовы и возможности настоящего. Пришло время для «зеленой» архитектуры!

До сегодняшнего дня все известные системы, используемые для возведения деревянных зда-

ний, предполагали наличие только несущих перекрытий с одноосной нагрузкой. Таким образом, по сравнению с обычными железобетонными плитами, деревянные перекрытия получались толстыми, дорогими и сложными в монтаже. Причина этого заключается в отсутствии эффективной технологии соединения, которая позволяла бы жестко соединять элементы древесных плит друг с другом. Альтернативными решениями являются гибридные конструктивные системы с использованием бетона или стали, однако такая комбинация материалов обладает целым рядом недостатков, особенно в отношении веса, экологии, времени строительства и затрат.

В рамках большого исследовательского проекта была разработана и уже испытана новая система деревянных перекрытий. Она предназначена для жилых, коммерческих и промышленных зданий. Перекрытие работает как плоская несущая плита, подверженная двухосным вертикальным нагрузкам. Оно состоит из деревянных элементов, таких как многослойные клееные деревянные панели (Cross-Laminated Timber, далее CLT), склеивающиеся непосредственно на участке с помощью высокоэффективной технологии стыкового соединения. Уже проведены анализ центрального элемента плиты, стыковочных соединений, а также пожарные испытания. Исследование показало обоснованность этого нововведения. Первый прототип был построен в Туне (Швейцария) в 2015 году. Большой трехлетний исследовательский проект начался в 2016 году и ставил своей целью добиться вывода этой технологии на рынок.

С 2009 года швейцарская инженеринговая компания Timbates, ETH Zurich, BFN Biel, Purbond (Henkel Group) и лесопильная фирма Schilliger Holz работают вместе над проектом «Деревянные плиты в коммерческих и промышленных зданиях».

Целью проекта являются разработка и внедрение двухосной несущей плоской деревянной плиты на основе таких элементов, как многослойные клееные деревянные панели, склеивающиеся

непосредственно на участке застройки с помощью высокоэффективной технологии стыкового соединения.

В то же время были защищены несколько бакалаврских и магистерских диссертаций. Результаты исследовательских проектов являются многообещающими: с одной стороны, было доказано, что можно производить плоские деревянные плиты с сеткой колонн до 8,00 × 8,00 м и нагрузкой до 5 кН/м<sup>2</sup> [3, 4]. При сопоставимой стоимости с обычными железобетонными плоскими плитами они в пять раз легче и фактически не производят углеродных выбросов. Напротив, большое количество углерода содержится в самой конструкции. Результатом исследовательского проекта стало создание первого прототипа, готового к сборке. Кроме того, недавно разработанная технология клеевого соединения открывает новые области применения для деревянных конструкций. Она позволяет использовать деревянные балки практически любой длины и плиты практически любого размера. Например, могут быть изготовлены жесткие стены, полы или своды здания любой формы. Это настолько новаторское решение, что можно говорить о новом поколении конструкций для строительства деревянных зданий.

#### ЭВОЛЮЦИЯ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ. ДЕРЕВЯННЫЕ КОНСТРУКЦИИ ПОКОЛЕНИЯ 1.0: КОЛОННЫ И БАЛКИ

На протяжении веков в строительстве зданий использовались деревянные опоры (колонны) и балки. Деревья рубили, их ветви удаляли, после чего древесину обрабатывали и распиливали на балки и доски для строительства зданий.

#### ДЕРЕВЯННЫЕ КОНСТРУКЦИИ ПОКОЛЕНИЯ 2.0: КЛЕЕННЫЕ БРУСЬЯ И МНОГОСЛОЙНЫЕ КЛЕЕННЫЕ ДЕРЕВЯННЫЕ ПАНЕЛИ

В XX веке деревья также пилили на доски, потом сушили, подбирали по длине и клеили из них брусья, а совсем недавно – многослойные клееные деревянные панели (CLT). Благодаря таким изделиям несущая балка может быть больше и длиннее, чем простое дерево. Возможны также изогнутые конструктивные балки. Сегодня массивные панели CLT размером до 3,40 м в ширину и 20 м в длину производятся в промышленных масштабах.

#### ДЕРЕВЯННЫЕ КОНСТРУКЦИИ ПОКОЛЕНИЯ 3.0: ТЕХНОЛОГИЯ СТЫКОВЫХ КЛЕЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ

В настоящее время имеется возможность склеивать волокна древесины встык. Это уже третье поколение деревянных конструкций, получившее название и запатентованное как «Деревянные конструкции 3.0». Однако для широкого применения этой инновационной методики необходимы дальнейшие исследования.

#### ПОСЛЕДНИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ: СИСТЕМА СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ЗДАНИЙ

Цель этой новой технологии заключается в постройке типичных каркасных зданий из бруса, как показано на рисунке 4. Они будут состоять только из клеенных деревянных элементов, без использования крепежа (например, винтов, гвоздей или металлических пластин).

Основными компонентами здания являются стены поперечной конструктивной системы, колонны и плоские плиты перекрытия в вертикальной конструктивной системе. Основной проблемой является разработка высокопрочной несущей плиты для восприятия двухосных нагрузок.

Ввиду связанных с процессами изготовления, транспортировки и сборки ограничений важно

Рис. 4. Типичная каркасная конструкция

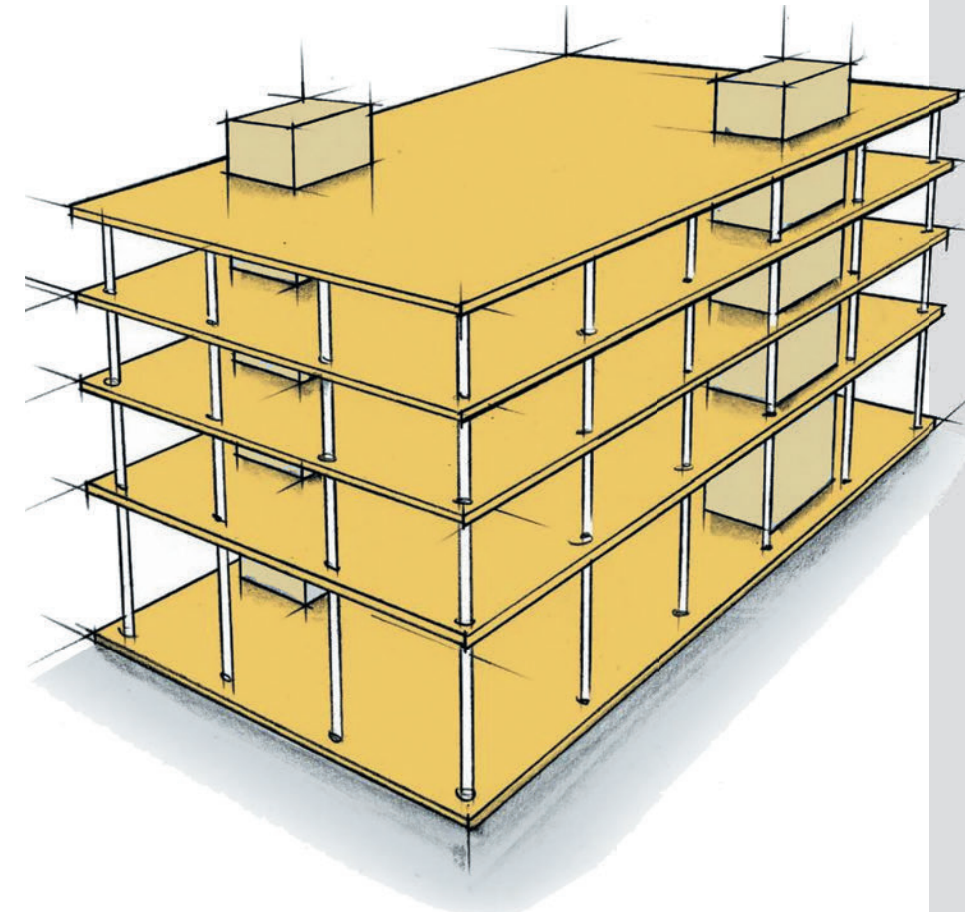


Рис. 5. План этажа

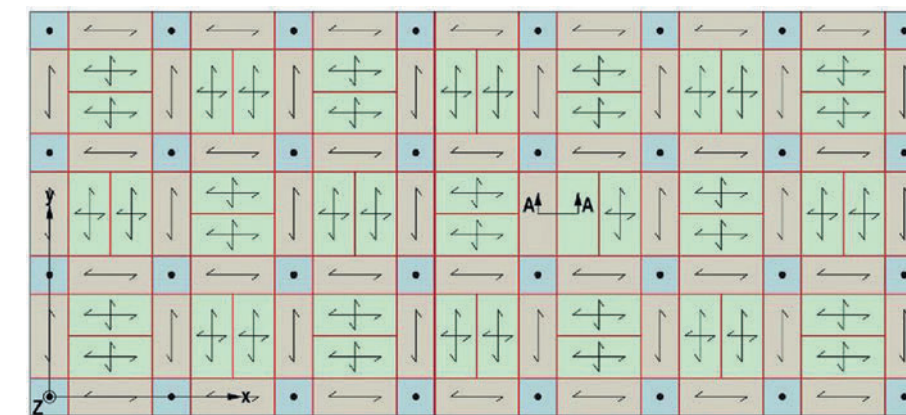
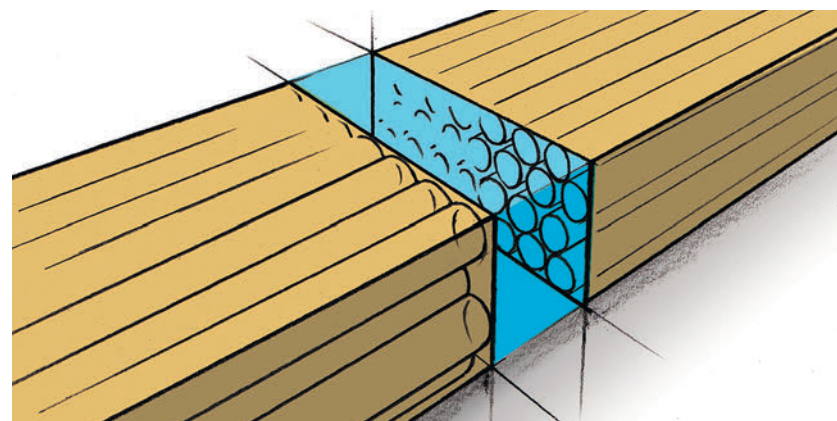


Рис. 3. Деревянные конструкции 3.0: технология стыкового клеевого соединения



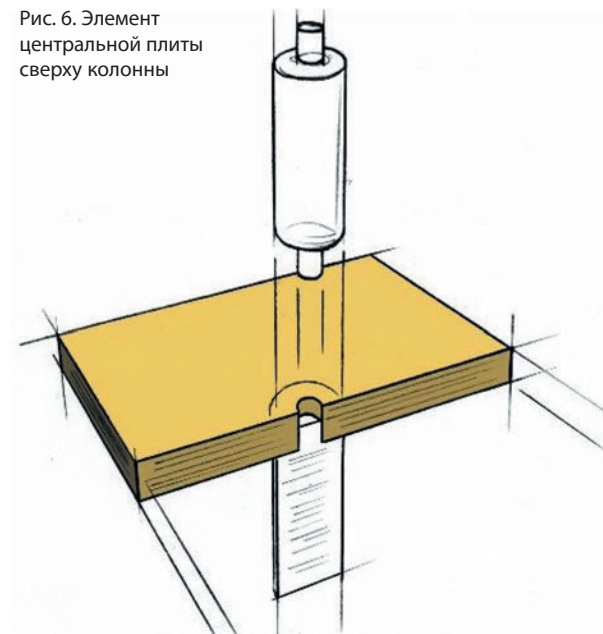


эффективно разделить планы этажей любого типа на элементы перекрытий. В параметрическом исследовании показанный ниже типовой план этажа оказался наиболее подходящим. «Зеленые» элементы должны передавать двухосную нагрузку на одноосевые несущие «красные» элементы, которые, в свою очередь, передают нагрузку на центральные элементы, отмеченные синим цветом вокруг колонн. «Синие» элементы похожи на железобетонные плоские плиты, подверженные высоким изгибающим моментам и усилиям сдвига.

### ЭЛЕМЕНТЫ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ПЛИТЫ С КОЛОННАМИ

Существует фундаментальная проблема восприятия статической нагрузки – наличие зоны высокой напряженности вокруг колонны и возможность усиления элементов центральной плиты для предотвращения продавливания колонны. Боккадоро провел теоретический анализ и выполнил проверку шести различных многослойных конструкций в масштабе 1:1 [1]. Основным материалом для элементов центральной плиты был клееный брус (LVL) из шпона бука, который обладает очень хорошими механическими свойствами по сравнению с обычной мягкой древесиной. Шесть образцов были испытаны на продавливание в лаборатории ETH Zurich: три однородных массивных плиты из буковой фанеры и три гибридных плиты из буковой фанеры и обычных еловых досок. Толщина плиты составляла 240 мм, 320 мм и 400 мм. Исследование показало преимущества материала на основе буковой фанеры с точки зрения прочности на изгиб и сдвиг. С помощью простых статических моделей, а затем с использованием программы КЭ-анализа была оценена ожидаемая несущая способность элементов центральной плиты. Затем шесть элементов центральной плиты размером 2,5 × 2,5 × 0,24, 0,32 и 0,40 м были испытаны на прочном полу в лаборатории ETH Zurich. Они были нагружены расположенным

Рис. 6. Элемент центральной плиты сверху колонны



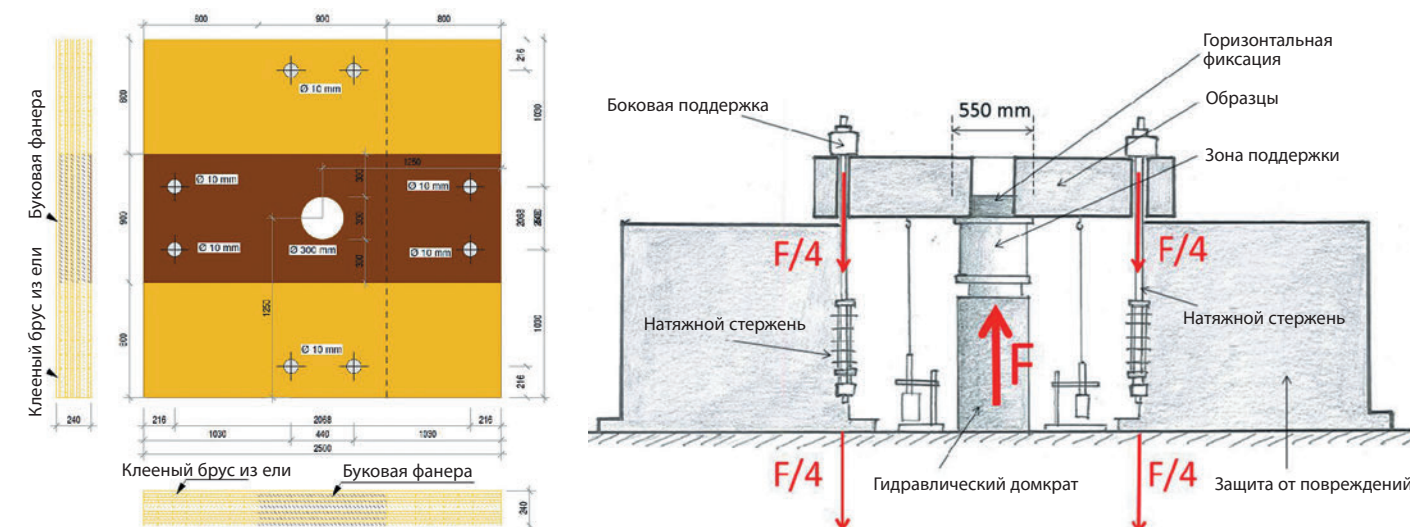
в центре цилиндром, имитирующим эффект приложения нагрузки. Образцы сломались при увеличении усилия между 1'150–3'100 кН. Это очень хороший результат, демонстрирующий большой потенциал механических свойств плит из букового клееного бруса.

Важной частью оценки был анализ наблюдаемой пластической работы элементов фанерной плиты из бука, которая нетипична для деревянных конструкций, поскольку древесина обычно является хрупкой.

Такую пластическую работу можно объяснить гипотезой о перераспределении напряжений по ширине и частично по высоте поперечного сечения. Когда трещины начинают распространяться наружу, центральная область доски оказывается разгруженной и изгибающие напряжения смещаются во внешнюю область элемента. На однородных образцах плоская часть кривой максимальной нагрузки более отчетлива по сравнению с таковой в гибридных образцах [1, 5].

Рис. 7. Элемент центральной плиты для колонны, испытанный в ETH Zurich на продавливание (гибридный образец)

Рис. 8. Испытательная установка для элемента центральной плиты с колоннами



### СТЫКОВЫЕ КЛЕЕВЫЕ СОЕДИНЕНИЯ

Были оценены различные методы для соединения элементов плиты друг с другом. Посадка с геометрическим замыканием формы (например, с помощью уступов, приливов и канавок) приведет к удорожанию и увеличению времени обработки, а также огромным расходам материала на поверхность из двух плит в области соединения.

Из-за поперечных растягивающих напряжений уступы плиты должны быть снабжены дополнительным армированием. Шиповые соединения подвержены повреждениям и способны выдерживать небольшое растягивающее напряжение перпендикулярно волокну древесины, если они выполнены небрежно. Поэтому была выбрана технология стыкового клеевого соединения. До сих пор на рынке для стыковых клеевых соединений не существует сертифицированных адгезивов.

Компания Purbond AG, входящая в группу компаний Henkel, разработала двухкомпонентный полиуретановый клей, который можно использовать для указанных целей.

В начале работы были рассмотрены различные геометрические формы для клеевых соединений. Простейшей конфигурацией, которую необходимо получить, было стыковое соединение, но также были проанализированы и другие профили, такие как V-образные прорезы и шиповые соединения [6].

В ходе различных экспериментальных испытаний была выяснена допустимая толщина шва с учетом различных условий, таких как перепады температуры или ширина шва. Было проведено более 1000 испытаний на растяжение ламелей в 17 сериях [6, 7, 8, 9, 10, 11, 12]. Порядок заполнения шва снизу очень важен, поскольку любой воздушный пузырь будет двигаться вверх, что исключает возможность образования воздушных карманов.

На основании этих испытаний были сформулированы условия и требования к обеспечению качества. Фуллеман [7] дополнительно изучил влияние следующих факторов на строящийся объект: минимальная толщина шва, температура, влажность,

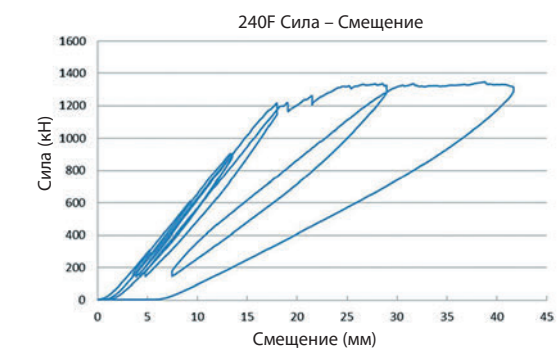


Рис. 9. Испытание элемента центральной плиты в ETH Zurich

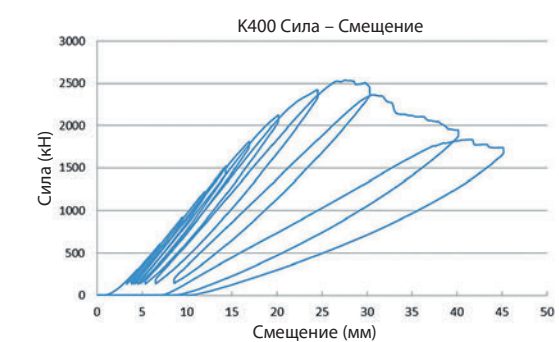


Рис. 10. Пластическая работа элемента центральной плиты F240

Рис. 11. Пластическая работа элемента центральной плиты K400

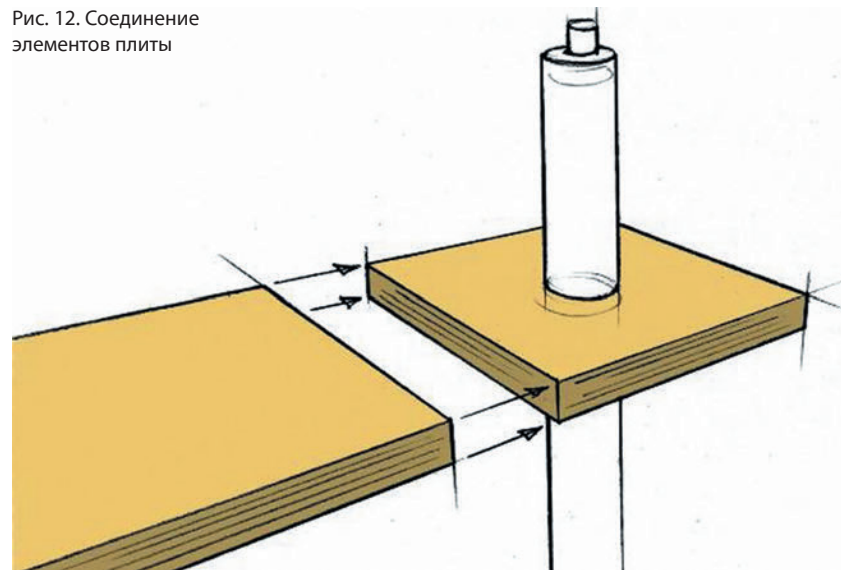
Плита	Несущая способность			Эффективное усилие	Безопасность несущих конструкций
	Результаты теста	Нормативное значение показателя строительного материала	Расчетное значение показателя строительного изделия SIA 265		
	$F_R = F_{cr}$	$F_{Rk}$	$F_{Rd}$ ( $\gamma_M / \eta_M = 1.5$ , $\eta_w = \eta_t = 1$ )	$F_{Ed}$	$F_{Rd} \geq F_{Ed}$
Наименование	kN	kN	kN	kN	
K240	1362	800	533	690	Неудовлетворительно
F240	1155	1026	684	690	Неудовлетворительно
K320	1700	1515	1010	700	Удовлетворительно
F320	2100	1951	1300	700	Удовлетворительно
K400	2500	2328	1552	710	Удовлетворительно
F400	3099	2878	2066	710	Удовлетворительно

K = фанера из бука и ели  
F = фанера из бука

Таблица 1: Результаты испытаний на сдвиг при продавливании элементов центральной плиты



Рис. 12. Соединение элементов плиты



ми вариациями геометрии, влажности древесины и продолжительности нагрузки.

Результаты исследований показали стабильно высокое качество стыкового клеевого соединения. Благодаря этому прогрессу были достигнуты характерные значения прочности на изгиб от 15,6 до 20,7 Н/мм<sup>2</sup>.

Эти значения выше, чем любые показатели прочности, полученные ранее. Исследования влияния влаги показали, что повышенное содержание влаги в древесине приводит к снижению прочности на изгиб. Кроме того, было установлено, что содержание влаги зависит от направления разреза и расположения досок в испытуемом образце, а попадание влаги вызывает больше всего проблем в боковых зонах. Анализ последствий длительной нагрузки значительного изменения прочности не выявил.

**ИСПЫТАНИЯ НА ОГНЕСТОЙКОСТЬ**

В диссертации Бюльмана [2] были проведены мелко- и крупномасштабные испытания огнестойкости фанеры и панелей CLT (см. также [13]).

Было проведено шесть маломасштабных испытаний на огнестойкость для четырех различных типов стыковых клеевых соединений в каждом. Образцы, изготовленные из буковой фанеры и еловых панелей CLT, имели размеры 1,2 × 0,9 м с двумя стыками шириной 6 и 12 мм. Их выдерживали в соответствии со стандартом ISO по испытанию огнестойкости в течение 30, 60 и 90 минут при воздействии огня с одной стороны. Температура в соединениях фиксировалась с помощью термопар.

После испытания на огнестойкость обуглившийся слой был удален, и была определена глубина обугливания.

В итоге можно сделать следующие основные выводы об огнестойкости стыковых клеевых соединений:

- огнестойкость соединений аналогична огнестойкости древесины;
- глубина обугливания на стыках меньше или равна толщине нетронутого огнем поперечного



Рис. 13. Стыковое клеевое соединение ламелей [6]

Рис. 14. Стыковое клеевое соединение ламелей во время испытаний [6]

загрязнение маслом или пылью, движение и вибрация, а также различные виды предварительной обработки торцов соединяемых поверхностей.

Леманн [12] провел семь серий испытаний с более чем 250 испытательными образцами и окончательно определил статистически достоверные значения прочности на растяжение и на изгиб для стыкового клеевого соединения панелей CLT. Испытания позволили понять влияние изменений влажности и долговременных напряжений на прочность таких соединений на изгиб. Этот параметр определяли в четырехточечных испытаниях на изгиб с различны-

Среднее значение разрушающего напряжения [Н / мм<sup>2</sup>]

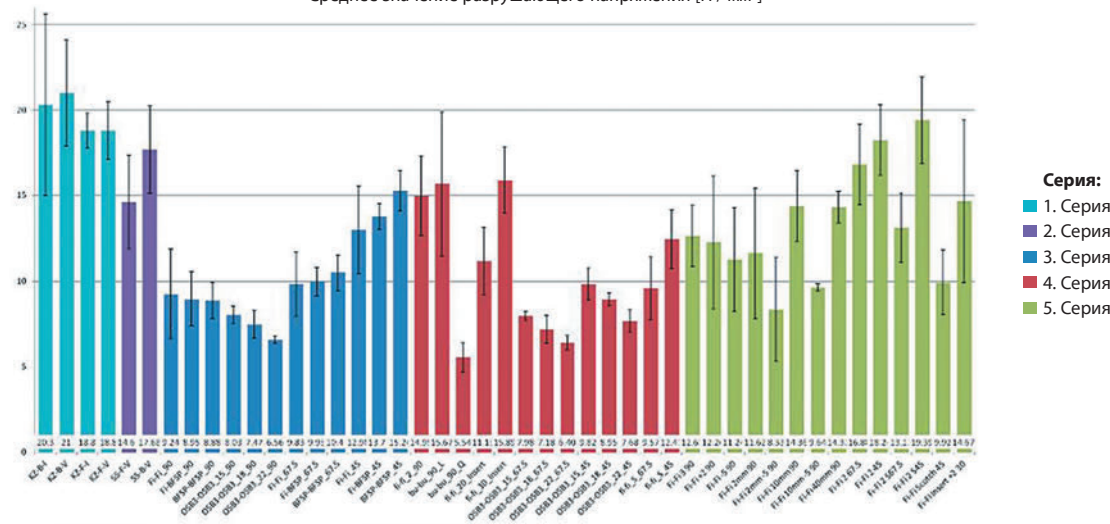


Рис. 15. Результаты испытаний на растяжение

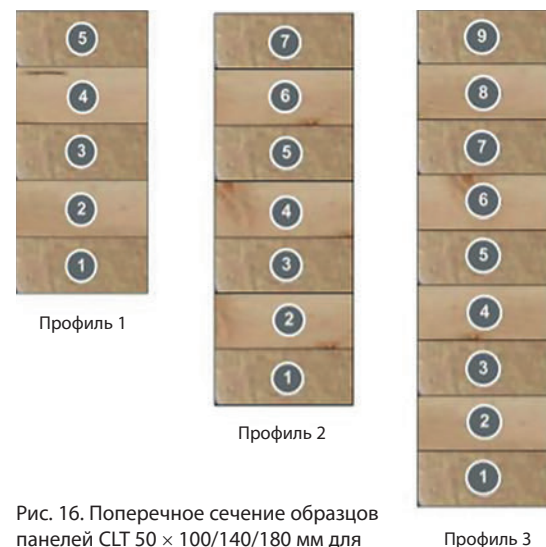


Рис. 16. Поперечное сечение образцов панелей CLT 50 × 100/140/180 мм для испытаний на изгиб

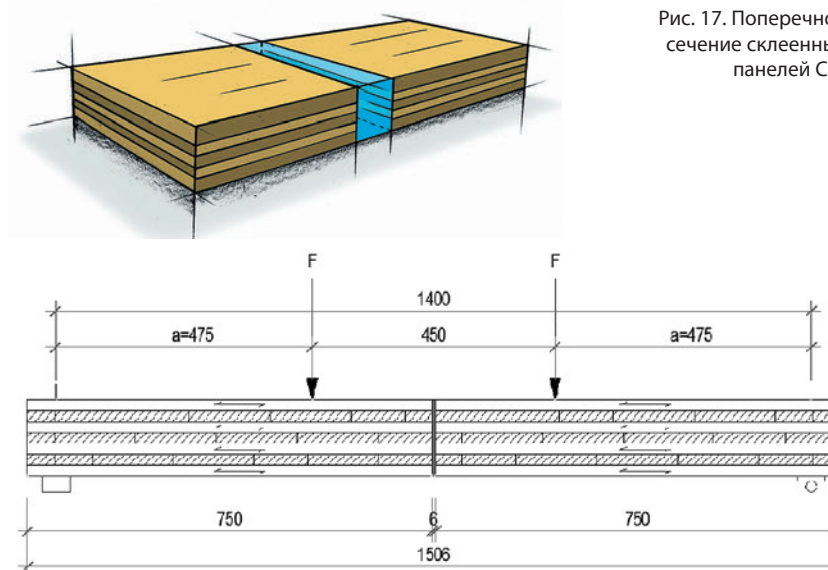


Рис. 17. Поперечное сечение склеенных панелей CLT

сечения образцов, изготовленных из еловых панелей CLT или буковой фанеры. Степень влияния на соединения увеличивается с продолжительностью воздействия огня и толщиной соединения;

– результаты испытания для различных толщин швов и скорости обугливания образцов приведены ниже.

Чтобы проверить общую работу конструкционной системы перекрытий в целом, было проведено крупномасштабное испытание на огнестойкость с

асимметрично нагруженной плитой CLT на горизонтальной печи в лаборатории EMPA (Дюбендорф). Плита CLT имела размеры 5,35 × 2,85 × 0,2 м и была изготовлена из четырех элементов CLT с тремя стыковыми клеевыми соединениями.

Во время испытания на огнестойкость образец был закреплен как простая балка и нагружен постоянной нагрузкой 4 × 8 кН в трех точках. Уровень нагрузки для пожаробезопасной конструкции был рассчитан в соответствии со швейцарскими стан-

Рис. 18. Четырехточечные испытания на изгиб CLT-балок со стыковым клеевым соединением в средней части образца



Рис. 19. Испытания на изгиб длительной нагрузкой CLT-балок со стыковым клеевым соединением в средней части образца

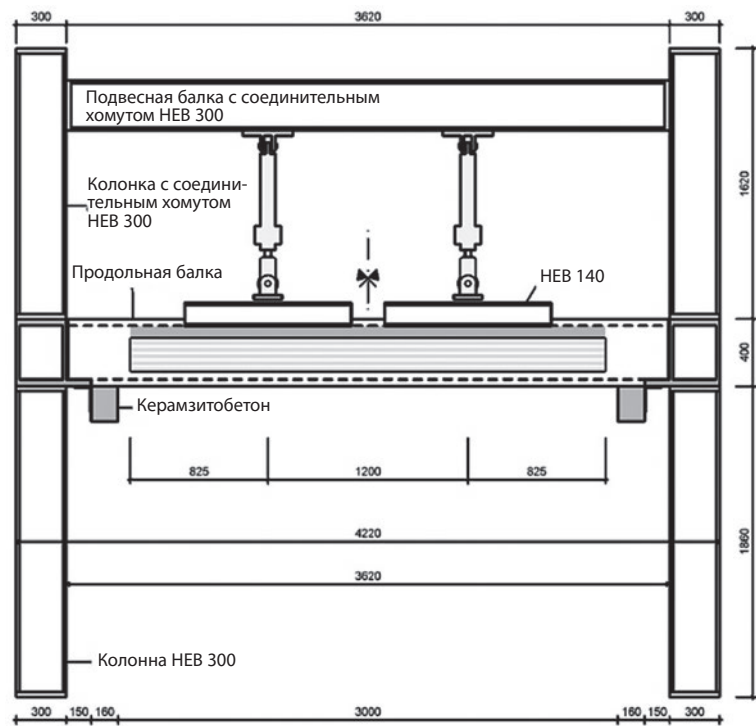


Рис. 20. Испытательная установка для испытаний CLT-балок на изгиб

Обзор результатов	Серия 1	Серия 2	Серия 3	Серия 4	Серия 5	Серия 6	Серия 7	Эталонные значения
Пенообразование [1–3]	0,7	0,56	0,7	0,9	0,5	0,63	0,94	1
Процент разрушения компонентов [%]	2,34	2,13	2,27	4,13	0,53	0,53	2,77	0,20
Процент нарушения адгезии [%]	16,48	19,02	18,80	18,59	17,86	15,97	17,10	4,60
Доля потери сцепления [%]	81,17	78,86	78,93	77,28	81,55	84,53	80,10	95,230
Среднее значение разрушающего напряжения [Н / мм <sup>2</sup> ]	25,69	22,2	24,69	21,10	20,22	19,92	21,26	16,60
Стандартное отклонение [Н / мм <sup>2</sup> ]	3,67	3,09	3,43	2,5	2,0	2,57	2,92	5,20
Коэффициент вариации [Н / мм <sup>2</sup> ]	14,3	13,9	13,89	11,89	16,68	12,89	13,75	31,25
Нормативное значение [Н / мм <sup>2</sup> ]	20,77	17,00	18,52	16,62	16,68	15,65	16,35	12,16
Расчетное значение [Н / мм <sup>2</sup> ]	9,10	7,94	8,64	7,74	7,79	7,31	7,63	5,67

Таблица 2. Результаты испытаний CLT-балок на изгиб





дартами SIA 260 и SIA 261 для офисного здания с учетом пролета 8 м и двухосной работы плиты CLT. Температуру регистрировали термодатчиками на поверхности, между слоями плит CLT и в стыке. Кроме того, измерялись вертикальная деформация и нагрузка.

Основные итоги крупномасштабных испытаний на огнестойкость состоят в следующем:

- плита CLT со стыковыми клеевыми соединениями достигла предела огнестойкости через 69 минут;
- плита CLT вышла из строя из-за хрупкого разрушения стыкового клеевого соединения.

### ПОДТВЕРЖДЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ КОНЦЕПЦИИ

В 2015 году в Туне (Швейцария) был построен многоэтажный многоквартирный дом из древесины по технологии «Деревянные конструкции 3.0».

### БУДУЩИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для дальнейшего развития инновационной технологии недавно был утвержден исследователь-

Рис. 21. Установка для испытания на огнестойкость (поперечное сечение)

Еловые панели CLT	6-мм соединение	$\beta_0 = 0.59$ мм/мин
		$\beta_{\text{Слой 2}} = 0.77$ мм/мин
Еловые панели CLT	12-мм соединение	$\beta_0 = 0.52$ мм/мин
		$\beta_{\text{Слой 2}} = 0.53$ мм/мин
Буковая фанера	6-мм соединение	$\beta_0 = 0.66$ мм/мин
		$\beta_{\text{Слой 2}} = 1.07$ мм/мин
Буковая фанера	12-мм соединение	$\beta_0 = 0.66$ мм/мин
		$\beta_{\text{Слой 2}} = 0.78$ мм/мин

Таблица 3: Результаты маломасштабных испытаний на огнестойкость образцов из еловых панелей CLT и буковой фанеры

### НАУЧНЫЕ ПАРТНЕРЫ КОМПАНИИ:

Timbatec Holzbauingenieure Schweiz AG и Timber Structures 3.0 AG (Штефан Зеллиг), Berner Fachhochschule BFH Biel (Штеффен Франке, Андреас Мюллер), ETH Zurich (Андреа Франги), Purbond AG из группы Henkel (Кристиан Лерингер), Schilliger Holz AG (Эрнест Шиллигер и Вернер Лейбундгут).



Рис. 22. Соединение элементов CLT для крупномасштабного испытания на огнестойкость



Рис. 23. Маломасштабное испытание на огнестойкость еловой плиты CLT после удаления обуглившегося слоя

Рис. 24. Изменение температуры на плите CLT в разных местах во время крупномасштабного испытания на огнестойкость

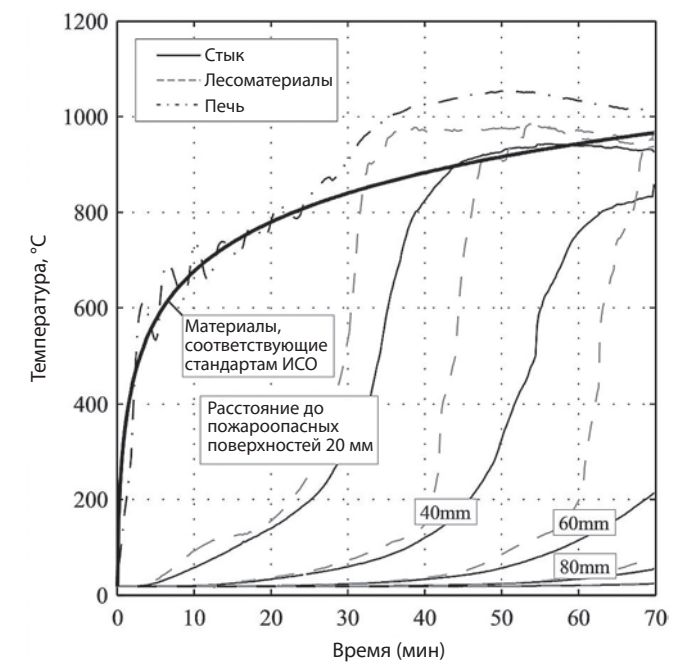


Рис. 26. Плоская плита перекрытия «Деревянные конструкции 3.0»



Рис. 25. Строительная площадка многоэтажного здания в Туне, Швейцария

ский проект стоимостью 1,3 миллиона швейцарских франков. Завершение исследований начатых в 2016 г., планируется завершить в 2019 году.

### ВЫВОДЫ

Технология «Деревянные конструкции 3.0» знаменует собой начало совершенно нового образа мышления и подхода к проектированию деревянных конструкций. Новая технология открывает широкие возможности для ее использования в исследованиях, технологических процессах и на рынке. ■

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

- [1] Boccadoro L.: Experimentelle Untersuchungen zum Durchstanzen von Holzdecken. Master Thesis, ETH(,) Zürich, Institut für Baustatik und Konstruktion, 2012.
- [2] Bühlmann A.: Brandverhalten von stirnseitig verklebten Brettsperrholzplatten. Master Thesis, ETH Zürich, Institut für Baustatik und Konstruktion, 2014.
- [3] Zöllig S.: Geschossdecken für Gewerbe und Industrie, Machbarkeitsstudie – Schlussbericht. BAFU Aktionsplan Holz 2009. Timbatec AG, Thun, 2009.
- [4] Zöllig S.: Geschossdecken für Gewerbe und Industrie – Schlussbericht BAFU Aktionsplan Holz 2012. Timbatec AG, Thun, 2012.
- [5] Grüter B.: Untersuchungen zum Tragverhalten von Holzplatten aus Buche. Master Thesis, ETH Zürich, Institut für Baustatik und Konstruktion, 2013.
- [6] Schwalder A.: Untersuchungen zu baustellentauglichen Verbindungen mittels Hirnholzverklebungen im Holzbau. Berner Fachhochschule, Architektur Holz und Bau, Biel, 2013.
- [7] Füllemann, U.: Untersuchungen ausgewählter Parameter von stirnseitigen Holzverklebungen. Berner Fachhochschule, Architektur Holz und Bau, Biel, 2014.
- [8] Geck, M., & Passerini, S.: Erarbeitung eines Delaminierungsprüfverfahrens für stumpfe, stirnseitige Kebstoffverbindungen. Berner Fachhochschule, Architektur Holz und Bau, Biel, 2014.
- [9] Koelman, T.: Untersuchungen zu stirnseitig verklebten Bauteilen mit Biegebeanspruchung im Holzbau. Berner Fachhochschule, Architektur Holz und Bau, Biel, 2014.
- [10] Kunz, F.: Untersuchungen zur stirnseitigen Verklebung von Holzbauteilen. Berner Fachhochschule, Architektur Holz und Bau, Biel, 2015.
- [11] Angehrn, D.: Tragverhalten von stirnseitig verklebten Brettsperrholzplatten. Master Thesis, ETH Zürich, Institut für Baustatik und Konstruktion, 2015.
- [12] Lehmann, T.: Ermitteln von Bemessungswerten für tragende stirnseitige Verklebung mit Biegebeanspruchung im Holzbau. Berner Fachhochschule, Architektur Holz und Bau, Biel, 2015.
- [13] Klingsch E., Klippel M., Boccadoro L., Frangi A., Fire tests on cross-laminated timber slabs and concrete-timber composite slabs, Test report, Institute of Structural Engineering, ETH Zurich, 2016.



more with less.” Making the enclosure structurally active, rather than dead weight, is something we need to do.

The next step in the evolution of this study will be to build real prototypes and test them for economical manufacture and actual installation. The different patterns of effective structural cladding illustrated in this study provides a basis for an expectation that the approach will be applicable to a range of building types and will be flexible, affording freedom in support of the designer’s particular intentions and desires.

#### ACKNOWLEDGMENTS

Structural design and analysis for the three studies represented here by Simon Shim, PE, Senior Associate at HOK, NY.

Architectural design and renderings for the latest Structural Skin study by Michael Miller, designer at HOK, NY.

Architectural design and renderings for the Structural eXterior Enclosure entry to the Metals In Construction 2017 competition by Michael Miller, Zifan Liu, and Zhenhuan Xu, designers at HOK, NY. LEED analysis and thermal modeling by Apoorv Goyal, Sustainability Specialist at HOK, NY.

Support for the three studies represented here was generously provided by Matt Breidenthal, Regional Leader of Engineering, HOK.

#### REFERENCES

Fuller, Buckminster. Nine Chains to the Moon. Anchor Books. 1971. (Orig. 1938).

Cossutta, Aldo. “From Precast Concrete to Integral Architecture”. Progressive Architecture, October 1966.

Neary, John. “Structural Skin: Integrating Structure and Cladding,” Façade Tectonics Institute, October 2016.

Neary, John and HOK team, “Structural eXterior Enclosure,” Finalist, Metals In Construction 2017 “Reimagine Structure” competition. Metals In Construction Magazine, Spring 2017.

Gordon, J. E. Structures, or Why Things Don’t Fall Down. Penguin Books. 1978.

#### FIGURES:

**Figure 10:** Tower Massing with initial full array of bracing, study for optimized bracing pattern (HOK).

**Figure 11:** Tower View, speculative urban site at Bryant Park, NYC (HOK).

**Figure 12:** Load distribution diagrams for braced frame and braced frame with structural cladding (HOK).

**Figure 13:** Structural panel prototypes and lateral resistance comparison (HOK).

**Figure 14:** Typical panels, left. Typical tower floor, center. Stress and strain diagram of braced panel, right. (HOK).

**Figure 15:** Typical panels, structural with X-bracing, non-structural with bay-window glass (HOK).

**Figure 16:** Typical panels Plan, Section, Elevation.

**Figure 17:** Typical Structural Panel. View (HOK).

**Figure 18:** Typical Non-Structural Units. View (HOK).

**Figure 19:** Structural Bay Connection Study. Structural components (steel) are in red (HOK).

**Figure 20:** Structural Skin Pattern Studies

**Figure 21:** Stiffness Comparison Graph

**Figure 22:** Tonnage Ratio Comparison Chart

**Figure 23:** Lifecycle Cost Analysis

**Figure 24:** Scheme 1 CB Frame only, Baseline (HOK).

**Figure 26:** Scheme 3 Full CB Frame with Partial Clad (HOK).

**Figure 27:** Scheme 4 Full CB Frame with full X Partial Clad (HOK).

**Figure 28:** Scheme 5 Full CB Frame with partial X Partial Clad (HOK).

**Figure 29:** Scheme 6 Full CB Frame with stripe pattern Partial Clad (HOK).

**Figure 30:** Scheme 7 Full CB Frame with random pattern Partial Clad (HOK). ■

#### INNOVATION

### Towards a Post-Fossil Architecture (p. 112)

**MATERIALS PROVIDED BY JOM ARCHITEKTEN**  
**TEXT: STEFAN OESCHGER, STEFAN ZÖLLIG, ANDREA FRANGI, STEFFEN FRANKE, MARCEL MUSTER**

**The Swiss population has decided to become more energy independent and to reduce greenhouse gas emissions by 2050. A large part of the implementation of these goals falls on buildings. At least 40-60% of the total resource consumption depends on the real estate sector. This tells us architects and developers that we should look into it! But today, discussions about the future are primarily about technology - hardly about design, form and material. As young Swiss architects, we wondered whether the sustainability goals could be form-generating? JOM Architekten’s specialists summarized their findings on the implementation of post-fossil architecture and developed a future-orientated design for a wooden high-rise building.**

**The innovation proposed by JOM Architekten is called - Timber Structures 3.0 and this is a completely new technology that allows creating thin, high-performance wood structures that can withstand multiaxial stress.**

**Keywords:** butt-joint bonding, biaxial load bearing, timber flat slab, CLT

#### POST-FOSSIL ARCHITECTURE

Last year, at the lecture in Eka-therinburg Stefan Oeschger, Partner & Co-Founder of JOM Architekten talked about the ten points for a post-fossil architecture and illustrate them with examples from JOM Architects. He focused on wooden constructions, as he believes that one day this will be of great importance for Russia.

1) In principle, there is agreement: within a few decades, human civilization consumes energy sources that have been stored under the earth’s surface over millions of years - and thereby causes climate change.

2) It would be a laugh if architecture could contribute absolutely nothing to a halt to global warming. Currently, oil flows into facade insulation, natural gas into brick furnaces, and hard coal burns the cement. Cement manufacturing alone accounts for more than five percent of global CO<sub>2</sub> emissions - a figure at least twice as high as global air traffic.

3) No more fossil fuels in houses: Neither in operation nor in the construction process or in the manufacture of building materials - this paradigm shift is unavoidable!

4) It is obvious to build with materials that re-grow or circulate in cycles. Constructive joints of the future are plugged, clamped and screwed - not nailed, mortared or casted.

5) No architect can seriously oppose fossil-free building components. Because what

does not yet exist can be re-designed: A tectonics for load-bearing systems made of laminated timber, a knot logic for corner joints made of recycled steel, the right shape for balcony railings made of printed recycled polymers - and much more!

6) It is foreseeable that machine prefabrication and craftsmanship will converge. The construction site becomes an assembly site and thus the joining becomes an architectural means of expression.

7) No one will resist a path to attractive post-fossil architecture if it remains open. It will provide a variety of witty answers that are not derived from regulations and standards manuals. There are unprecedentedly powerful planning tools available. From dynamic sun blinds to thermal buffer zones that ensure comfort - simulations will convince

customers and authorities of new design solutions.

8) People will be happy when they again understand how the indoor climate is made and how energy is generated: by varying room heights for pleasant air currents, large structured surfaces for gentle heating and cooling as well as eventful roof landscapes with solar arcades and worlds of plants.

9) Culturally relevant architecture can only arise from the challenges and possibilities of the present. The time is right for post-fossil architecture!

Until today, all known timber building systems allow only slabs with a uniaxial load bearing action. Thereby, in comparison to normal reinforced concrete slabs, timber slabs are often thick, expensive and complicated to build. The reason for this is that there is no efficient connection technology to rigidly connect timber slab elements to each other. Alternative solutions are hybrid structural systems with concrete or steel, however, this combination of materials results in some disadvantages especially in terms of weight, ecology, construction time and costs.

In the framework of a large research project a new timber slab system has been developed and already tested in first real applications. The developed slab system is designed for housing, commercial and industrial buildings. The slab system works as a flat slab carrying vertical loads biaxial and consists of timber slab elements like CLT glued together on site with a high-performance butt-joint bonding technology. Research about the central slab element, the butt-joint bonding and fire tests have already been performed. The research showed the feasibility of this innovation. In 2015 a first prototype was built in Thun, Switzerland. A large three-year research project started 2016 with the goal to reach market maturity.

**INTRODUCTION**  
Since 2009 the Swiss Engineering Company Timbatec, ETH Zurich, BFH Biel, Purbond (Henkel Group) and Schilliger Holz are working together in a project called “Wooden slabs in commercial and industrial buildings”.  
The objective of the project is the development and implementation of a biaxial load carrying timber flat slab based on elements like CLT glued together on site with a high performance butt-joint bonding technology. In the meantime several bachelor and master theses were performed. The results from the research projects are promising: On one hand, it was proved that it is possible to produce timber flat slabs with a column grid up to 8.00 x 8.00 m and a live load of 5 kN/m<sup>2</sup> [3, 4]. This at a comparable cost to normal reinforced concrete flat slabs, but

only with one-fifth of the weight and with barely no CO<sub>2</sub> emissions. On the contrary, a large amount of CO<sub>2</sub> is being stored within the structure. The research project has led to a first prototype ready to be built. Further, the newly developed bonding connection technology opens new fields of application for timber constructions. Timber beams by almost any length or plates of almost any dimension can be produced. For example, rigid walls, floors or shells of any shape can be made. This development is so groundbreaking, that one can speak of a new generation in timber construction.

#### EVOLOGUE OF TIMBER

#### STRUCTURES TIMBER STRUCTURES GENERATION 1.0: TRUNK AND BEAMS

For centuries trunks and beams have been used to build houses. Trees were cut down, branches removed, debarked and sawn to beams and planks to construct buildings.

#### TIMBER STRUCTURES GENERATION 2.0: GLULAM AND CLT

In the 20th century, trees were sawn into boards, dried, planned and glued to glulam or more recently to CLT. With these products a structural beam can be larger and longer than a tree. Also curved structural beams are possible. Massive CLT panels of a size up to around 3.40 m width and 20 m length can be industrially produced today.

#### TIMBER STRUCTURES GENERATION 3.0: BUTT-JOINT BONDING TECHNOLOGY

The current development now allows the butt-joint bonding of fibres and therefore can lead to the 3rd generation in timber, called and patented as Timber Structures 3.0. However, for a wide application of this innovative technique further research is necessary.

#### RECENT RESEARCH OF

**STRUCTURAL SYSTEM**  
The aim of the newly developed technology is to be able to realize typical skeleton buildings with timber as shown in Figure 4, consisting of only glued timber elements, without using fasteners like screws, nails or metal plates.

The main building parts are walls for the lateral structural system and columns and flat slabs for the vertical structural system. The main challenge is the development of a biaxial high-performance load bearing timber slab.

Due to constraints of prefabrication, transportation and assembly processes, it is essential to divide any type of floor plans into slab elements in an efficient way. In a parametric study the typical floor plan shown below has been found to be most suitable. The green elements

should transfer the load biaxial to the uniaxial load bearing red elements which transfer the load to the central elements marked in blue around the columns. The blue elements are similar to the reinforced concrete flat slabs subjected to high bending moments and shear forces.

#### CENTRAL COLUMN SLAB ELEMENTS

A fundamental static issue is the highly stressed area around the column and how a reinforcement of the central slab elements against punching of the column is possible. Boccadoro made a theoretical analysis and tested 6 different layer constructions in 1:1 scale for verification [1]. Main material for the central slab elements was LVL made of beech, which has very good mechanical properties compared to common softwood. Six specimens were tested for punching at ETH Zurich: Three homogeneous massive plates made of beech plywood and three hybrid plates made of beech plywood and common spruce boards. The plate thickness was 240 mm, 320 mm and 400 mm. A basic study showed the benefit of the beech plywood based material in terms of bending and shear strengths. With simple static models at first hand and later on using a FE-program the expected load carrying capacity of the central slab elements was estimated. Then, six central slab elements of 2.5 x 2.5 x 0.24, 0.32 and 0.40 m were tested on the strong floor at the ETH Zurich. The slab elements were loaded by a centrally located cylinder to simulate the effect of the introduction of force into the slab. The specimens failed at forces between 1’150-3’100 kN. These values are very high and show the great potential of the mechanical properties of the slab elements made of beech LVL.

The crucial part of the evaluation was the analysis of the observed very ductile behaviour of the beech plywood slab elements, which is rather exceptional in timber construction as timber usually behaves in a brittle manner. This ductile behaviour can be explained with the hypothesis of stress redistribution in the width and partially in the height of the cross-section. While the cracks grow outward, the central area of the board is relieved progressively, and the bending stresses are transferred to the outer area of the element. At the homogeneous specimens, the plateau of maximum force is more distinct compared to the one in the hybrid specimens [1,5].

Due to constraints of prefabrication, transportation and assembly processes, it is essential to divide any type of floor plans into slab elements in an efficient way. In a parametric study the typical floor plan shown below has been found to be most suitable. The green elements

should transfer the load biaxial to the uniaxial load bearing red elements which transfer the load to the central elements marked in blue around the columns. The blue elements are similar to the reinforced concrete flat slabs subjected to high bending moments and shear forces.

Due to constraints of prefabrication, transportation and assembly processes, it is essential to divide any type of floor plans into slab elements in an efficient way. In a parametric study the typical floor plan shown below has been found to be most suitable. The green elements

#### BUTT-JOINT BONDING

To connect the slab elements to each other, various methods were evaluated. Geometric form-fitting such as a terracing or tongue and groove would lead to expensive machining time and massive con-

sumption of material through the double plate surface in the connecting area.

Due to the transverse tensile stresses at the terracing, the plates would have to be provided with additional reinforcements. Finger joints are susceptible to damage and carry low tensile stresses perpendicular to grain if they are arranged carelessly. Therefore a bonded butt joint technology was envisaged. So far, no certified adhesives exist on the market for directly bonded butt joints.

Purbond AG, part of the Henkel Group, has developed a 2-component Polyurethane adhesive which can be used for the required purposes.

In the first development, various geometries of bonded joints were examined. The simplest geometry to be produced was the butt joint, but also different profiles as v-rabbits and finger joints were examined [6].

In various experimental tests it was studied which thickness of joints could be filled taking into account for different circumstances such as different temperatures or joint widths. Over 1’000 tensile tests on lamellas in 17 series have been carried out [6,7,8,9,10,11,12]. The filling procedure from below is very important, so that any air bubble moves to the top and no air pockets are created.

From these tests, important conditions and requirements for quality assurance were established. Fülleemann [7] further examined different influences on building site:

Minimum joint thickness, temperature, moisture content, soiling with oil or dust, movement and vibrations and different types of pretreatment of the connecting end-grain faces.

Lehmann [12] finally determined by seven series of tests with totally over 250 test specimens statistically reliable strength values for the tensile and bending strength of a bonded butt joint of CLT-plates. The tests allowed further a better understanding of the influence of moisture changes and the effects of long-term stresses on the bending strength of the bonded butt joint. The bending strength was determined in four-point bending tests, with different variations of geometry, wood moisture and load duration.

The results of studies showed a consistent good quality of the bonded butt joint. Through this progress, characteristic bending strengths from 15.6 N/mm<sup>2</sup> to 20.7 N/mm<sup>2</sup> were achieved.

These values are higher than all strength values reached before. The studies on the influence of moisture showed that an increased moisture content of the wood lead as expected to a reduction of the bending strength. In addition, it was recognized that the moisture content depends on the cutting direction

and the positioning of the boards in the test specimen and the flow of moisture into the wood is mainly problematic in the lateral zones. In the studies about the effects of a long-term loading no significant change in strength was observed.

#### FIRE TESTS

In the master thesis of Bühlmann [2] small-scale and large-scale fire tests on butt bonded plywood and CLTplates were performed (see also [13]).

Six small-scale fire tests were carried out with four different bonded butt joints each. The specimens made out of beech plywood and spruce CLT had the dimensions of 1.2m x 0.9m and had each two 6mm and 12mm wide joints. The test specimens were exposed to ISO standard fire curve for 30, 60 and 90 minutes on one side. With thermocouples temperatures were recorded in the joints.

After the fire test the char layer was removed and the charring depth was determined.

Thus the following main conclusions on the fire behavior of the bonded butt joints can be made:

- The fire behaviour of the joints is similar to the fire behaviour of timber.

- The depth of charring in the joints is equal or less than for the residual cross-section of the specimens made of spruce CLT or beech plywood. The influence of the joint increases with the duration of the fire and the joint thickness.

- For the different joint thicknesses and specimens charring rates could be determined as follows:

In order to verify the overall global structural behavior of the slab system, a large-scale fire test with a loaded CLT asymmetric plate was carried out on the horizontal furnace at EMPA in Dübendorf. The CLT plate had the dimensions of 5.35 x 2.85 x 0.2m and was manufactured of four CLT elements with three bonded butt joints.

The specimen was supported as a simple beam and loaded during the fire test with a constant load of 4 x 8 kN in the third points. The load level for the fire design was calculated according to Swiss Standards SIA 260 and SIA

261 for an office building taking into account a span of 8m and a biaxial action of the CLT plate. The temperature was recorded with thermocouples on the surface, between the layers of the CLT plates and in the joint. In addition, the vertical deformation and the load were measured.

The main results of the large-scale fire tests can be summarized as follows:

- The CLT-plate with bonded butt joints reached a fire resistance of 69 minutes.

- The CLT-plate failed due to brittle failure of the bonded butt joint.



**Founder**  
Skyline media, Ltd  
featuring GORPROJECT,  
CJSC

**Consultants:**  
Sergey Lakhman  
Vladimir Travush  
Philip Nikandrov  
Nadezhda Burkova  
Yuri Sofronov  
Tatiana Pechenaya  
Elena Zaitseva  
Alexander Borisov

**Editor-in-Chief**  
Irina Amirejibi

**Redactor**  
Elena Domnenko

**Executive Director**  
Sergey Sheleshnev

**Corrector of press**  
Elena Bodrova

**Designer**  
Svetlana Zimina

**Contributions made by:**  
Marianna Maevskaya  
Alexey Lyubimkin  
Olga Nikolaeva

**Advertising Department**  
Tel. +7 495 909-39-39 #342

**Distribution Department**  
Svetlana Bogomolova  
Vladimir Nikonov  
Tel. +7 495 909-39-39 #343

The address:  
5, bld. 5A, Nizhny Susalny Pereulok,  
Moscow, Russia 105064

Tel. +7 495 909 39 39 #342, 343  
www.tallbuildings.ru  
E-mail: info@tallbuildings.ru

All materials contained this issue are protected by Russian copyright law and may not be published without the prior publisher's permission and reference to it. Publisher is not liable for matters beyond its reasonable control.

Tall Buildings Magazine is registered in the Russian Federal Surveillance Service for Compliance with the Law in Mass Communication and Cultural Heritage

Protection Registration № ФС77-25912 as of October 6, 2006.

The magazine is printed in the PA "Periodika", Ltd, Gardnerovskiy Pereulok 3, bld. 4  
Open price Circulation: 5000

#### PROOF OF THE CONCEPT

A multi-storey apartment house was built with the Timber Structures 3.0 technology in Thun, Switzerland in 2015.

#### FUTURE RESEARCH

For the further development of the innovative technology a 1.3 Million CHF research project has recently been approved. It will be carried out from 2016 to 2019.

#### CONCLUSIONS

The Timber Structures 3.0 technology marks the start into a completely new way of thinking and designing timber structures. The novel technology opens a wide field of new applications in research, technology and markets.

#### RESEARCH PARTNERS

**Research Partners:** Timbatec Holzbauingenieure Schweiz AG and Timber Structures 3.0 AG (Stefan Zöllig), Berner Fachhochschule BFH Biel (Steffen Franke, Andreas Müller), ETH Zurich (Andrea Frangi), Purbond AG of the Henkel Group (Christian Lehringer), Schilliger Holz AG (Ernest Schilliger and Werner Leibundgut).

#### REFERENCES

- [1] Boccadoro L.: Experimentelle Untersuchungen zum Durchstanzen von Holzdecken. Master Thesis, ETH Zurich, Institut für Baustatik und Konstruktion, 2012.
- [2] Bühlmann A.: Brandverhalten von stirnseitig verklebten Brettsperrholzplatten. Master Thesis, ETH Zurich, Institut für Baustatik und Konstruktion, 2014.
- [3] Zöllig S.: Geschossdecken für Gewerbe und Industrie, Machbarkeitsstudie – Schlussbericht BAFU Aktionsplan Holz 2009. Timbatec AG, Thun, 2009.
- [4] Zöllig S.: Geschossdecken für Gewerbe und Industrie – Schlussbericht BAFU Aktionsplan Holz 2012. Timbatec AG, Thun, 2012.
- [5] Grüter B.: Untersuchungen zum Tragverhalten von Holzplatten aus Buche. Master Thesis, ETH

Zürich, Institut für Baustatik und Konstruktion, 2013.

[6] Schawalder A.: Untersuchungen zu baustellentauglichen Verbindungen mittels Hirnholzverklebungen im Holzbau. Berner Fachhochschule, Architektur Holz und Bau, Biel, 2013.

[7] Füllemann, U.: Untersuchungen ausgewählter Parameter von stirnseitigen Holzverklebungen. Berner Fachhochschule, Architektur Holz und Bau, Biel, 2014.

[8] Geck, M., & Passerini, S.: Erarbeitung eines Delaminierungsprüfverfahrens für stumpfe, stirnseitige Kebstoffverbindungen. Berner Fachhochschule, Architektur Holz und Bau, Biel, 2014.

[9] Koelman, T.: Untersuchungen zu stirnseitig verklebten Bauteilen mit Biegebeanspruchung im Holzbau. Berner Fachhochschule, Architektur Holz und Bau, Biel, 2014.

[10] Kunz, F.: Untersuchungen zur stirnseitigen Verklebung von Holzbauteilen. Berner Fachhochschule, Architektur Holz und Bau, Biel, 2015.

[11] Angehrn, D.: Tragverhalten von stirnseitig verklebten Brettsperrholzplatten. Master Thesis, ETH Zurich, Institut für Baustatik und Konstruktion, 2015.

[12] Lehmann, T.: Ermitteln von Bemessungswerten für tragende stirnseitige Verklebung mit Biegebeanspruchung im Holzbau. Berner Fachhochschule, Architektur Holz und Bau, Biel, 2015.

[13] Klingsch E., Klippel M., Boccadoro L., Frangi A., Fire tests on cross-laminated timber slabs and concrete-timber composite slabs, Test report, Institute of Structural Engineering, ETH Zurich, 2016.

#### ILLUSTRATIONS:

**Figure 1:** Timber Structures 1.0: Trunks and beams

**Figure 2:** Timber Structures 2.0: Glulam and CLT

**Figure 3:** Timber Structures 3.0: Butt-joint bonding technology

**Figure 4:** Typical skeleton structure  
**Figure 5:** Floor plan

**Figure 6:** Central slab element on top of a column

**Figure 7:** Central column slab element tested at ETH Zurich for punching (hybrid specimen)

**Figure 8:** Test set-up of a central column slab element

**Figure 9:** Testing a central slab element at ETH Zurich

**Figure 10:** Ductile behaviour of central slab element F240

**Figure 11:** Ductile behaviour of central slab element K400

**Figure 12:** How to connect slab elements?

**Figure 13:** Butt-joint bonding of lamellas [6]

**Figure 14:** Butt-joint bonding of lamellas while testing [6]

**Figure 15:** Results of tensile tests

**Figure 16:** End-grain bonding of CLT-plates

**Figure 17:** CLT cross-sections 50 x 100 / 140 / 180 mm for bending tests

**Figure 18:** Four point bending tests on CLT-beams with bonded butt joint in the middle span of the specimen

**Figure 19:** Long-term load bending tests on CLT-beams with bonded butt joint in the middle span of the specimen

**Figure 20:** Test set-up for bending tests on CLT-beams

**Figure 21:** Small-scale fire test on spruce CLT-plate after removing the char layer

**Figure 22:** Bonding of CLT elements for the large-scale fire test

**Figure 23:** Test set-up for the fire test (longitudinal section)

**Figure 24:** Test set-up for the fire test (cross-section)

**Figure 25:** Temperature development in the CLT plate at different locations during the large-scale fire test

**Figure 26:** Building site of a multi-storey building Thun, Switzerland

**Figure 27:** Timber Structures 3.0 flat slab

**Table 1:** Results from punching shear tests on central slab elements

**Table 2:** Results of the bending tests on CLT-beams

**Table 3:** Results of the small-scale fire tests on specimens made of spruce CLT and beech plywood ■

**Уважаемые читатели! У вас есть возможность оформить подписку на журнал «Высотные здания»/ Tall buildings.**

1. Подписной индекс 36834 в каталоге Агенства «Роспечать»
2. По каталогу ГК «Урал-Пресс» на сайте <http://ural-press.ru>
3. Юридические лица могут оформить подписку на сайте <http://tallbuildings.ru>

Журнал распространяется среди руководителей российского и столичного строительных комплексов, ведущих специалистов инвестиционных, девелоперских, архитектурных и проектных компаний России и Москвы, на всех мероприятиях, посвященных вопросам проектирования, строительства и управления зелеными зданиями (выставки, конференции, семинары, круглые столы и т.п.).

Tall Buildings  
**ВЫСОТНЫЕ**  
ЗДАНИЯ