



ИННОВАЦИИ В ДЕРЕВЯННОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ



Материалы 12-й Международной научно-технической конференции

20–21 апреля 2023 года

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ, 2023

ИННОВАЦИИ В ДЕРЕВЯННОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ
Материалы 12-й Международной научно-технической конференции



2023

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации

Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет

ИННОВАЦИИ В ДЕРЕВЯННОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Материалы 12-й Международной
научно-технической конференции

20–21 апреля 2023 года

Санкт-Петербург
2023

УДК 694.1:005.591.6

Рецензенты:

канд. техн. наук, генеральный директор *С. Е. Кирютина*
(ООО «Сертификация домов, материалов и комплектующих»);

д-р техн. наук, профессор *Ю. А. Беленцов* (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I)

Инновации в деревянном строительстве : Материалы 12-й Международной научно-технической конференции [20–21 апреля 2023 года] / Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. – Санкт-Петербург : СПбГАСУ, 2023. – 285 с. – Текст : непосредственный.

ISBN 978-5-9227-1326-9

Представлены статьи участников 12-й Международной научно-технической конференции «Инновации в деревянном строительстве», прошедшей в Санкт-Петербургском государственном архитектурно-строительном университете 20–21 апреля 2023 года.

Публикации посвящены анализу нормативно-технических документов, исследованию и испытанию современных строительных материалов на основе древесины. Все материалы научно-исследовательских работ прошли объективное экспертное обсуждение на конференции и рецензирование редакционной коллегией.

Редакционная коллегия:

д-р техн. наук, профессор, завкафедрой *А. Г. Черных* (председатель);

канд. техн. наук, доцент *А. Б. Шмидт*;

канд. техн. наук, доцент *П. С. Коваль*;

канд. техн. наук, доцент *Е. В. Данилов*;

канд. техн. наук, доцент *Т. Н. Казакевич* (ответственный секретарь)

Печатается по решению Научно-технического совета СПбГАСУ

ISBN 978-5-9227-1326-9

© Авторы статей, 2023

© Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2023





УДК 69

Александр Григорьевич Черных,
д-р техн. наук, профессор
Дмитрий Игоревич Корольков,
аспирант
Абдессалам Букелиа,
студент
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет)
E-mail: chagrig@spbgasu.ru,
korol9520@yandex.ru

Alexander Grigoryevich Chernykh,
Dr. Sci. Tech., Professor
Dmitriy Igorevich Korolkov,
postgraduate student
Abdessalam Boukelia,
student
(Saint Petersburg State University
of Architecture and Civil Engineering)
E-mail: chagrig@spbgasu.ru,
korol9520@yandex.ru

ОБЗОР И АНАЛИЗ ЗАРУБЕЖНЫХ МОДЕЛЕЙ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

REVIEW AND ANALYSIS OF FOREIGN MODELS OF DAMAGE ACCUMULATION IN WOODEN STRUCTURES

Явление ползучести, т. е. зависящее от времени увеличение деформации материала при постоянном напряжении, является важной характеристикой, поскольку оно может привести к разрушению конструкции в виде чрезмерной деформации или, что еще хуже, разрушения. В литературе ползучесть древесины обычно называют эффектом «длительности нагрузки» на время до разрушения при постоянной нагрузке.

Модели, используемые для характеристики деформации или времени до разрушения, предназначены для предоставления математического описания поведения для заданных условий окружающей среды и диапазона условий нагружения, чтобы можно было предсказать долгосрочное поведение различных деревянных конструкций.

В данной работе представлен обзор зарубежной литературы в области продолжительности действия нагрузки и явления ползучести древесины. Анализ моделей накопления повреждений выполнялся с целью понимания современного уровня состояния вопроса по прогнозированию долговечности конструкций на основе инженерной древесины.

Ключевые слова: накопление повреждений, деревянные конструкции, ползучесть, коэффициенты длительности нагружения, энергия деформации.

Creep phenomenon, i.e. the time-dependent increase in material strain under constant stress is an important characteristic because it can lead to failure of the structure in the form of excessive strain, or worse, failure. In the literature, the creep of wood is commonly referred to as the “duration of load” effect on the time to failure under constant load.

Models used to characterize deformation or time to failure are intended to provide a mathematical description of the behavior for given environmental conditions and a range of loading conditions so that the long-term behavior of various timber structures can be predicted.

This paper presents a review of foreign literature in the field of the duration of the load and the phenomenon of wood creep. The analysis of damage accumulation models was carried out in order to understand the current state of the art in predicting the durability of structures based on engineered wood.

Keywords: damage accumulation, wooden structures, creep, load duration factors, strain energy.

Продолжительность нагрузки – явление, которое долгое время озадачивало ученых и инженеров по древесине. Было замечено, что древесина может выдерживать более высокую нагрузку (или напряжение) в течение короткого периода времени, чем в течение длительного периода времени. Связь между приложенным напряжением и временем до отказа называется эффектом продолжительности нагрузки (DOL). Следует предполагать, что эффект DOL вызван не ухудшением состояния, например, связанной с гниением или другой биологической атакой, а скорее явлением само по себе [1]. Одной из отличительных характеристик древесины является то, что на ее кажущуюся прочность влияет интенсивность и продолжительность приложенной нагрузки. Таким образом, важно количественно оценить влияние продолжительности нагрузки, чтобы иметь возможность рассчитать надежность на протяжении всего срока службы конструкции. Применение моделей накопления повреждений и линейной вязкоупругой механики разрушения является хорошо зарекомендовавшим себя инструментом для прогнозирования продолжительности реакции пиломатериалов на нагрузку.

Во второй половине XX века коэффициенты DOL, используемые в нормах допустимого напряжения Канады и США, были основаны на работе Вуда [2] на небольших бездефектных образцах. Коэффициенты DOL применялись для корректировки ряда расчетных напряжений пиломатериалов и других изделий из дерева, а также соединителей для различных условий нагрузки в процессе эксплуатации. Вуд указал, что взаимосвязь между коэффициентом напряжения при изгибе (максимальная кажущаяся прочность на изгиб, деленная на кратковременную прочность) и логарифмом времени, в течение которого прикладывалось напряжение, немного

отличалась для линейной и постоянной нагрузки и была слегка криволинейной. Эмпирическая гиперболическая кривая, известная как «Кривая Мэдисона», была выбрана для соответствия тенденциям долгосрочных данных постоянного нагружения Вуда [2], результатов испытаний на быстрое нагружение и точки удара, установленной Элмендорфом. Горизонтальная асимптота этой гиперболы составляла 18,3 %, уровень отношения напряжений, при котором продолжительность нагружения предполагалась бесконечной.

К началу 1970-х годов имелось множество свидетельств того, что реакция деревянных балок на разрыв при ползучести значительно отличалась от классического случая для небольших чистых образцов, описываемых кривой Мэдисона. В Канаде первое исследование размерных пиломатериалов DOL было проведено Мэдсеном [3, 4], который протестировал номинальный сорт № 2 размером 2 на 6 дюймов. (стандарт 38 на 140 мм) подрубно-еловый пиломатериал под гибку с несколькими ступенчатыми постоянными режимами гибки. Один из выводов Мэдсена заключался в том, что эффект времени сильно зависел от уровня силы. Низкопрочная конструкционная древесина не только имела меньший эффект DOL, чем высокопрочная древесина, но также имела эффект DOL, который был значительно меньше, чем предсказанный по кривой Мэдисона, основанной на небольших прозрачных тестовых образцах. Позже Madsen и Barrett [5] и Foschi и Barrett [6] показали, что соотношение между приложенной постоянной нагрузкой и временем до разрушения для небольших бездефектных образцов отличается от аналогичного соотношения для полноразмерных пиломатериалов.

Вышеупомянутая работа ясно показала, что коэффициенты DOL, предсказанные кривой Мэдисона, были консервативными, и чтобы получить более реалистичный прогноз времени до отказа, внимание переключилось на возможное применение принципов проектирования, основанных на надежности, для оценки надежности деревянных элементов в условиях эксплуатационной нагрузки. В частности, такой подход привел к принятию концепции накопления повреждений. В канадском стандарте CSA O86 фактор DOL был основан на исследовательской работе Foschi в 1989 г. [7], а переменная состояния повреждения α_{30} использовалась для оценки надежности конструкции в конце срока службы 30 лет. В соответствии с процедурами, используемыми в исследовании усталости металла для

прогнозирования количества циклов до разрушения, процесс, ведущий к разрушению древесины, был смоделирован как накопление повреждений [8]. Кумулятивный ущерб, который нас интересует, происходит из поведения материала на микроскопическом уровне. Поскольку знание поведения на этом уровне, как правило, неполно, трудно постулировать соответствующие модели накопления повреждений, основанные на физических законах. В качестве альтернативы были предложены модели кумулятивных повреждений, основанные на нашем понимании явления на макроскопическом уровне и на экспериментальных данных [9]. Отличительным преимуществом модели накопления повреждений является то, что она позволяет прогнозировать повреждения, вызванные произвольной случайной последовательностью нагрузок, и ее удобное использование в форматах проектирования, основанных на надежности. Было зарегистрировано несколько типов моделей накопления повреждений, из которых наиболее важные модели сведены к следующему:

Модель Barrett-Foschi № 1 [10]:

$$\begin{cases} \frac{da}{dt} = a \cdot (\tau - \tau_0)^b \cdot a^c, & \tau > \tau_0 \\ \frac{da}{dt} = 0, & \tau \leq \tau_0 \end{cases} \quad (1)$$

Модель Barrett-Foschi № 2 [10]:

$$\begin{cases} \frac{da}{dt} = a \cdot (\tau - \tau_0)^b + \lambda \cdot \alpha, & \tau > \tau_0 \\ \frac{da}{dt} = 0, & \tau \leq \tau_0 \end{cases} \quad (2)$$

Модель Foschi-Yao [11]:

$$\begin{cases} \frac{da}{dt} = a \cdot (\sigma(t) - \tau_0 \cdot \sigma_s)^b + c \cdot (\sigma(t) - \tau_0 \cdot \sigma_s)^n \cdot \alpha, & \sigma(t) > \tau_0 \cdot \sigma_s \\ \frac{da}{dt} = 0, & \sigma(t) \leq \tau_0 \cdot \sigma_s \end{cases} \quad (3)$$

Модель Gerhards [12]:

$$\frac{da}{dt} = \exp(-a + b \cdot \tau) = \exp(-a + b \cdot \sigma(t) / \sigma_s) \quad (4)$$

Модель Schaffer [13]:

$$\frac{da}{dt} = -\alpha \cdot \exp(-a + b \cdot \sigma(t) / (1 - \alpha)) \quad (5)$$

Во всех моделях α – переменная состояния поврежденности (« $\alpha = 0$ » в неповрежденном состоянии и « $\alpha = 1$ » при разрушении), τ – коэффициент напряжения, определяемый как приложенное напряжение $\sigma(t)$, деленное на кратковременную прочность σ_s (т. е. $\tau = \sigma(t) / \sigma_s$); τ_0 — порог напряжения, ниже которого предполагается, что повреждения не накапливаются, a , b , c , λ и n – параметры модели. Следует отметить, что для одного и того же конструкционного испытательного образца нельзя знать как кратковременную, так и долговременную прочность, поскольку испытательный образец может быть испытан только один раз. Эта проблема обычно решалась с помощью параллельного контроля для оценки краткосрочной прочности образцов для длительных испытаний.

Кривая Мэдисона обычно завышает время до разрушения как для прочности на сдвиг, так и для прочности на изгиб. Это завышение уменьшилось по мере увеличения предполагаемого предела прочности при ползучести. К сожалению, изменения порогового уровня мало повлияли на точность подбора в диапазоне доступных данных [10].

Что касается моделей Barrett-Foschi, то в модели № 1 степень повреждения выражалась как произведение фактора, зависящего от стресса, и фактора, зависящего от повреждения. В модели № 2 степень повреждения была представлена как сумма зависящего от напряжения члена и члена, зависящего от повреждения. В обеих моделях рассматривался порог напряжения, ниже которого скорость повреждения исчезала. Для каждой модели были рассмотрены истории напряжений, соответствующие трем типам испытаний: испытание на ступенчатую функцию нагрузки и испытание на линейную нагрузку, а также комбинацию начальной линейной нагрузки с последующей постоянной нагрузкой. Прогнозы моделей для этих двух случаев использовались для получения параметров модели путем

подгонки к данным испытаний с постоянной и линейной нагрузкой. Используемые данные соответствовали небольшим образцам дугласовой пихты при изгибе. Они также обнаружили, что модель № 2 была более гибкой моделью и лучше соответствовала данным о постоянной нагрузке на сдвиг и изгиб небольших образцов.

Модель Foschi-Yao также постулировала, что повреждение накапливается со скоростью, которая зависит не только от приложенного напряжения $\sigma(t)$, но также и от уже накопленного повреждения a . Это была более реалистичная модель, потому что в некоторых из предыдущих моделей, если повреждение накопилось до значительного уровня, малейшее повреждение продолжало бы расти при отсутствии напряжения, и, следовательно, разрушение материала могло произойти при отсутствии напряжения. Согласно расширенному ряду скорости накопления повреждений,

$$\frac{da}{dt} = F_0(\sigma) + F_1(\sigma) \cdot a + F_1(\sigma) \cdot a^2 + \dots \quad (6)$$

Модель Foschi-Yao использовала член, зависящий от повреждений, до первого порядка. В формулировке модели учитывались истории напряжений, соответствующие трем типам испытаний: испытание линейной нагрузкой, испытание постоянной нагрузкой и испытание истории произвольного нагружения. Модель была откалибрована с использованием данных эксперимента с пиломатериалами болиголова западного при двух постоянных уровнях нагрузки, который проводился Foschi R. O. и Barrett J. D. с 1977 года [6], и модель очень хорошо следовала экспериментальным тенденциям.

В модели Gerhards использовалась модель экспоненциальной степени повреждения (EDRM) для описания продолжительности данных о нагрузке на пиломатериалы при изгибе. Модель использовалась для подгонки экспериментальных данных по рампе и постоянной нагрузке с помощью итеративной нелинейной процедуры наименьших квадратов с повторным взвешиванием. За исключением результатов быстрого линейного изменения, EDRM обеспечил разумную подгонку к данным постоянной нагрузки и линейной нагрузки для пиломатериалов, содержащих краевой сучок. Однако был также сделан вывод о том, что модель, по-видимому, завышала остаточную прочность образцов, выдерживающих постоянную нагрузку.

Следует отметить, что в модели Gerhards скорость накопления повреждений зависит только от приложенного напряжения. Yao F. Z. [9] откалибровал модель Gerhards по тем же данным об изгибе западного болиголова и пришел к выводу, что EDRM был слишком жестким, чтобы отразить тенденцию данных, и что этот факт выявил влияние повреждений, уже накопленных в процессе накопления повреждений. Модель Gerhards не могла соответствовать долгосрочным экспериментальным результатам, поскольку в ней отсутствовал фактор, зависящий от повреждения.

В работе [14] предложили модифицированную модель EDRM, в которой скорость повреждения зависит от нагрузки, температуры и влажности. Соотношение напряжений регулировалось в зависимости от температурно-влажностного режима пиломатериала. Таким образом, дополнительные повреждения были связаны с механическими эффектами, и, таким образом, было изучено влияние изменений содержания влаги на поведение при ползучести.

Laufenberg T. L. [15] проанализировал работы, проведенные в период с 1950-х по 1980-е годы по влиянию продолжительности нагрузки и реологическим свойствам композитных древесно-стружечных плит, и дополнил их новыми экспериментальными данными. Laufenberg T. L. обобщил совместную исследовательскую программу между Лесной службой Министерства сельского хозяйства США, Лабораторией лесных товаров (FPL) в Мэдисоне и Forintek Canada Corp. в Ванкувере (теперь FP Innovations). Эта исследовательская программа предоставила подробную информацию о ползучести и некоторую информацию о ползучести для изделий из композитных панелей, таких как фанера, OSB и картон. Исследование включало испытания на ползучесть с использованием трех скоростей линейной нагрузки и трех уровней постоянной нагрузки в одних условиях окружающей среды, а также испытание на ползучесть при двух низких уровнях постоянной нагрузки в трех условиях окружающей среды в течение 6-месячного периода. Прогнозы поведения при ползучести были получены с помощью модели экспоненциального накопления повреждений Gerhards (EDRM) и экспоненциальной модели, которая для испытаний с постоянной нагрузкой принимает следующую форму:

$$SL = A + B \cdot \ln T \quad (7)$$

EDRM дал некоторые оценки параметров с широкими доверительными пределами. Был сделан вывод, что экспоненциальная модель обеспечивает подходящие параметры; однако в модели не было механизма для включения образцов, которые не разрушились или разрушились при загрузке. Более того, модель оказывалась чрезмерно чувствительной к выбранной эталонной силе, если образец имел мало отказов в первые несколько дней испытаний. Чтобы проанализировать данные испытаний на ползучесть, был рассмотрен ряд эмпирических и вязкоупругих моделей, чтобы охарактеризовать зависящее от времени поведение всех испытанных образцов. Каждый метод моделирования имел свои преимущества и ограничения. Затем был сделан вывод, что четырехэлементная модель ползучести, представленная в [16] лучше всего подходит для измеренных среднесрочных отклонений или деформаций. Однако простота двухпараметрической модели ползучести степенной функции была очень привлекательной для практических целей.

Несмотря на свою цель использовать аналитические методы для описания и прогнозирования поведения панели при ползучести до разрыва, явления ползучести и ползучести фактически изучались отдельно с точки зрения моделирования. Таким образом, повреждение не было связано с фактическим поведением ползучести.

Brandt C. W. и Fridley K. J. [17] изучали поведение древесно-пластиковых композитов в зависимости от продолжительности нагрузки, и экспериментальные данные были сопоставлены как с EDRM Герхарда, так и с моделью Вуда методом регрессии наименьших квадратов. Было обнаружено, что испытанные древесно-пластиковые композиты продемонстрировали более выраженную реакцию на нагрузку по сравнению с массивной древесиной. Однако было определено, что тенденция поведения выбранных составов ДПК в зависимости от продолжительности нагрузки аналогична тенденции для цельных пиломатериалов, хотя наблюдалось вращение кривых EDRM.

Подход в механике разрушения

Другой многообещающий подход использовал механику разрушения для изучения процесса медленного роста трещин в древе-

сине. Представленный на микроскопическом уровне, этот подход предоставил некоторую дополнительную информацию о причинах и следствиях в процессе отказа. Механика разрушения успешно применялась для изучения времени до разрушения древесины [18, 19].

Теория DVM (поврежденного вязкоупругого материала) была предложена Nielsen L. F [18, 20]. В работе Nielsen L. F была установлена интегрированная концепция материалов для поведения древесины: древесина представляет собой растрескавшийся вязкоупругий материал, механическое поведение которого может быть описано достаточно подробно только путем объединения теорий вязкоупругости и механики разрушения. Параметрами модели DVM были вязкоупругость, упруго-вязкоупругая аналогия и модель трещины Дагдейла (включая закрытие трещины). Скорость роста трещины определялась как:

$$\frac{dk}{dt} = \frac{\pi^2}{8q \cdot \tau} \left(\frac{\sigma_c}{\sigma_l} \right)^2 \frac{k(\sigma / \sigma_{cr})^2}{\left[\left(k(\sigma / \sigma_{cr})^2 \right)^{-1} - 1 \right]^{1/b}} \quad (8)$$

где b и τ – параметры функции ползучести, $J(t)$:

$$J(t) = \left[1 + (t/\tau)^b \right] / E \quad (9)$$

где E – модуль Юнга; σ_l – теоретическая (неповрежденная) прочность; σ_{cr} – эталонная прочность;

$$q = \left[\frac{(1+b)(2+b)}{2} \right]^{1/b} \quad (10)$$

где $k = 1 / l_0$ – коэффициент повреждения (безразмерный коэффициент длины трещины).

Однако параметры для этих усовершенствованных моделей было трудно определить, и в некоторых случаях у них могло быть мало или совсем не было средств для оценки достоверности оценок. Таким образом, их использование в форматах проектирования, основанных на надежности, может быть ограничено. Однако еще предстоит разработать модель, которая может связать деформацию и процесс разрушения.

Было продемонстрировано, что влияние влажности и колебаний нагрузки на срок службы и остаточную прочность (сопротивление повторному циклу) древесины можно учитывать с помощью ранее разработанной теории DVM. Обычным контролирующим фактором была ползучесть, которую можно изменить, введя специальное время релаксации, зависящее от влажности, в хорошо известное выражение ползучести по степенному закону. Однако было признано, что модель распределения влаги, описанная в этой статье, была довольно грубой и нуждалась в уточнении в ходе дальнейших исследований. Его цель состояла в том, чтобы просто продемонстрировать, как изменения влажности вызывают увеличение ползучести древесины при сокращении срока службы.

В [18] продолжительность воздействия нагрузки рассматривалась с использованием вязкоупругой модели механики разрушения с ограниченной пластичностью, основанной на теории Нильсена. Модель была объяснена и разработана в общих чертах, а затем модифицирована для использования с коммерческой древесиной. Обсуждены вопросы задания корректных параметров функции ползучести и значений отношения напряжений для использования в расчетах с использованием модели. В Части II этой статьи модель вязкоупругой механики разрушения, разработанная в Части I, была откалибрована с использованием 70-дневного испытания под нагрузкой пиломатериалов.

Sorensen and Svensson разработали модель, основанную на зависимости энергии Гриффита для разрушаемого материала, чтобы учесть зависимость как напряжения, так и влажности от накопления повреждений в древесине. Для выражения напряжения, необходимого в этой теории, была принята модель ползучести по степенному закону. Закон ползучести был модифицирован ускоряющим фактором, $e^{C|\Delta m|}$, для учета зависимости изменения влажности. Случай с изменяющимся во времени напряжением моделировался ступенчато-постоянными состояниями напряжения, а накопленное повреждение α определялось по правилу Майнера для совокупного повреждения. Разрушение происходит, когда повреждение α равняется единице. Затем параметры модели были адаптированы к данным, относящимся к скандинавской конструкционной древесине, с исполь-

зованием метода максимального правдоподобия. Вероятность отказа как функция времени оценивалась с помощью моделирования.

Энергетический подход к деформации

Другим методом изучения влияния продолжительности нагрузки на конструкционные пиломатериалы является подход энергии деформации, предложенный Фридли. В Fridley et al. [21] был введен критический критерий деформации-плотности-энергии-разрушения для описания поведения конструкционных пиломатериалов в зависимости от продолжительности нагрузки. Линейная вязкоупругая конститутивная модель, модифицированная для учета гигротермических эффектов, разработанная Fridley et al. [22] был использован в сочетании с критическим критерием разрушения энергии деформации для прогнозирования эффектов продолжительности нагрузки. Для обширных тестов линейной, постоянной и ступенчато-постоянной нагрузки в различных постоянных и циклических условиях была определена критическая плотность энергии деформации, которая прогнозировала надвигающийся отказ.

Надвигающийся отказ определялся как начало отказа элемента, за исключением частичных отказов, которые не влияют на последующее поведение элемента. Критическое время, которое было временем, соответствующим возникновению критической энергии деформации и надвигающегося отказа члена, было предсказано с использованием модели энергии деформации. Был сделан вывод, что модель может довольно точно предсказать критическое время, когда реакция ползучести была предсказана точно. Наблюдалась потеря точности при возникновении механосорбционной ползучести из-за пониженной точности конститутивной модели такого поведения. В статье представлено сравнение модели энергии деформации с моделями накопления повреждений.

Модели повреждений разрабатывались с определением разрушения как полного обрушения элемента с полной потерей несущей способности. В то время как модель энергии деформации определила разрушение как превышение критической плотности энергии деформации, которая соответствует началу разрушения конечного элемента. Таким образом, подход энергии деформации был относительно консервативным по сравнению с ним.

В заключении хотелось бы отметить, что не смотря на многообразии существующих подходов к моделированию процесса накопления повреждений, на сегодняшний день не существует единой теории определения предела прочности при длительном действии нагрузки. Поэтому анализ моделей ползучести древесины в данной работе может являться основой для организации в будущем научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по разработке единой теории расчета накопления повреждений.

Литература

1. *Madsen B.* Structural behaviour of timber. North Vancouver, British Columbia, Canada: Timber Engineering Ltd. 1992. pp. 242.
2. *Wood L. W.* Relation of strength of wood to duration of load. Report No. 1916. Forest Products Laboratory, Madison. 1951. pp. 12.
3. *Madsen B.* Duration of load tests for wet lumber in bending. Structural Research Series Report 3. Dept. Civil Engineering, University of British Columbia, Vancouver. 1971.
4. *Madsen B.* Duration of load tests for wet lumber in bending. Structural Research Series Report 4. Dept. Civil Engineering, University of British Columbia, Vancouver. 1973.
5. *Madsen B. and Barrett J. D.* Time-strength relationships for lumber, Structural Research Series, Report No. 13. Dept. of Civil Engineering, University of British Columbia, Vancouver. 1976.
6. *Foschi R. O., Barrett J. D.* Load duration effects in western hemlock lumber. Journal of the Structural Division. ASCE. 108(7). 1982. p. 1494–1510.
7. *Foschi R. O., Folz B. R., Yao F. Z.* Reliability-based design of wood structures. Structural Research Series, Report No. 34, Department of Civil Engineering, University of British Columbia, Vancouver. 1989.
8. Wood Design Manual. Canadian Wood Council. 2001. pp. 196.
9. *Yao F. Z.* (1987) Reliability of structures with load history-dependent strength and an application to wood members. Master thesis. Dept. of Civil Engineering, University of British Columbia.
10. *Barrett J. D., Foschi R. O.* Duration of load and probability of failure in wood, part 1: Modeling creep rupture. Canadian Journal of Civil Engineering. 5(4). 1978. p. 505–514.
11. *Foschi R. O., Yao Z. C.* Another Look at three duration of load models. International Council for Building Research Studies and Documentation Working Commission W18 – Timber Structures CIB-W18/19-9-1 Meeting 19 Florence, Italy. 1986.
12. *Gerhards C. C., Link C. L.* A cumulative damage model to predict load duration characteristics of lumber. Wood and Fiber Science. 19(2). 1987. p. 147–164.

13. *Schaffer E. L.* Effect of pyrolytic temperatures on the longitudinal strength of dry Douglas-fir. *J. Testing and Evaluation*. 1(4). 1973. p. 319–329.
14. *Fridley K. J., Tang R. C., Soltis L. A., Yoo C. H.* Hygrothermal effects on loadduration behavior of structural lumber. *Journal of Structural Engineering, Structural Div. ASCE*. 118(4). 1992c. p. 1023–1038.
15. *Laufenberg T. L.* Composite products rupture under long-term loads: A technology assessment. Proceedings 22nd International particleboard/composite materials symposium. 1988 March, Pullman, WA, Washington State University. 1988. p. 247–256.
16. *Pierce C. B., Dinwoodie J. M.* Creep in chipboard, Part 1: Fitting 3- and 4-element response curves to creep data. *Journal of Materials Science*. (12). 1977. p. 1955–1960.
17. *Brandt C. W., Fridley K. J.* Load-duration behavior of wood-plastic composites. *ASCE, Journal of Materials in Civil Engineering*. 15(6). 2003. p. 524–536.
18. *Johns K., Madsen B.* Duration of load effects in lumber. Part I: A fracture mechanics approach. *Canadian Journal of Civil Engineering*. (9). 1982. p. 502–514.
19. *Nielsen L. F.* Wood as a cracked viscoelastic material. Part I: Theory and applications, and Part II: Sensitivity and justification of a theory. Proceedings of international workshop on duration of load in lumber and wood products. Richmond, B.C., Canada. Special Publ. No. SP-27. Forintek Canada Corp., Vancouver, B.C. 1986. p. 67–89.
20. *Nielsen L. F.* Lifetime and residual strength of wood subjected to static and variable load. Part I: introduction and analysis, and Part II: applications and design. *Holz Roh- Werkstoff* (58). 2000. p. 81–90, 141–152.
21. *Fridley K. J., Tang R. C., Soltis L. A.* Load-duration effects in structural lumber: Strain energy approach. *Journal of Structural Engineering, Structural Div. ASCE*. 118(9). 1992a. p. 2351–2369.
22. *Fridley K. J., Tang R. C., Soltis L. A.* Creep behavior model for structural lumber. *Journal of Structural Engineering, Structural Div. ASCE*. 118(8). 1992b. p. 2261–2277.

УДК 694

Александр Борисович Шмидт,

канд. техн. наук, доцент

Денис Вячеславович Груничев,

бакалавр

Вячеслав Сергеевич Груничев,

инженер

(Санкт-Петербургский государственный

архитектурно-строительный университет)

E-mail: ukf@bk.ru,

slava-sg@mail.ru

Alexander Borisovich Schmidt,

PhD in Sci. Tech., Associate Professor

Denis Vyacheslavovich Grunichev,

bachelor

Vyacheslav Sergeevich Grunichev,

engineer

(Saint Petersburg State University

of Architecture and Civil Engineering)

E-mail: ukf@bk.ru,

slava-sg@mail.ru

**ПРИМЕНЕНИЕ ШПИЛЬКИ
С МЕТРИЧЕСКОЙ РЕЗЬБОЙ ПО ВСЕЙ ДЛИНЕ
В КАЧЕСТВЕ НАГЕЛЯ В НАГЕЛЬНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ
ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

APPLICATION OF THE HAIRPIN WITH METRIC THREAD
ALONG THE ENTIRE LENGTH AS A NAGEL
IN THE NAGEL JOINTS OF WOODEN STRUCTURES

В ответственных конструкциях для нагельных соединений предусмотрено применение металлических цилиндрических нагелей с гладкой поверхностью, применение шпилек с резьбой по всей длине нормативной документацией не допускается.

Произведены испытания нагельных соединений с металлическими нагельными из стали с различными прочностными характеристиками (кл. прочности 8.8 и сталь С245) и разной поверхностью (гладкой и с метрической резьбой по всей длине). По результатам испытаний определена несущая способность шпильки и нагеля с гладким телом, получены картины разрушения нагельного соединения.

Сравнение результатов испытаний с нагельными разных типов показывает, что работа шпильки с резьбой по всей длине в качестве нагеля подчиняется тем же закономерностям, что и цилиндрический нагель с гладкой поверхностью.

Ключевые слова: нагельное соединение, нагель, шпилька с метрической резьбой по всей длине, нагельное гнездо, изгиб нагеля, смятие древесины, несущая способность соединения, несущая способность нагеля.

In critical designs for dowel joints, metal cylindrical dowels with a smooth surface are used as nails; the use of studs with threads along the entire length is not allowed by regulatory documentation.

Tests of dowel joints with metal dowels made of steel with different strength characteristics (strength class 8.8 and steel C245) and different surfaces (smooth and

with metric thread along the entire length) were carried out. Based on the test results, the bearing capacity of a stud and a dowel with a smooth body was determined, and pictures of the destruction of the dowel joint were obtained.

Comparison of test results with dowels of different types shows that the operation of a stud with a thread along the entire length as a dowel obeys the same laws as a cylindrical dowel with a smooth surface.

Keywords: dowel connection, dowel, stud with metric thread along the entire length, dowel socket, dowel bending, wood collapse, bearing capacity of the joint, bearing capacity of the dowel.

Нагельные соединения являются безраспорными, при этом сам нагель работает на изгиб. Для работы этих соединений характерна податливость, связанная со смятием древесины и изгибом самого нагеля. Это позволяет перераспределить напряжения в элементах конструкции и исключить их преждевременное хрупкое разрушение.

Вместе с тем необходимо отметить, что в нормативной документации предусмотрено применение цилиндрических нагелей из металла с гладкой поверхностью [1]. В практике применения нагельных соединений для ответственных конструкций установилось понятие, что в качестве нагелей не может быть применена шпилька с метрической резьбой по всей длине [2].

Считается, что нагельное соединение с метрической шпилькой по всей длине имеет высокую деформативность, в связи с чем уменьшается ее несущая способность. Кроме того, в момент работы конструкции, на которую действует переменная нагрузка, резьба, выступает концентратором раскалывающих напряжений и остриями резьбы, «разбивает» нагельное гнездо, что может привести к снижению несущей способности древесины гнезда и выходу соединения из работы в целом [3].

Такая точка зрения правомочна при условии, что шпилька с метрической резьбой по всей длине устанавливается в отверстие по диаметру равное ее номинальному диаметру. Если же ввинтить шпильку в отверстие диаметром меньшим ее номинального диаметра, вероятно, резьба уплотнит поверхность нагельного гнезда и включится в работу.

Исходя из вышеизложенного, можно предположить, что включение резьбы в работу увеличит несущую способность нагельного соединения.

Для проверки данного предположения в 2022 г. в лаборатории механических испытаний строительных конструкций СПбГАСУ были проведены испытания нагельных соединений.

Они проводились по методике ГОСТ 33082-2014 «Конструкции деревянные. Методы определения несущей способности узловых соединений» [4]. Схема испытания приведена на рис. 1.

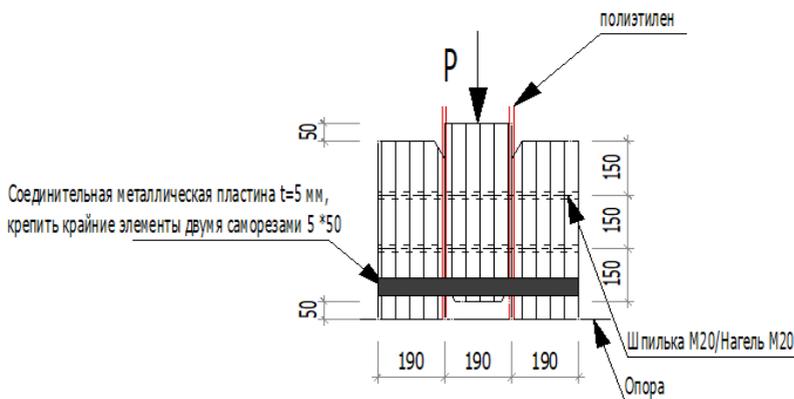


Рис. 1. Схема испытаний

Конструктивно нагельное соединение представляло собой три клееных деревянных бруска размерами $190 \times 140 \times 500$ мм, каждый, (материал -сосна/ель. Влажность $10 \pm 2\%$.) соединенных двумя нагелями. Размеры брусков принимались исходя из того, чтобы несущая способность нагельного соединения определялась условием изгиба нагеля, а не смятием древесины. Нагели были расставлены с учетом требований СП 64.13330.2017 «Деревянные конструкции»[5]. Между брусками, для исключения силы трения, была проложена полиэтиленовая пленка толщиной 200 мкм. Для исключения возможности расхождения крайних брусков под воздействием нагрузки с двух сторон образца снизу устанавливались металлические планки размерами $5 \times 50 \times 570$. Они крепились к крайним образцам на саморезы.

Всего было проведено три группы испытаний, в которых образцы отличались применяемыми типами нагелей.

В первой группе была применена шпилька $d = 20$ мм с метрической резьбой по всей длине, классом прочности 8.8. Резьба – под углом 60° . Шаг резьбы 2,5 мм. Внутренний диаметр шпильки 17,294 мм. Шпилька устанавливалась в отверстие $d = 18$ мм. Всего в данной группе было проведено испытание 7 образцов.

Во второй группе испытаний устанавливался цилиндрический нагель диаметром 20 мм, классом прочности 8.8. Нагель был изготовлен из шпильки $d = 24$ мм с метрической резьбой путем ее проточки до гладкого тела. Нагель устанавливался в отверстие $d = 20$ мм. Всего было проведено испытание 7 образцов.

Для третьей группы испытаний использовался цилиндрический нагель диаметром 20 мм, изготовленный из арматуры класса А240. Нагель устанавливался в отверстие $d = 20$ мм. Всего 6 образцов.



Рис. 2. Испытательная машина «Инстрон 5989» с установленным для испытания образцом

Согласно требованиям ГОСТ 33082-2014 «Конструкции деревянные. Методы определения несущей способности узловых соединений» [4] нагружение производилось ступенчато, со снятием нагрузки после достижения нагрузки равной ступени. Всего принималось 12 ступеней нагружения со снятием нагрузки и последняя –

до разрушения образца. Скорость нагружения -10 мм/мин. Величина нагружения принималась исходя из несущей способности соединения, с учетом стали кл. прочности 8.8., рассчитанной по методике СП 64.13330.2017 2017 «Деревянные конструкции» [5].

Несущая способность соединения была принята – 170,936 кН, количество ступеней нагружения принималось 13, а величина нагружения одной ступени принималась равной 13,15 кН.

Испытания проводились на Универсальной напольной электро-механической испытательной машине «Инстрон» модель 5989, предназначенной для испытаний в диапазоне нагрузок от 0 до 600 кН.

Результаты испытаний фиксировались автоматически. Общий вид машины и установка образца для испытания показаны на рис. 2.

В ходе испытания автоматическим способом были получены графики по времени нагружения, величине нагружения, величине деформаций. По этим данным были построены диаграммы остаточных деформаций от упругой деформации за цикл. Характерные разрушения образцов показаны на рис. 3.



Рис. 3. Характерные разрушения образцов

После испытаний были вскрыты нагельные гнезда по всем трем группам образцов. На рис. 4 видно, что характер разрушения на-

гельного соединений абсолютно идентичен для нагелей (2 и 3 группы образцов) и для шпильки с метрической резьбой по всей длине.

Смятие древесины происходило одинаково во всех трех образцах. Хотя в первой и второй группе границы смятия менее выражены, также имеется разная изогнутость нагелей, что является результатом разных прочностных характеристик сталей, из которых они сделаны. Это позволяет предположить одинаковую работу нагеля во всех трех группах образцов для испытания.

Ожидавшийся эффект «протягивания шпильки» при включении в работу резьбы шпильки просматривается в зонах, наиболее отдаленных от линии среза. На рис. 5 можно увидеть следы протягивания резьбы. Вместе с тем в рамках испытаний не удалось определить степень влияния резьбы на несущую способность нагеля.

Оценка несущей способности соединения по результатам испытания производилась согласно требованиям ГОСТ 33082-2014 [4]. Основными условиями, определяющими несущую способность нагельного соединения, являются максимальная разрушающая нагрузка и нагрузка предела упругой работы.



Рис. 4. Вскрытые нагельные гнезда



Рис. 5. Вскрытие нагельного гнезда первой группы испытания
(нагель-шпилька с резьбой по всей длине)

Фактическая несущая способность определяется по формуле [6]:

$$R_{\text{exp}} = N_{\text{max}} / \gamma_c,$$

где N_{max} – максимальная разрушающая нагрузка, кН.

При этом в ГОСТ 33082-2014 [4] установлено дополнительное ограничение – несущая способность должна отвечать неравенству:

$$\frac{N_e}{R_d} = 1,3.$$

Произведя проверку по всем группам испытаний получено:

Для первой группы имеем: $\frac{N_e}{R_d} = \frac{77,38}{60,18} = 1,28$ не соответствует

условию, несущая способность должна быть не более:

$$\frac{N_e}{1,3} = \frac{77,38}{1,3} = 59,5$$

Для второй группы имеем: $\frac{N_e}{R_d} = \frac{111,61}{74,3} = 1,5$ соответствует условию

Для третьей группы имеем: $\frac{N}{R} = \frac{58,89}{49,6} = 1,19$ не соответствует условию, несущая способность должна быть не менее $\frac{N}{R} = \frac{58,89}{1,3} = 45,3$

Эти данные, а также средние величины нагрузки предела упругой работы, разрушающего усилия и несущей способности по группам испытания для каждого вида соединения внесены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты испытаний

Группа испытаний	Нагрузка предела упругой работы (N_e), кН	Разрушающее усилие, (N_{max}) кН	Расчетная несущая способность R_d , кН (расчет по СП 64.3330.2017)	Фактическая несущая способность по ГОСТ 33082-2014 (R_{exp}), кН	При условии неравенства $\frac{N}{R} \geq 1,3$
1 группа	77,38	163,56	60,18	66,22	59,5
2 группа	111,61	166,61	74,3	67,45	67,45
3 группа	58,89	138,47	49,6	56,06	45,3

С учетом конструктива нагельного соединения (2 нагеля) и двухсрезности испытываемых образцов получаем несущую способность 1 нагеля равную (см. табл. 2):

Таблица 2

Результаты по несущей способности одного нагеля

Группа испытаний	Несущая способность одного нагеля (кН)
Первая группа	14,875
Вторая группа	16,862
Третья группа	11,325

Из таблицы 2 можно сделать несколько выводов:

1. Несущая способность нагелей из стали классом прочности 8.8 при одинаковом диаметре значительно выше несущей способности нагеля С245 (коэффициент 1,49), что объясняется более высокими прочностными характеристиками стали.

2. Несущая способность цилиндрического нагеля $d = 20$ мм превышает несущую способность шпильки с метрической резьбой по всей длине номинальным диаметром 20 мм, при одинаковых характеристиках стали, что объясняется ослаблением шпильки за счет резьбы.

Поскольку разрушение нагельного соединения происходит по изгибу нагеля, то основное значение имеет момент сопротивления сечения (без учета резьбовой нарезки). Для круглого сечения он определяется по формуле:

$$W \approx 0,1 d^3$$

$$\text{Для } d = 20 \text{ мм, } W = 0,8 \text{ см}^3$$

$$\text{Для } d = 17,294 \text{ мм, } W = 0,52 \text{ см}^3$$

Таким образом, момент сопротивления первого нагеля на 35 % больше, а по факту испытаний получено превышение в 12 %. Одним из объяснений может быть работа резьбы шпильки, вторым объяснением подобного факта может быть раскалывание образца в момент испытания вызванное недостаточными осевыми расстояниями для нагелей из стали с высокими прочностными показателями, что не позволило достичь полной несущей способности данных соединений.

Характер разрушения образцов по второй, и особенно по первой группе испытаний (см. рис. 3) свидетельствует о высокой жесткости соединения, что приводит к раскалыванию образцов, и возможно, это снижает несущую способность нагельного соединения. Можно предположить, что для нагелей из высокопрочных сталей необходимо определить другие правила расстановки.

Литература

1. ГОСТ Р 56711-2015 Соединения нагельного типа для деревянных конструкций. Технические условия основе – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200127287?ysclid=ljzx305wvr721225930> (дата обращения 04.04.2023).

2. Исследование работы металлических и деревянных конструкций и оценка срока их службы с учетом условий эксплуатации / А. Г. Черных и др. ; СПбГАСУ. – СПб., 2022–356 с.
3. Определение несущей способности нагельных соединений на основании стандартных характеристик материалов / Смирнов П. Н., Погорельцев А. А. 247–254 с.
4. ГОСТ 33082-2014 Конструкции деревянные. Методы определения несущей способности узловых соединений. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200115780> (дата обращения 04.04.2023).
5. СП 64.13330-2017 «Деревянные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-25-80». – URL: <https://docs.cntd.ru/document/456082589> (дата обращения 04.04.2023).
6. ГОСТ Р 58459-2019 Конструкции деревянные. Определение нормативных и расчетных значений механических свойств древесины и материалов на ее основе – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200169328> (дата обращения 04.04.2023).

УДК 614.841.334

Екатерина Сергеевна Кирик,
канд. физ.-мат. наук

(Институт вычислительного
моделирования
СО РАН)

Марина Викторовна Гравит,
канд. техн. наук, доцент

Алла Сергеевна Цепова,
студент

Екатерина Ильасова Каримова,
студент

Ксения Александровна Хлебникова,
студент

(Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого)

E-mail: kirik@icm.krasn.ru,
marina.gravit@mail.ru,
tsepova.as@edu.spbstu.ru,
karimova.ei@edu.spbstu.ru,
hlebnikova.ka@edu.spbstu.ru

Ekaterina Sergeevna Kirik,
PhD in Sci. Phys.-Math.

(Institute
of Computational Modelling
SB RAS)

Marina Viktorovna Gravit,
PhD in Sci. Tech., Associate Professor

Alla Sergeevna Tsepova,
student

Ekaterina Iliasova Karimova,
student

Ksenia Aleksandrovna Khlebnikova,
student

(Peter the Great St. Petersburg
Polytechnic University)

E-mail: kirik@icm.krasn.ru,
marina.gravit@mail.ru,
tsepova.as@edu.spbstu.ru,
karimova.ei@edu.spbstu.ru,
hlebnikova.ka@edu.spbstu.ru

**ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ ПРОВЕРКЕ
БЕЗОПАСНЫХ УСЛОВИЙ ЭВАКУАЦИИ
И ВОЗДЕЙСТВИЯ ОФП
НА ДЕРЕВЯННЫЕ КОНСТРУКЦИИ**

**APPLICATION OF MATHEMATICAL MODELING
WHEN CHECKING SAFE EVACUATION CONDITIONS AND
THE IMPACT OF FIRE HAZARDS
ON WOODEN STRUCTURES**

В данной статье рассматривается зависимость динамики опасных факторов пожара от объемно-планировочных решений на примере гостиницы с конструкциями из деревянных панелей. В ходе работы построены компьютерные модели исследуемых зданий в программном комплексе «Сигма ПБ», выбраны расчетные сценарии и выполнено моделирование распространения опасных факторов пожара и эвакуации. На основе анализа полученных результатов показано существенное влияние объемно-планировочных решений и времени начала эвакуации на условия эвакуации из гостиницы. Показано, что в период эвакуации

основную опасность для людей представляет дым, образующийся при горении горючей нагрузки, находящейся в здании. Материал деревянных конструкций здания на этом этапе не представляет опасность для людей, не является горючим материалом, усиливающим опасность пожара для людей, здание не теряет своей прочности, пути эвакуации не претерпевают геометрических изменений в период эвакуации.

Ключевые слова: пожарная безопасность, ОФП, эвакуация, деревянное строительство, CLT, LVL.

This article examines the dependence of the dynamics of fire hazards on spatial planning solutions on the example of two objects of wooden construction: an apartment building and a hotel. In the course of the work, computer models of the buildings under study were built in the Sigma PB software package, calculated scenarios were selected and modeling of the spread of fire and evacuation hazards was performed. Based on the analysis of the results obtained, a significant influence of space-planning solutions and the time of the start of evacuation on the evacuation conditions is shown. It is shown that during the evacuation period, the main danger to people is smoke generated by the burning of a combustible load located in the building. Gorenje The material of the wooden structures of the building at this stage does not pose a danger to people, is not a combustible material that increases the risk of fire for people, the building does not lose its strength, the escape routes do not undergo geometric changes during the evacuation period.

Keywords: fire safety, fire hazards, evacuation, wooden construction, CLT, LVL.

Возведение зданий из клееной древесины становится все более актуальным направлением в современном строительстве. Данное явление связано с тем, что клееная древесина обладает высокой прочностью и устойчивостью к различным видам нагрузок, что делает ее идеальным материалом для строительства многоэтажных зданий. Кроме того, клееная древесина является экологически чистым материалом, который производится без использования вредных веществ и процессов, что позволяет возводить здания, которые не только имеют привлекательный внешний вид, но и не наносят вреда окружающей среде [1].

Использование клееной древесины вызывает как большой интерес, так и опасения для применения в строительстве многоэтажных зданий, включая жилые и общественные [2]. В основной массе опасения связаны с пожароопасными свойствами древесины. Поэтому возникает вопрос, связанный с оценкой влияния пожароопасных свойств древесины на обеспечение безопасных условий при эвакуации.

Одним из основных факторов, влияющих на условия эвакуации при пожаре, являются объемно-планировочные решения здания, геометрические параметры путей эвакуации, количество эвакуационных выходов с этажей, время начала эвакуации. Кроме того, необходимо понимать максимальное допустимое количество людей, которые могут находиться в здании в момент начала эвакуации [3].

В данном исследовании выполнено моделирование развития пожара и эвакуации для нескольких сценариев в здании гостиницы. Изучалась динамика нарастания опасных факторов пожара (ОФП) на путях эвакуации, процесс эвакуации. Предметом исследования было состояние путей эвакуации с точки зрения обеспечения безопасных условий в контексте определений ст.53 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности», изучение вклада в формирующуюся опасность пожара для людей горючей нагрузки, присутствующей в здании, и материала ограждающих конструкций здания. Для расчетов использовался отечественный программный комплекс «Сигма ПБ», реализующий полевую модель развития пожара [7, 9] и индивидуально-поточную модель эвакуации [7, 8], что наиболее полно отвечает задачам исследования [4, 5].

Описание объекта, постановка расчетной задачи

Объект исследования представляет собой пятиэтажное прямоугольное в плане здание с каркасной конструктивной схемой. Несущие конструкции выполнены из *LVL*-бруса, ненесущие – из *CLT*-панелей. Архитектурная высота – 22,1 м, пожарно-техническая высота (характеризующаяся разностью отметок проезда пожарных машин и нижней отметкой оконного блока пятого этажа) – 15,9 м. Класс функциональной пожарной опасности – Ф1.2. Для обеспечения эвакуации в здании запроектировано 3 лестничных клетки типа Н2 и 4 рассредоточенных эвакуационных выхода из здания. Планы первого и типового этажей гостиницы представлены на рисунках 1 и 2.

В соответствии с [7] время начала эвакуации $t_{\text{нэ}}$ принято 120 с – здания гостиниц, оборудованные системами оповещения и управления эвакуацией людей III–V типов. Значение времени начала эвакуации для помещения очага пожара $t_{\text{нэ}}$ принято по формуле П5.1 Приложения 5 в [7].



Рис. 1. План первого этажа гостиницы



Рис. 2. План типового этажа гостиницы

В расчетную область для моделирования развития пожара были включены помещения с очагом пожара, коридоры на каждом этаже, лестничные клетки и объем атриума, Рисунок 4. Для дискретизации расчетной области выбран шаг сетки $0,2 \times 0,2 \times 0,2 \text{ м}^3$ для помещений с очагом пожара, $0,4 \times 0,4 \times 0,4 \text{ м}^3$ – для помещений на этаже с очагом, $0,4 \times 0,4 \times 0,4 \text{ м}^3$ – для остальных помещений.

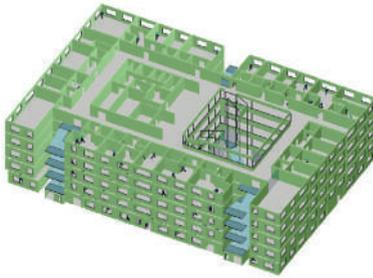


Рис. 3. Модель здания
в «Сигма ПБ»

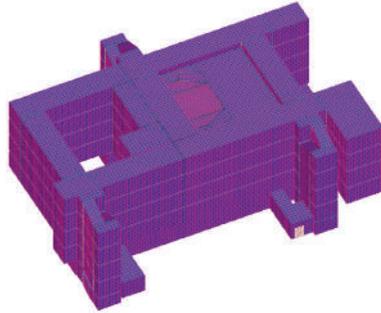


Рис. 4. Расчетная сетка
для моделирования
распространения ОФП

На границах расчетной области были приняты адиабатные условия, то есть обеспечивалась максимальная концентрация тепла внутри расчетной области. В таких условиях оценки времени достижения температурой критических значений можно считать оценками снизу, а оценку величины самого параметра – оценкой сверху. Температура внутри расчетной области в начальный момент времени и снаружи принималась равная $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Горючая нагрузка (ГН) выбиралась исходя из функционального назначения помещений согласно [10]. Площадь расположения нагрузки определялась из условия нарастания номинальной мощности в течение времени эвакуации с учетом линейной скорости принятой нагрузки, то есть не менее 8 м^2 [11]. Удельная масса нагрузки также принималась из соображений поддержания горения загоревшимся участком в течении всего времени моделирования эвакуации и равна 10 кг/м^2 . Было рассмотрено 4 места размещения очага пожара. Основные характеристики сценариев пожара представлены в таблице 2.

Количество людей на каждом этаже принято в соответствии с таблицей 1. Учитывались маломобильные граждане, передвигающиеся самостоятельно групп мобильности М2 и М3. Расчетную область для моделирования эвакуации составили помещения, в которых в начальный момент находились люди, пути эвакуации (коридоры, холлы, лестницы), рисунок 3.

Таблица 1

**Количество людей на этаже
в соответствии с категориями МГН**

Сценарии 1-4	М1	М2	М3
1 этаж	74	2	2
2 этаж	34	2	2
3 этаж	34	2	2
4 этаж	34	2	2
5 этаж	34	2	2
Итого в здании	210	10	10

Результаты моделирования

Выполненные расчеты показывают, что в трех и четырех рассмотренных сценариях безопасные условия для людей в период эвакуации не обеспечиваются, таблица 2. Опасность для людей в процессе эвакуации представляет задымление, которое формируется сгоранием горючей нагрузки находящейся в здании. Более подробно рассмотрим это утверждение на примере сценариев 2 и 4.

На Рисунке 5 представлены поля оптической плотности дыма в сценариях 2 и 4 на 135 секунде, то есть через 15 минут после начала эвакуации. Срезы сделаны на уровне 1,7 м от пола этажей. Из рисунков видно, что условия на момент начала эвакуации не являются безопасными. При этом температура к этому моменту не представляет опасность для людей, рисунок 6.

Сценарии пожара и результаты расчетов

№	Описание сценария пожара	Результаты расчета	Обеспечение своевременной эвакуации
1	Очаг на 1 этаже в зоне гардероба. Площадь очага – 20 м ² объем помещения – 70 м ³ , помещение очага связано с атриумом через открытый проем, ГН – гардероб	В первую очередь задымление достигает предельного значения в коридоре пятого этажа примерно на 300 с от начала пожара. Эвакуация из здания заканчивается к 220 с.	Обеспечивается
2	Очаг на 1 этаже в атриуме. Площадь очага – 16м ² , объем помещения – 4400 м ³ , ГН – Жилые помещения	В первую очередь задымление достигает предельного значения в коридоре пятого этажа, и происходит это до начала эвакуации на 120 с	Не обеспечивается
3	Очаг в цехе пищеблока на 1 этаже. Площадь очага – 8,57 м ² , объем помещения – 30 м ³ , помещение очага связано с примыкающим коридором пищеблока через открытый проем, ГН – Административные помещения	Наибольшую опасность этот сценарий имеет для людей, находящихся в пищеблоке, через 60 с от начала пожара пути эвакуации в пищеблоке становятся небезопасными	Не обеспечивается
4	Очаг в помещении отдыха гостей на 5 этаже. Объем помещения – 165 м ³ , помещение очага связано с коридором 5-го этажа и атриумом через открытый проем, ГН – Жилые помещения. Из схемы эвакуации исключается ближайшая к очагу лестница	В первую очередь задымление достигает предельного значения в коридоре пятого этажа, и происходит это до начала эвакуации на 120 с	Не обеспечивается

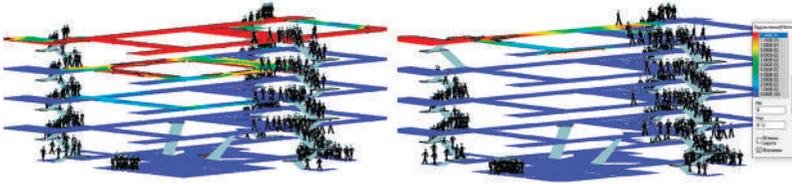


Рис. 5. Положение людей при эвакуации и поля оптической плотности в сценариях 2 (слева) и 4 (справа) на 135 с (красный цвет соответствует критическому значению 0,12 Нп/м [7])



Рис. 6. Положение людей при эвакуации и поля температуры в сценариях 2 (слева) и 4 (справа) на 135 с (красный цвет соответствует критическому значению 700 °С [7])

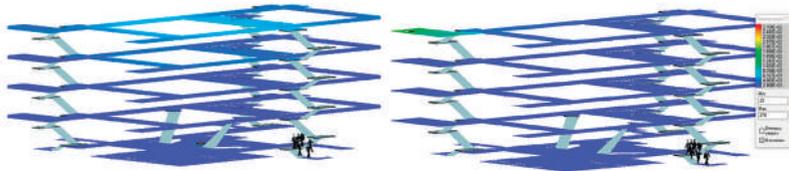


Рис. 7. Положение людей при эвакуации и поля температуры в сценариях 2 (слева) и 4 (справа) на 220 с (красный цвет соответствует значению 270 °С – температура обугливания древесины)

Из рисунка 7 видно, что и к моменту окончания эвакуации не приходится говорить о достижении значения критической температуры обугливания древесины, равного $t = 270\text{ °С}$ (согласно СП 64.13330.2017) в среднем в объеме здания.

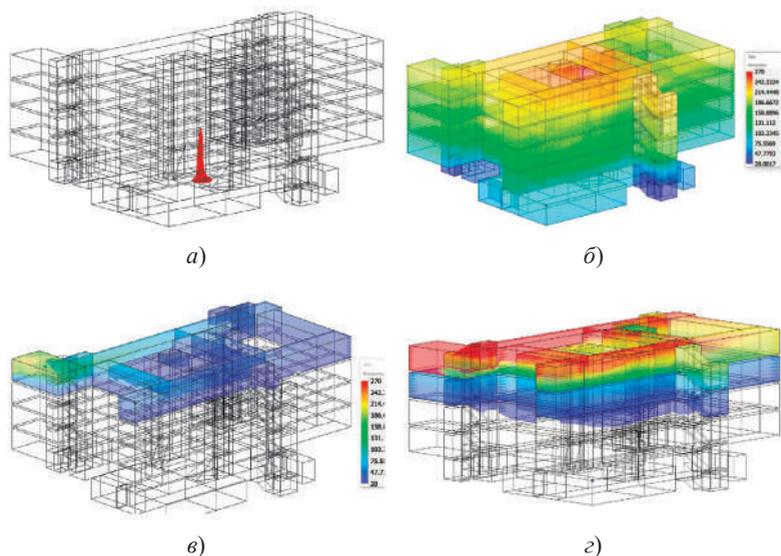


Рис. 8. Сценарий 2: изоповерхность температуры 270 °С на 220 с (а) и распределение температуры по поверхности стен здания на 500 с (б); сценарий 4: распределение температуры по поверхности стен здания на 220 с (в) и 550 с (г); красный цвет соответствует значению 270 °С

Рисунок 8, б показывает распределение температуры по поверхности к 500 с и изоповерхность температуры, равную 270 °С, рисунок 8, а, к моменту окончания эвакуации в сценарии 2. Основание конуса имеет диаметр не более 3 метров, при линейной скорости принятой ГН 0,007 м/с это соответствует площади загоревшейся области к 220 секунде при радиальной модели очага пожара из [7].

В случае сценария 4 нарастание температуры до значения критического для необработанной древесины происходит быстрее, и можно говорить о том, что к 500 секунде необработанная поверхность ограждающих конструкций уже будет представлять горючую нагрузку, Рисунок 8г. Но к моменту окончания эвакуации ограждающие конструкции здания так же не вносят вклад в опасность для людей, создаваемую пожаром, рисунок 8, в.

В сценариях 2 и 4 применялась одинаковая горючая нагрузка (жилые помещения, [10]), и по представленным материалам нагляд-

но видно, как влияет объемно-планировочное решение на динамику распространения опасных факторов пожара в период эвакуации (рисунки 5–7), как изменяется состояние среды внутри здания с точки зрения вовлечения необработанных деревянных конструкций в процесс горения, рисунки 8, б и 8, г. Наибольшая опасность для конструкций возникает в случае размещения очага в помещении малой высоты (в нашем случае 3 м).

Выполнен ряд дополнительных расчетов, в которых проверялось влияние геометрических характеристик путей эвакуации на обеспечение безопасных условий эвакуации. Очевидным является факт, что увеличение высоты и ширины коридоров зданий имеет экономически и технически обоснованные пределы. Было показано, что в рамках таких ограничений только изменением геометрических параметров (высоты, ширины коридоров) не обойтись. Требуются изменения других важных условий: времени начала эвакуации и ограничения распространения ОФП на путях эвакуации из помещения с очагом пожара или, как в случае с атриумом, защита путей эвакуации на вышележащих этажах от пространства атриума, например, стационарными экранами или шторами.

При этом показано, что, именно, локализация распространения ОФП имеет наибольший эффект в случае, если очаг пожара находится на этаже с коридорной системой путей эвакуации. С другой стороны, очевидно, если очаг находится в помещении ограниченного объема, то локализация ОФП приводит к более высокой скорости локального роста температуры, воздействующей на конструкции. И критическая температура обугливания древесины достигается быстрее.

Выводы

По результатам исследований установлено, что наиболее опасным фактором пожара для людей является задымление. Показано существенное влияние объемно-планировочных решений и времени начала эвакуации на условия эвакуации. В период эвакуации основную опасность для людей представляет дым, образующийся при горении горючей нагрузки, находящейся в здании, температура в здании не достигает критических значений даже для людей к моменту окончания эвакуации. Материал незащищенных деревянных конструкций здания в период эвакуации не представляет опасность

для людей, не является горючим материалом, усиливающим опасность пожара, здание не теряет своей прочности, пути эвакуации не претерпевают геометрических изменений в период эвакуации и к ее окончанию в рассмотренном пятиэтажном здании гостиницы.

Литература

1. *Косов И. И.* Деревянные панели CLT в строительстве общественных зданий: // Международный журнал прикладных наук и технологий «Integral». 2019. № 2. URL: <https://e-integral.ru/wpcontent/uploads/2019/06/Nomer-2-2019-Arhiv.pdf> (Дата обращения: 10.03.2023).
2. *Герасимович А. А., Агафонов С. А.* Обзор мирового опыта проектирования и строительства многоэтажных зданий на основе клееных деревянных конструкций // Вестник магистратуры. № 5–3(104). 2020. с 70-77.
3. *Самошин Д. А.* Расчет времени эвакуации людей. Проблемы и перспективы / Самошин Д. А. // Пожаровзрывобезопасность. № 1., 2004. – с. 57–69.
4. *Недрышкин О. В., Гравит М. В.* Программные комплексы моделирования опасных факторов пожара // Пожарная безопасность, № 2. 2018. С. 38–46.
5. *Kirik E., Litvintsev K., Dekterev A., Khasanov I., Gavrilov A., Malyshev A., Harlamov E., Popel E.* Simulations of fire evacuations in “Sigma FS” software as a fire safety training instrument // Proceedings of the Ninth International Seminar on Fire and Explosion Hazards (21–26 April 2019 Saint Petersburg, Russia), edited by A. Snegirev, Vol. 2. P. 1281–1292. <http://doi.org/10.18720/SPBPU/2/k19-120>.
6. *Gravit M., Dmitriev I., Kuzenkov K., Lunyakov M.* Dependence of the human flow density from the staircase and exit width, E3S Web of Conferences, Vol. 91 (2019), art. no. 05017 (2019), doi.org/10.1051/e3sconf/20199105017.
7. Приказ МЧС РФ от 30 июня 2009 г. № 382 «Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности» [Электронный ресурс]. URL: <https://base.garant.ru/12169057/> (Дата обращения: 10.03.2023).
8. *Литвинцев К. Ю., Кирик Е. С., Дектерев А. А., Харламов Е. Б., Малышев А. В., Попел Е. В.* Расчетно-аналитический комплекс «Сигма ПБ» по моделированию развития пожара и эвакуации // Пожарная безопасность, № 4, 2016. С. 51–59.
9. *Рыжов А. П.* Применение полевого метода математического моделирования пожаров в помещениях / Рыжов А. П., Хасанов И. Р., Дектерев А. А., Амельчугов С. П. и др. // Методические рекомендации ВНИИПО. – М., 2003., – с. 35.
10. *Кошмаров Ю. А.* Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении: Учебное пособие. – М. : Академия ГПС МВД России, 2000. – 126 с.
11. *Кирик Е. С., Хасанов И. Р., Литвинцев К. Ю., Ягодка Е. А.* Перечень исходных данных при проведении расчета по оценке пожарного риска // Актуальные вопросы пожарной безопасности. 2020. № 3 (5). С. 5-21.

УДК 69.692

Владислав Алексеевич Мартынов,
аспирант
(Владимирский государственный
университет имени А. Г. и Н. Г. Столетовых)
E-mail: martinov3369@gmail.com

Vladislav Alekseevich Martynov,
postgraduate student
(Vladimir State
University)
E-mail: martinov3369@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕРМИЧЕСКИ ПОВРЕЖДЕННОЙ ДРЕВЕСИНЫ В КЛЕЕННЫХ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЯХ

STUDY OF THE POSSIBILITY OF APPLICATION OF THERMALLY DAMAGED WOOD IN GLUE-LAMINATED WOODEN STRUCTURES

Древесина обладает целым рядом ценных физико-механических и эксплуатационных свойств, которые позволяют широко использовать ее в различных отраслях деревообрабатывающей промышленности, строительстве, транспорте, энергетике и др. Так, одним из основных вопросов исследования лесов является вопрос о техническом качестве древесины, поврежденной пожаром, и возможности использования ее как конструкционного материала. В данной работе выполнены численные исследования деревоклееных конструкций (ДКК) с использованием древесины, подверженной огневому воздействию. По результатам численных расчетов исследуемых балок с применением древесины, поврежденной огнем воздействием, установлено, что их снижение несущей способности относительно эталонных не превышает 11,72 %, а относительные деформации – 11,31 %, что делает применение таких балок возможным при пролетах не более 7,5 м и классах функционального назначения 2а и 2б согласно ГОСТ 20850-2014.

Ключевые слова: огневое воздействие древесины, деревянные балки, сборная балка, деформируемость, метод конечных элементов, рациональное использование.

Wood has a number of valuable physical, mechanical and operational properties that allow it to be widely used in various branches of the woodworking industry, construction, transport, energy, etc. Thus, one of the main issues in forest research is the question of the technical quality of wood damaged by fire, and possibility of using it as a structural material. In this work, numerical studies of wood-glued structures (DCC) using fire-exposed wood are carried out. According to the results of numerical calculations of the studied beams using fire-damaged wood, it was found that their reduction in bearing capacity relative to the reference ones does not exceed 11.72 %, and relative deformations – 11.31 %, which makes the use of such beams possible with spans of no more than 7.5 m and functional classes 2a and 2b according to GOST 20850-2014.

Keywords: fire effect of wood, wooden beams, composite beam, deformability, finite element method, rational use.

Введение

Лесные пожары — это значительная составляющая общей проблемы охраны окружающей среды. Известно, что лесные пожары наносят огромный вред состоянию лесного фонда, на несколько десятилетий, если не навсегда, замедляя процесс восстановления леса. Они являются основным фактором, определяющим состояние и динамику лесного фонда России.

Поэтому особенно актуально встает вопрос максимального использования древесного сырья за счет более широкого применения там, где это возможно. Основной целью исследования является изучение технического качества древесины, поврежденной термическим воздействием вследствие пожара, и возможности использования ее как конструкционного материала.

Стоит отметить, что лесной пожар далеко не во всех случаях приводит к полному уничтожению древесного комплекса. Наиболее частым случаем воздействия пожара является нанесение огневых повреждений, влекущих за собой либо смерть деревьев, или ослабление их, что вызывает поражение древесины вредными насекомыми и микроорганизмами [1]. Опасным для дерева является повреждение камбия. Достаточно даже небольшого повреждения камбия высокой температурой, чтобы вызвать необратимые изменения в стволе дерева [2]. Внешним признаком поражения камбия является его потемнение и появления буроватого оттенка.

При термическом воздействии на сырую древесину вследствие лесного пожара происходит термогидролитическая деструкция древесного комплекса и, как следствие, изменение химического состава, структурные изменения древесины и снижение ее физико-механических свойств [3].

В настоящее время такие деревья в качестве конструктивного материала не применяются, они подлежат санитарным вырубкам, но при этом, согласно ранее проведенным исследованиям древесины на локальных образцах, при поражении огнем до 10% поперечного сечения ствола в течение первого года после пожара материал в значительной степени сохраняет свои механические и прочност-

ные характеристики, что делает его пригодным, например, при изготовлении некоторых типов клееных деревянных конструкций (КДК) или CLT-панелей.

1. Методика расчета

В данной работе выполнены численные исследования клееных балок перекрытия пролетом 6 м. Требования к клееным деревянным конструкциям регламентированы ГОСТ 20850-2014 «Конструкции деревянные клееные несущие. Общие технические условия». Согласно данному нормативному документу, балки пролетом до 7,5 м относятся к классам функционального назначения 2а и 2б, что позволяет использовать при их изготовлении древесину 3-го сорта, к которому, согласно ранее выполненным испытаниям локальных образцов на сжатие, растяжение, скалывание и статический изгиб, в том числе относится и древесина, поврежденная огнем воздействием [4]. Данное исследование направлено на снижение материалоемкости деревоклееных конструкций за счет частичного использования низкосортной древесины без значительного снижения несущей способности балок.

Расчет деревянных клееных балок выполнен методом конечных элементов в программном расчетном комплексе «ЛИРА 10.12». Стоит отметить, что на достоверность расчета в значительной степени влияет правильность формирования исходной конечно-элементной модели. Точность расчета напрямую зависит от степени разбивки исследуемой конструкции на конечные элементы, чем она выше – тем более достоверные результаты мы сможем получить, но при этом увеличивается время выполнения расчета инженерной задачи. В любом случае, результаты компьютерного расчета требуют инженерной проверки и, при наличии такой возможности, проведения физического эксперимента.

Предлагаемые балки представляют собой однопролетную клееную балку пролетом 6 м сечением $140 \times 500(h)$ мм, изготовленные в верхней и нижней части сечения из древесины 1 -го сорта, а в средней части сечения – из древесины, поврежденной огнем воздействием. Толщина ламелей согласно ГОСТ 20850-2014 принята 30...32 мм. Расчетная схема балок представлена на рис. 1. Загрузка балки: равномерно распределенная по площади нагрузка 0–38,0 кН с шагом 2,0 кН по СП 64.13330.2017 «Деревянные конструкции».

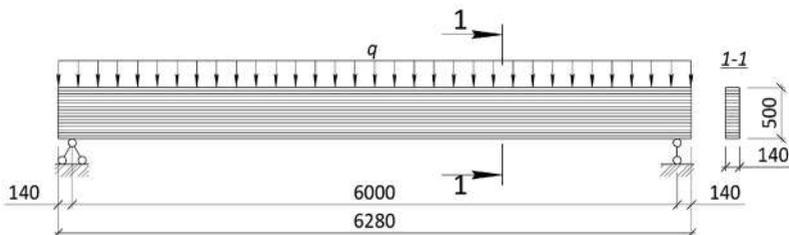


Рис. 1. Расчетная схема балки

В исследовании выполнены численные расчеты балок БК-1...БК-5, отличающиеся разным соотношением древесины 1-го сорта и низкосортной древесины в составе сечения. Балка БК-5 выполнена полностью из древесины 1-го сорта и является так называемой «эталонной», с которой будем сравнивать результаты расчета балок БК-1...БК-4. Сечения исследуемых конструкций представлены на рис. 2.



Рис. 2. Сечения исследуемых балок БК-1...БК-5

Для задания расчетных характеристик КЭ модели балки из древесины, подверженной огневому воздействию, были проведены исследования сырьевой древесины, отобранной в лесах Владимирской области после низового пожара [5]. Выбор указанного типа пожара представляет определенный научный и практический интерес

в плане дальнейшего использования древесины. Степень повреждения древостоев при этих видах пожара различная.

2. Результаты расчета по I группе предельных состояний

Результаты анализа несущей способности балок БК-1...БК-5 при линейной и нелинейной постановке задачи представлены в таблицах 1, 2.

Таблица 1

Анализ нормальных напряжений N_p , тс/м², при линейном расчете

Нагрузка, кН/м	Сечение балки				
	БК-1	БК-2	БК-3	БК-4	БК-5
30,0	<u>2878,5</u>	<u>2675,6</u>	<u>2621,8</u>	<u>2564,9</u>	<u>2540,8</u>
	1210,5	797,1	640,1	384,9	
32,0	<u>3070,4</u>	<u>2854,0</u>	<u>2796,6</u>	<u>2735,8</u>	<u>2710,2</u>
	1291,2	850,2	682,7	410,6	
34,0	<u>3262,3</u>	<u>3032,3</u>	<u>2971,4</u>	<u>2906,8</u>	<u>2879,6</u>
	1371,9	903,4	725,4	436,2	
36,0	–	<u>3210,7</u>	<u>3146,2</u>	<u>3077,8</u>	<u>3049,0</u>
		956,5	768,1	461,9	
38,0	–	–	–	<u>3248,8</u>	3218,4
				487,5	
Разрушающая нагрузка, кН/м	32,31	34,76	35,47	36,26	36,6
Относительное снижение несущей способности, %	11,72	5,03	3,09	0,93	–

Таблица 2

Анализ нормальных напряжений N_y , тс/м², при нелинейном расчете

Нагрузка, кН/м	Сечение балки				
	БК-1	БК-2	БК-3	БК-4	БК-5
28,0	<u>2367,4</u>	<u>2267,0</u>	<u>2234,9</u>	<u>2198,8</u>	<u>2183</u>
	1306,9	1038,7	923,4	709,8	
30,0	<u>4113,2</u>	<u>3933,1</u>	<u>3878,7</u>	<u>3808,4</u>	<u>3746,6</u>
	2650,6	2044,4	1837,0	1452,9	
32,0	<u>6624,1</u>	<u>6202,7</u>	<u>6082,5</u>	<u>5941,2</u>	<u>5831,9</u>
	4198,7	3333,2	2961,9	2109,2	
Разрушающая нагрузка, кН/м	29,76	29,96	30,02	30,09	30,15
Относительное снижение несущей способности, %	1,29	0,63	0,43	0,20	-

По результатам расчетов конечно-элементных моделей балок с применением древесины, поврежденной огневым воздействием, по первой группе предельных состояний можно сделать следующие выводы:

При линейном расчете несущая способность эталонной балки БК-5 составила 36,6 кН/м, балок БК-1...БК-4 - 32,31 ...36,26 кН/м. Относительное снижение несущей способности отмечено в пределах 0,93... 11,72 %.

При нелинейном расчете несущая способность эталонной балки БК-5 составила 30,15 кН/м, балок БК-1...БК-4 - 29,76...30,09 кН/м. Относительное снижение несущей способности отмечено в пределах 0,20... 1,29 %.

Наибольшей несущей способностью обладает балка БК-4 с наименьшим содержанием поврежденной древесины, наименьшей – балка БК-1.

3. Результаты расчета по II группе предельных состояний

Результаты анализа прогибов балок БК-1...БК-5 при линейной и нелинейной постановке задачи представлены в таблицах 3, 4. Предельно допустимые прогибы для балок пролетом 6,0 м согласно таблице Д.1 СП 20.13330.2016 составляют 30 мм [6].

Таблица 3

Сравнение прогибов балок при линейном расчете

Нагрузка, кН/м	Сечение балки				
	БК-1	БК-2	БК-3	БК-4	БК-5
2,0	5,89	5,68	5,63	5,57	5,54
4,0	11,78	11,37	11,25	11,13	11,07
6,0	17,68	17,05	16,88	16,70	16,61
8,0	23,57	22,73	22,51	22,26	22,15
10,0	29,46	28,41	28,13	27,83	27,68
12,0	35,35	34,09	33,76	33,40	33,22
Разность абсолютных деформаций, мм	2,13	0,87	0,54	0,18	–
Относительные деформации, %	6,03	2,55	1,60	0,54	0,00

Таблица 4

Сравнение прогибов балок при нелинейном расчете

Нагрузка, кН/м	Сечение балки				
	БК-1	БК-2	БК-3	БК-4	БК-5
2,0	1,08	1,03	1,02	1,00	0,99
4,0	3,25	3,10	3,06	3,00	2,96
6,0	6,52	6,21	6,11	5,99	5,93

Нагрузка, кН/м	Сечение балки				
	БК-1	БК-2	БК-3	БК-4	БК-5
8,0	11,43	10,83	10,63	10,39	10,25
10,0	18,30	17,26	16,93	16,52	16,27
12,0	27,76	26,21	25,69	25,04	24,62
Разность абсолютных деформаций, мм	3,14	1,59	1,07	0,42	–
Относительные деформации, %	11,31	6,07	4,17	1,68	0,00

По результатам расчетов конечно-элементных моделей балок с применением древесины, поврежденной огнем воздействием, по второй группе предельных состояний можно сделать следующие выводы:

При линейном расчете прогибы балок БК-1...БК-5 достигнут предельно допустимых при превышении равномерно- распределенной нагрузки 10,0 кН/м. Относительные деформации балок БК-1...БК-4 при этом составляют 0,54...6,03 % относительно прогибов эталонной балки БК-5.

При нелинейном расчете прогибы балок БК-1...БК-5 достигнут предельно допустимых при превышении равномерно- распределенной нагрузки 12,0 кН/м. Относительные деформации балок БК-1...БК-4 при этом составляют 1,68...11,31 % относительно прогибов эталонной балки БК-5.

Заключение

По результатам численных расчетов исследуемых балок с применением древесины, поврежденной огнем воздействием, установлено, что их снижение несущей способности относительно эталонных не превышает 11,72 %, а относительные деформации – 11,31 %, что делает применение таких балок возможным при пролетах не более 7,5 м и классах функционального назначения 2а

и 2б согласно ГОСТ 20850-2014. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-01579, <https://rscf.ru/project/22-29-01579/>.

Работа выполнена в рамках государственного задания в сфере научной деятельности Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема FZUN-2020-0015, госзадание ВлГУ).

Литература

1. Дунаев В. Ф. Закономерность изменения механических свойств древесины во времени при деформировании / В. Ф. Дунаев, В. И. Мелехов // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. Архангельск : САФУ, 2010. № 3. С. 101–109.

2. Влияние вида пожара на структуру и качество древесины сосны [Электронный ресурс] / Т. К. Курьянова, А. Д. Платонов, Н. Е. Косиченко, А. В. Макаров и др. // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета = Polythematic online scientific journal of Kuban State Agrarian University. – Краснодар : КубГАУ, 2011. № 10(074). С. 785–798.

3. Макаров А. В. Технические качества древесины пораженной различными видами пожара [Текст] / А. В. Макаров // Лесотехнический журнал. Воронеж, 2011. № 4. С. 14–18.

4. ГОСТ 20850-2014 «Конструкции деревянные клееные несущие. Общие технические условия» (введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 26 ноября 2014 г. № 1937-ст).

5. Лукина А. В., Лисятников М. С., Мартынов В. А., Черных А. Г., Рощина С. И. Механические и микроструктурные изменения сырьевой древесины, подверженной огневому воздействию / Architecture and Engineering. СПб: СПбГАСУ, 2022. № 7(3). С. 44–52.

6. СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85*. М.: РОССТАНДАРТ ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ», 2018. – 104 с.

7. СП 64.13330.2017. Деревянные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-25-80. М. : РОССТАНДАРТ ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ», 2017.

УДК 69.694

Данила Александрович Чибрикин,
ассистент
(Владимирский государственный
университет
имени А. Г. и Н. Г. Столетовых)
E-mail: dachibrikin@outlook.com

Danila Alexandrovich Chibrikin,
assistant lecturer
(Vladimir State
University)
E-mail: dachibrikin@outlook.com

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОБРАЗЦОВ ДРЕВЕСИНЫ, МОДИФИЦИРОВАННОЙ ПОЛИМЕРНЫМИ КОМПОЗИЦИЯМИ С НАНОСТРУКТУРНЫМ НАПОЛНИТЕЛЕМ

EXPERIMENTAL STUDIES OF WOOD SAMPLES MODIFIED BY POLYMER COMPOSITIONS WITH NANOSTRUCTURAL FILLERS

Повышение прочности несущих деревянных конструкций является важной задачей. В результате воздействия окружающей среды, нарушения условий эксплуатации несущая способность конструкций понижается. Одним из способов увеличения несущей способности является модификация конструкции полимерными композициями. В существующих технологиях недостаточно исследовано напряженно-деформированное состояние модифицированных несущих деревянных конструкций. Предлагается новая технология модификации деревянных несущих конструкций компонентным составом с углеродным наполнителем под давлением импульсного воздействия. В результате модификации деревянных несущих конструкций установлен технологический режим, при котором прочность увеличилась на 30–35 %.

Ключевые слова: полимерная композиция, модификация древесины, технологическая модификация.

Increasing the strength of load-bearing wooden structures is an important task. As a result of environmental impact, violation of operating conditions the load-carrying capacity of structures decreases. One of the ways to increase the bearing capacity is to modify the structure with polymer compositions. The stress-strain state of the modified load-bearing wooden structures is insufficiently investigated in the existing technologies. A new technology for modifying wooden load-bearing structures with a component composition with a carbon filler under pulse pressure is offered. As a result of modification of wooden load-bearing structures the technological regime is established, at which the strength increased by 30–35 %.

Keywords: polymer composition, wood modification, technological mod.

Введение

Вопрос повышения несущей способности элементов деревянных конструкций при создании новых технических и технологических решений является актуальной задачей. По результатам поиска применение новых технологий модифицирования деревянных конструкций в строительстве является актуальной задачей. Решение этого вопроса определило цель работы – повышение несущей способности элементов деревянных конструкций методом модифицирования специальным технологическим режимом. В России возводится большее количество объектов, в которых одним из основных материалов является древесина. К таким объектам относятся склады, ангары, а также жилые дома. Основные конструктивные элементы деревянных объектов: балки перекрытия и покрытия, деревянные стены, стропильная система крыши. В результате неправильных условий эксплуатации элементы конструкции быстро разрушаются и происходит потеря прочности и деструкция. Предполагается, что повышение несущей способности элементов деревянных конструкций модифицируется компонентным составом полимерной композиции с углеродным наполнителем.

4. Методика

В данной работе выполнены экспериментальные исследования модифицированных образцов древесины. Модификация производилась технологическим режимом 10-5-10-5-10 мин (в течение 10 минут образец подвергался нагнетанию полимерной композицией затем образец «отдыхал» 5 минут, затем повторялось нагнетанию полимерной композиции в течении 10 минут с чередованием) (рис. 1). Испытания на сжатие вдоль волокон производились на стандартных образцах по ГОСТ 16483.10-73 Древесина. Методы определения предела прочности при сжатии вдоль волокон. Испытания на сжатие поперек волокон производились на стандартных образцах по ГОСТ 16483.11-72 Древесина. Метод определения условного предела прочности при сжатии поперек волокон. Испытания на растяжение производились на стандартных образцах по ГОСТ 16483.23-73 Древесина. Метод определения предела прочности при растяжении вдоль волокон. Испытания на изгиб производились на стандартных образцах по ГОСТ 16483.3-84 Древесина. Метод определения

предела прочности при статическом изгибе. Испытания скалывание по радиальной плоскости производились на стандартных образцах по ГОСТ 16483.5-73. Древесина. Методы определения предела прочности при скалывании вдоль волокон. Испытания скалывание по тангентальной плоскости производились на стандартных образцах по ГОСТ 16483.5-73. Древесина. Методы определения предела прочности при скалывании вдоль волокон. Процесс испытания образцов представлен на рис. 2.



Рис. 1. Стандартные образцы для испытания на сжатие (без модификации и с модификацией)



Рис. 2. Процесс испытания образцов

5. Результаты

На стадии разрушения образцов уровень напряжений в древесине равен 22–23 % от временной прочности для древесины без модификации, и 30–35 % – с добавлением в композит наполнителя из углеродных нанотрубок.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-01637, <https://rscf.ru/project/22-29-01637/>

Работа выполнена в рамках государственного задания в сфере научной деятельности Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема FZUN-2020-0015, госзадание ВлГУ).

Литература

1. ГОСТ 27751–2014 «Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения». URL <https://internet-law.ru/gosts/gost/58469/?ysclid=ljzucpsm50567912608> (дата обращения 01.04.2023).
2. СП 64.13330.2017 «СНиП II-25-80 Деревянные конструкции»; II-25-80. М. : РОССТАНДАРТ ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ», 2017. URL <https://docs.cntd.ru/document/456082589?ysclid=ljzudvx8fz960262747> (дата обращения 01.04.2023).
3. *Acosta A. P., de Avila Delucis R., Amico S. C., & Gatto D. A.* (2021). Fast-growing pine wood modified by a two-step treatment based on heating and in situ polymerization of polystyrene. *Construction and Building Materials*, 302, 124422. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.124422/>
4. *Brauns J., Rocens K. & Lawal S. A.* (2018). Modification of Wood: Mechanical Properties and Application. Reference Module in Materials Science and Materials Engineering. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.11226-3/>
5. *Ermeydan M. A.* (2018). Modification of spruce wood by UV-crosslinked PEG hydrogels inside wood cell walls. *Reactive and Functional Polymers*, 131, 100–106. <https://doi.org/10.1016/J.REACTFUNCTPOLYM.2018.07.013/>
6. *Fang L., Chang L., Guo W. J., Chen Y. & Wang Z.* (2014). Influence of silane surface modification of veneer on interfacial adhesion of wood–plastic plywood. *Applied Surface Science*, 288, 682–689. <https://doi.org/10.1016/J.APSUSC.2013.10.098/>

УДК 691.413

Марина Алексеевна Кокина,
студент

Яна Игоревна Мотыка,
студент

Дарья Юрьевна Кутыева,
студент

Алексей Вячеславович Цуканов,
студент

(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный
университет)

*E-mail: kokina.marisha@mail.ru,
jnayana2002@gmail.com,
dasha143.33@gmail.com,
alexei.tzuchanov@mail.ru*

Marina Alekseevna Kokina,
student

Yana Igorevna Motika,
student

Darya Yurievna Kutyeva,
student

Alexei Viacheslavovich Tsukanov,
student

(Saint Petersburg
State University of Architecture
and Civil Engineering)

*E-mail: kokina.marisha@mail.ru,
jnayana2002@gmail.com,
dasha143.33@gmail.com,
alexei.tzuchanov@mail.ru*

ИСПЫТАНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ФИБРОЛИТА

TESTS OF PHYSICO-MECHANICAL CHARACTERISTICS OF FIBROLITE

Разработаны современные методики для проведения испытаний композиционных строительных материалов на основе портландцемента и древесины. Разработаны методики исследования физико-механических свойств фибролитовых плит из-за отсутствия нормирующей документации. Предложены методики испытаний фибролитовых плит. В данной работе рассматриваются актуальные методики для испытаний композитных материалов, а также выбраны соответствующие методики для проведения испытаний фибролитовых плит. При испытаниях были получены стабильные результаты фибролита на сжатие.

Ключевые слова: фибролит, фибролитовые плиты, композиционные материалы, плотность, предел прочности на сжатие, твердость.

Modern methods have been developed for testing composite building materials based on Portland cement and wood. Methods have been developed to study the physical and mechanical properties of fibrolite slabs due to the lack of regulatory documentation. Methods of testing fibrolite plates are proposed. In this paper, current methods for testing composite materials are considered, and appropriate methods for testing fibrolite plates are selected. Stable compression fibrolite results were obtained during the tests.

Keywords: fibrolite, fibrolite plates, composite materials, density, compressive strength, hardness.

Введение

Фибролит, как и арболит, цементно-стружечная плита и фиброцементная плита относятся к группе древесно-цементных материалов (композит). Такие материалы выполнены на основе древесины и цемента. Поэтому данная категория материалов считается экологичной, так как при ее производстве снижается выброс углекислого газа. Фибролитовые плиты состоят из легких, пористых древесных частиц, что улучшает его гигиенические свойства и приводит к оптимальному микроклимату в любое время года, а также повышает звукоизолирующие свойства.

Для эффективного применения фибролитовых плит в строительстве имеют большое значение такие свойства, как плотность, разбухание, водопоглощение, прочностные характеристики. В данной работе рассмотрены методики для испытания строительных композиционных материалов и предложены наиболее соответствующие испытания для фибролитовых плит.

Материалы и методы

В связи с отсутствием нормативной документации по методам испытания фибролитовых плит, встает вопрос о разработке нового стандарта. Срок действия ГОСТ 8929-81 «Фибролитовые плиты на портландцементе» окончился в 1992 году и новая редакция норм даже не стоит в плане на 2023 г. Также ГОСТ 8929-81 нормировал фибролитовые плиты плотность только до 500 кг/м^3 и предлагал использование только в качестве тепло- и звукоизоляционных материалов. На 2022 год компания GREEN BOARD предлагает плотность до 1050 кг/м^3 и применение не только как тепло- и звукоизоляционные материалы, а также в качестве несъемной опалубки, внутренней и внешней обшивки, сплошного настила, сборной стяжки, покрытия кровли, устройство межкомнатных перегородок, устройство бесчердачных кровель [1].

Для разработки методик были подобраны, а затем разработаны испытания для фибролитовых плит на основе действующих нормативных документов.

Для эффективного применения фибролитовых плит стоит учесть показатели свойств фибролита, такие как плотность, водопоглощение, равновесная влажность, гигроскопичность, разбухание, а также огне- и биостойкость.

ГОСТ Р 58941-2020 «Система обеспечения точности геометрических параметров в строительстве» регламентирует правила для выполнения линейных и угловых размеров строительных изделий следующим образом. Нормальными условиями измерений считаются:

- температуру окружающей среды – 20 °С (293 К);
- атмосферное давление – 101,3 кПа (760 мм рт. ст.);
- относительную влажность окружающего воздуха – 60 %;
- относительную скорость движения внешней среды – 0 м/с [2].

При условиях, отличающихся от приведенных в ГОСТ Р 58941-2020, нужно учесть величину отклонения действительных значений условий измерений от указанных для внесения поправок в результаты измерений.

Методика для контроля линейных размеров и формы на основании ГОСТ Р 58941-2020 «Система обеспечения точности в строительстве. Правила выполнения измерений. Элементы заводского изготовления» [3].

Для методики испытания плотности, влажности, а также водопоглощение фибролитовых плит в ГОСТ 8928-81 ссылаются на ГОСТ 17177 «Материалы и изделия строительные теплоизоляционные. Методы испытаний». Данная методика является действующей и будет применена для испытаний.

При определении величины разбухания фибролитовых плит применена методика ГОСТ 26816-2016 «Плиты цементно-стружечные. Технические условия» [4]. Фибролит относится к композитным материалам и поэтому данная методика подходит.

Предел прочности при изгибе определяется по методике определения предела прочности при изгибе композитного материала на основе ГОСТ 26816-2016 «Плиты цементно-стружечные. Технические условия» [4]. Данная методика заключается в том, что разрушение образца производится посредством сосредоточенной нагрузки, приложенной посередине пролета образца. Для испытания были отобраны образцы из плит с расположением волокон древесины вдоль, а вторая половина поперек.

Модуль упругости при изгибе фибролитовых плит не может быть произведен на основе ГОСТ 26816-2016 «Плиты цементно-стружечные. Технические условия», так как приведена методика определе-

ния предела прочности при изгибе для 3-х точечного изгиба. Для обеспечения значения модуля упругости, напряжения и реакции материала при изгибе подходит схема с 4-х точечным изгибом, потому что добавление дополнительной точки позволит часть образца плиты подвергнуть максимальному напряжению. Схема с 3-мя точками не сможет предоставить таких данных, так как материал будет находиться под центральной точкой нагружения. Данное различие имеет большую важность при изучении хрупких материалов, так как количество и тяжесть дефектов подвергаются максимальному напряжению, а это в свою очередь связано с прочностными характеристиками, а также может привести к образованию трещин. Поэтому для методики выбрана схема ГОСТ 33124-2014 [5]. Для испытания используется половина образцов с расположением древесных волокон вдоль, а другая поперек.

Для определения предела прочности при растяжении перпендикулярно к плоскости фибролитовых плит была выбрана методика определения предела прочности при изгибе на основе методик ГОСТ 26816-2016 «Плиты цементно-стружечные. Технические условия». Методика испытания включает в себя разрушение образца под воздействием сосредоточенной нагрузки, приложенной посередине пролета образца, по однопролетной схеме. Для испытания используется половина образцов с расположением древесных волокон вдоль, а другая поперек.

При определении прочности при сжатии перпендикулярно пласти фибролитовой плиты при 10 % линейной деформации подобрана методика из ГОСТ 17177-94 «Материалы и изделия строительные теплоизоляционные. Методы испытаний» [6]. Данная методика подходит для органических ячеистых теплоизоляционных материалов, к которым относится фибролит. Данный метод включает в себя измерение значений сжимающих усилий, который вызывает деформацию испытываемого образца по толщине на 10 % при соответствующих условиях испытаний. Результаты испытания приведены на рис. 1–3.

Данные результаты доказывают стабильные свойства фибролитовых плит плотностью 570 кг/м³, а также различных толщин от 15 мм до 35 мм.

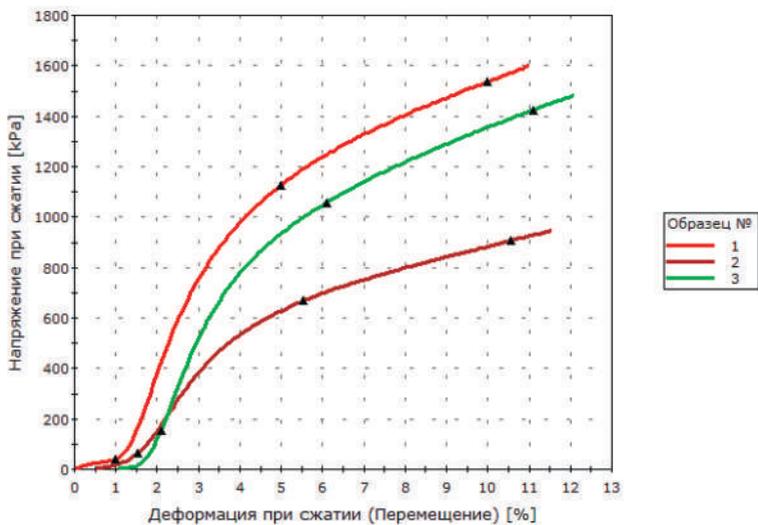


Рис. 1. Испытания образцов фибролитовых плит марки ФП 570 15 на сжатие

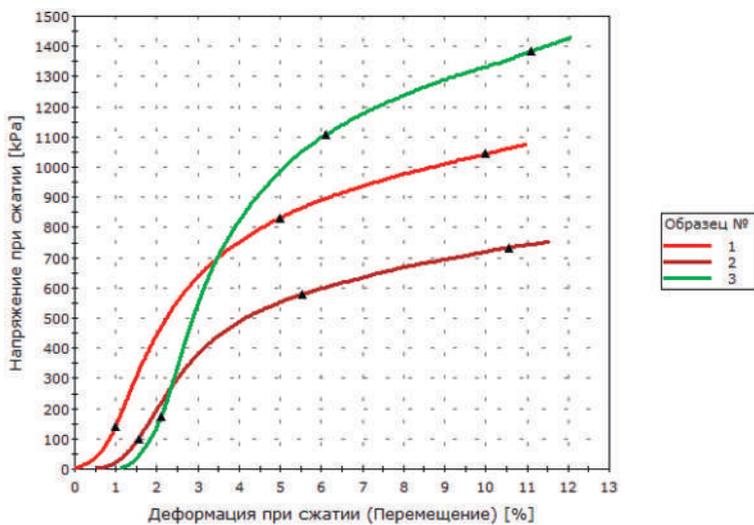


Рис. 2. Испытания образцов фибролитовых плит марки ФП 570 18 на сжатие

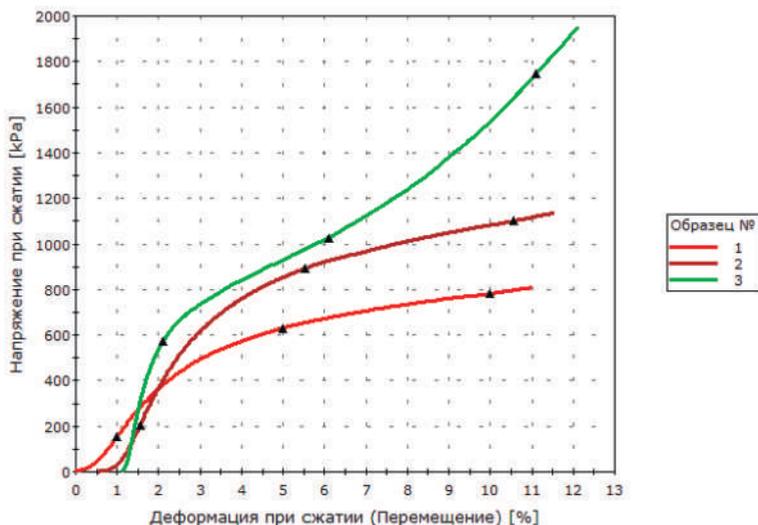


Рис. 3. Испытания образцов фибролитовых плит марки ФП 570 35 на сжатие

Для определения твердости фибролитовых плит была взята методика ГОСТ 11843-76 [7]. Для испытания используются образцы размером $50 \times 50 \times S$ мм, где S толщина образца, равная толщине плиты. Твердость древесностружечных плит определяют на пласти каждого отобранного образца в точке пересечения диагоналей. При испытании многпустотных плит не допускается расположение металлического шарика над пустотами.

При определении удельного сопротивления выдергиванию шурупов из пласти и кромки фибролитовых плит была использована методика на основе ГОСТ 10637-78 [8]. При возрастании удельного давления прессования прочность композиционного материала из древесно-цементного состав возрастает. Для рационального использования, работающие на сжатие и изгиб несущие ограждающие конструкции из древесно-цементных материалов, проектировать комплексными, например, трехслойными. Такие конструкции будут обладать тепло-техническими, прочностными и деформационными свойствами [9].

При производстве строительных конструкций, как правило, возникает проблема в обеспечении большой несущей способности соединений на малых площадях [10].

Развитие норм проектирования позволит расширить спектр применения материала в строительстве, а развитие технологий изготовления – снизить стоимость готовой продукции [11].

Результаты

В результате физико-механических испытаний можно сделать выводы о свойствах изучаемых нами фибролитовых плит, взяв за основу заявленные стандарты организации производителя (СТО 16000924–001–2018) [12].

Исследуемые нами марки фибролитовых плит эффективно себя показали в испытаниях на влажность и водопоглощение. Данные характеристики соответствуют заявленным в СТО 16000924-001–2018 [12].

Характеристики, не соответствующие заявленным:

- Плотность у марки ФП400 (50) (в заявленных характеристиках производителя плотность 400, 450 и 570 кг/м³ соответственно, допускается отклонение 10 %;
- Разбухание у марок ФП400 (35) и ФП450 (35) (в заявленных характеристиках производителя разбухание не более 2 %);
- Предел прочности при изгибе у марки ФП400 (50) (в заявленных характеристиках производителя предел прочности при изгибе не менее 1,3 МПа.);
- Модуль упругости у марки ФП400 (50) (в заявленных характеристиках производителя модуль упругости при изгибе не должен быть менее 239 МПа.);
- Удельное сопротивление выдергиванию шурупов у марок ФП400 (50) и ФП450 (35) (в заявленных характеристиках производителя удельное сопротивление выдергиванию шурупов из листа 6,4 Н/мм).

Предел прочности при растяжении перпендикулярно к плоскости плиты, прочность при сжатии и твердость производителем не нормировались.

При испытаниях фибролитовые плиты показали себя, как крепкий и прочный материал. Дальнейшее изучение его свойств и характеристик поможет наиболее эффективно применять его.

Заключение

Следующим этапом на пути нормирования требований к фибролиту и конструкциям на его основе станет разработка ГОСТ и внесение материала в СП 64.13330.2017.

Литература

1. Альбом технических решений [Электронный ресурс]– URL: <https://greenboard.ru/images/documents-files/dokumenty-i-sertifikaty/Альбом%20технических%20решений.pdf>(дата обращения: 17.01.2023).
2. ГОСТ Р 58941-2020 «Система обеспечения точности геометрических параметров в строительстве» [Электронный ресурс]– URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200174482>(дата обращения: 17.01.2023).
3. ГОСТ Р 58941-2020 «Система обеспечения точности в строительстве. Правила выполнения измерений. Элементы заводского изготовления» [Электронный ресурс]– URL:<https://docs.cntd.ru/document/1200174482> (дата обращения: 17.01.2023).
4. ГОСТ 17177 «Материалы и изделия строительные теплоизоляционные. Методы испытаний» [Электронный ресурс]– URL: <https://docs.cntd.ru/document/901710454> (дата обращения: 17.01.2023).
5. ГОСТ 33124-2014 «Брус многослойный из шпона. Технические условия» [Электронный ресурс]– URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200115862> (дата обращения: 17.01.2023).
6. ГОСТ 17177-94 «Материалы и изделия строительные теплоизоляционные. Методы испытаний» [Электронный ресурс]– URL: <https://docs.cntd.ru/document/901710454> (дата обращения: 17.01.2023).
7. ГОСТ 11843-76* (СТ СЭВ 4189-83) «Плиты древесностружечные. Метод определения твердости» [Электронный ресурс]– URL:<https://docs.cntd.ru/document/1200017700> (дата обращения: 17.01.2023).
8. ГОСТ 10637-78 «Плиты древесностружечные. Метод определения удельного сопротивления выдергиванию гвоздей и шурупов» [Электронный ресурс]– URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200012676> (дата обращения: 17.01.2023).
9. Цапаев, В.А. Длительная прочность и деформативность конструкционных древесно-цементных материалов и несущих элементов на их основе: дисс. ... д-р техн. наук:05.23.01/ В. А. Цапаев; Нижегород. арх.-строит. университет. Н. Новгород, 2001. – 481с.
10. Методы исследования соединений деревянных конструкций на когтевых шпонках/ А. Г. Черных, Е. Данилов// Современные проблемы науки и образования.2013. № 2. С. 150.
11. Обзор исследований, нормирования и применения *LVL*, бруса в отечественной и зарубежной строительной практике /А. Г. Черных, Е. В. Данилов, П. С. Коваль, Ш. М. Мамедов// Вестник гражданских инженеров. 2020. № 4(81). С. 89–99.
12. СТО 16000924–001–2018 «Фибролитовые плиты в строительстве, отделке и акустике. Альбом технических решений» [Электронный ресурс]– URL: <https://www.tophouse.ru/brochures/albom-teh-resheniy-31052022-154345.pdf> (дата обращения: 17.01.2023).

УДК 694.14

Александр Григорьевич Черных,
д-р техн. наук, профессор
Сюй Цзяньгуан,
аспирант
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный
университет)
E-mail: chagrig@spbgasu.ru,
1173881571@qq.com

Alexander Grigoryevich Chernykh,
Dr. Sci. Tech., Professor
Xu Jianguang,
postgraduate student
(Saint Petersburg State
University of Architecture
and Civil Engineering)
E-mail: chagrig@spbgasu.ru,
1173881571@qq.com

ИССЛЕДОВАНИЕ НДС ПРИ СДВИГЕ ПЕРЕКРЕСТНЫХ СЛОЕВ CLT-ПАНЕЛЕЙ

INVESTIGATION OF VAT WHEN SHIFTING CROSS LAYERS OF CLT PANELS

Характеристики сдвига при качении ортотропной клееной древесины являются ключом к проектированию и применению конструкций из ортотропной клееной древесины. В сочетании с существующими результатами исследований, влияющие факторы, методы испытаний, режимы повреждений и численные модели сдвига при качении ортотропной клееной многослойной древесины анализируются с помощью с использованием конечно-элементного моделирования ANSYS. Также сделаны предложения по существующим проблемам в исследовании сдвиговых свойств ортотропной клееной древесины.

Ключевые слова: элемент CLT, работа на сдвиг при качении, ansys, анализ методом конечных элементов.

The shear characteristics of orthogonal plywood wood during rolling are key to the design and application of orthogonal plywood wood structures, and are currently one of the research directions in this field. Based on existing research results, the ANSYS finite element model was used for shear analysis to analyze the influencing factors, experimental methods, damage modes, and numerical shear models during the rolling process of orthogonal heterogeneous plywood multi-layer wood. Suggestions were also made for the problems in the study of shear performance of orthogonal heterogeneous plywood.

Keywords: CLT element, Shear work during rolling, ansys, finite element analysis.

Введение

CLT, как правило, представляет собой деревянный продукт, изготовленный из ламинированных ортогональных слоев толщиной от 15 до 45 мм, склеенных между собой [1]. Впервые разработанная в качестве строительного материала в Австрии и Германии

в 1990-х годах [2], CLT является легким и высокопрочным материалом, в полной мере реализуя такие преимущества, как высокое отношение прочности к весу древесины, легкость модульного производства, короткий цикл строительства, хорошие сейсмические, акустические и теплоизоляционные и пожарные характеристики, а также удобство и красота [3-4]. Дерево является ортотропным анизотропным материалом, и возникновение сдвиговых напряжений может повлиять на изменение общего прогиба панелей CLT и их механические свойства.

С ростом зрелости технологии обработки CLT-плит ученые из разных стран провели множество исследований по влияющим факторам сдвига при прокатке CLT, методам испытаний на сдвиг при прокатке CLT, численному моделированию сдвига при прокатке CLT и режимам повреждения. В данной статье будет проведен анализ методом конечных элементов в Ansys для характеристик сдвига при прокатке CLT и представлен прогноз будущих исследований характеристик сдвига при прокатке CLT.

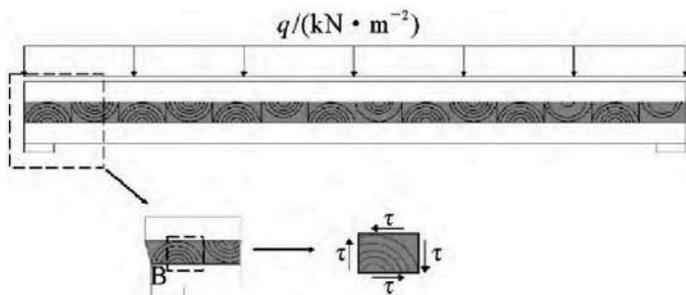


Рис. 1. Схематическая диаграмма нагружения в плоскости и напряжений сдвига качения в 3-этажном CLT при равномерной нагрузке

1. Исследование влияющих факторов на характеристики сдвига при прокатке CLT

Различные технологические параметры в процессе подготовки CLT могут влиять на его свойства сдвига при прокатке, а процесс CLT включает выбор материала, строгание поверхности, резку, склеивание, формование, прессование и последующую обработку, и влияющие факторы в основном делятся на три категории в зависимости

от процесса подготовки CLT: во-первых, материал древесного ламината, такой как хвойная и широколиственная древесина, ранняя и поздняя древесина, а также дефекты древесины; во-вторых, структурные характеристики, такие как направление волокой древесины, толщина CLT, отношение ширины к толщине и отношение высоты пролета и т.д. Второе – структурные характеристики, такие как направление годовых колец, расстояние между сердцевинами, толщина ламината CLT, отношение ширины к толщине и отношение пролета к высоте; третье – процесс обработки, давление прессования, клей и количество нанесенного клея.

2. Методы испытания на сдвиг при сжатии

Методы испытания на сдвиг при сжатии первоначально основывались на размещении древесины между двумя стальными пластинами, согласно EN 789^[5], EN 408^[6] и ASTM D2718^[7], но поскольку было трудно изучить влияние плотности, метода распиловки и т. д. на характеристики сдвига при прокатке CLT, эти методы были усовершенствованы путем замены двух стальных пластин на древесину, причем все три слоя были деревянными, согласно таким стандартам, как EN 16351 на основе метода испытания на сдвиг при сжатии EN 408 и P. Fellmoser et al и M. Gong et al на основе метода испытания ASTM D2718 для трехслойных сэндвич-конструкций.

Эти пять методов испытаний имеют разные устройства, разные размеры материала и разные углы нагрузки. Кроме того, существуют различия в углах нагружения, которые указаны для того, чтобы избежать эксцентрической нагрузки (эксцентрическая нагрузка вызывает поперечные напряжения в CLT, основанные на напряжениях сдвига при качении). EN 408 указывает, что угол между направлением нагрузки и продольной осью образца должен составлять 14°, ASTM D2718 указывает минимальный угол от 3° до 25°, EN 16351 использует угол нагрузки $\alpha = 14^\circ$, а угол для метода испытания трехслойной сэндвич-структуры рассчитывается по уравнению (1).

$$\alpha = \tan^{-1} \left[\frac{L - \sqrt{L^2 - 4t_0(t_0 + t_{\text{cross}})}}{2t_0} \right] \cdot \frac{180}{\pi}$$

где α – угол наклона образца при нагрузке; L – длина образца; t_{cross} – толщина поперечного слоя образца; t_0 – толщина внешнего слоя образца.

В методе испытания на сдвиг при сжатии прочность материала при сдвиге при прокатке, а также модуль сдвига при прокатке рассчитываются по уравнениям (2) и (3) соответственно.

$$G = \frac{t_{\text{cross}}}{L \cdot \omega} \cdot \frac{F}{\Delta} \cdot \cos(\alpha) \quad (2)$$

$$\tau = \frac{F_{\text{max}} \cdot \cos(\alpha)}{L \cdot \omega} \quad (3)$$

где: t_{cross} – толщина поперечного слоя образца/мм; L – длина образца/мм; ω – ширина образца/мм; α – угол наклона устройства/град; $\frac{F}{\Delta}$ – наклон кривой нагрузка-перемещение в пределах пропорциональности; F_{max} – предельная нагрузка/Н.

3. Режим разрушения при сдвиге при прокатке CLT

Когда панель CLT подвергается вертикальной нагрузке, на границе ранней и поздней древесины образуется поверхность трения из-за разной величины сдвиговых напряжений в ранней и поздней древесине, что приводит к перекачиванию древесных волокон в монослое и, в конечном итоге, к сдвиговой деформации^[8]. Различные типы образцов подвергаются различным видам повреждений во время испытаний на сдвиг при качении^[8], и большое количество экспериментальных исследований показало, что существует четыре вида повреждений при сдвиге при качении CLT, а именно: повреждения вдоль направления древесных волокон, повреждения вдоль годовых колец, повреждения вдоль годовых колец и лучей древесины одновременно и повреждения клеевого слоя (рис. 2).

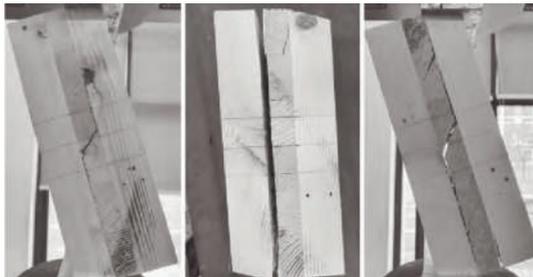


Рис. 2. CLT. Разрушение режима сдвига прокатки

Х. Nie^[8] показал, что начальное повреждение поперечного слоя CLT вызвано напряжением сдвига при качении или межслойным напряжением, и обнаружил, что ориентация годовых колец поперечного слоя связана с характером повреждения. Z. Wang и другие^[11] пришли к выводу, что повреждение при сдвиге при качении материала CLT происходит в основном на стыке ранней и поздней древесины в поперечном сечении, а также в таких слабых прогностных местах, как лучи и сердцевина. Это связано с тем, что ранняя древесина рыхлая и мягкая, с большими клеточными полостями и тонкими стенками, в то время как поздняя древесина твердая, с маленькими клеточными полостями и толстыми стенками, что делает ее восприимчивой к повреждению при сдвиге качения, когда древесина сдвигается поперек волокон. Кроме того, лучи древесины состоят из тонкостенных клеток, которые являются тонкостенными и склонными к повреждениям при сдвиге, а низкая прочность сердцевины также подвержена растрескиванию. В будущем можно провести дальнейшие исследования для улучшения характеристик сдвига при скалывании плит CLT на основе модели повреждения при сдвиге CLT.

4. Анализ методом конечных элементов характеристик сдвига при прокатке CLT

При испытаниях на сдвиг при качении и высокой стоимости CLT, все больше ученых используют численное моделирование для анализа НДС. Из-за большого количества влияющих на испытания факторов и неопределенности результатов испытаний, для основных доминирующих факторов проводится численное моделирование [11]. Древесина обычно упрощается как однородный непрерывный ортогональный анизотропный материал, и в качестве древесины используются три образца CLT толщиной 20 мм (см. рис. 3), а клеевые слои моделируются с помощью клеевых блоков. Внутренняя связь древесины была выбрана как упруго-пластическая модель или упруго-пластическая модель повреждения, и древесина рассматривалась как ортотропный анизотропный упругий материал в упругой фазе; нелинейное силовое поведение древесины было определено с помощью критерия текучести Хилла и идеальной упруго-пластической модели [12,13], а критерий повреждения древесины при

растяжении и сдвиге был определен с помощью модифицированного критерия повреждения Хашина [14] использовал анализ методом конечных элементов для получения распределения напряжений сдвига (рис. 3), общей деформации и эквивалентной силы (рис. 4), когда образец подвергался воздействию силы (рис. 5).

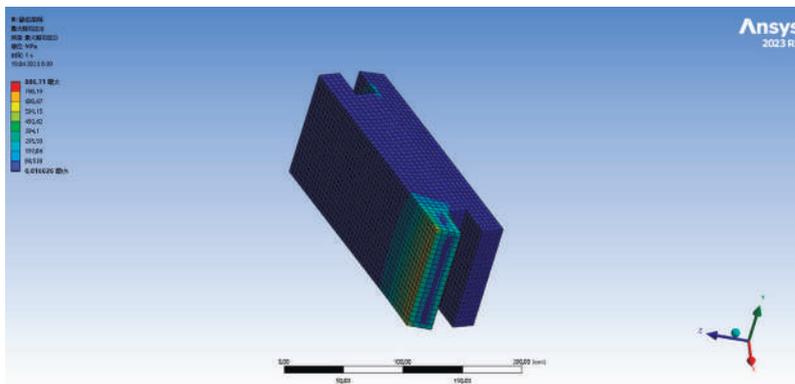


Рис. 3. Моделирование максимального напряжения сдвига в конструкциях CLT

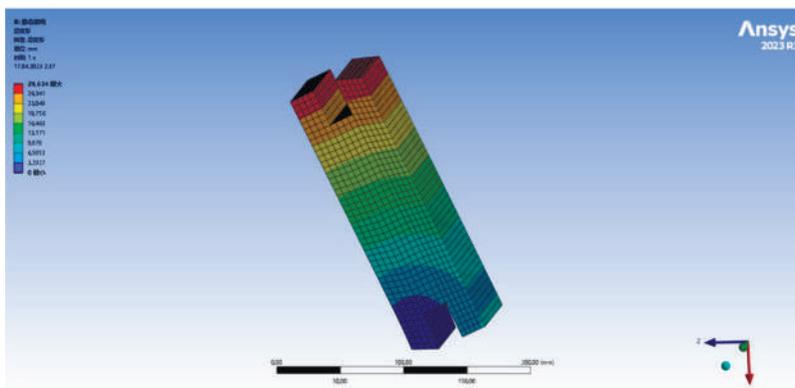


Рис. 4. Моделирование общей деформации компонентов CLT

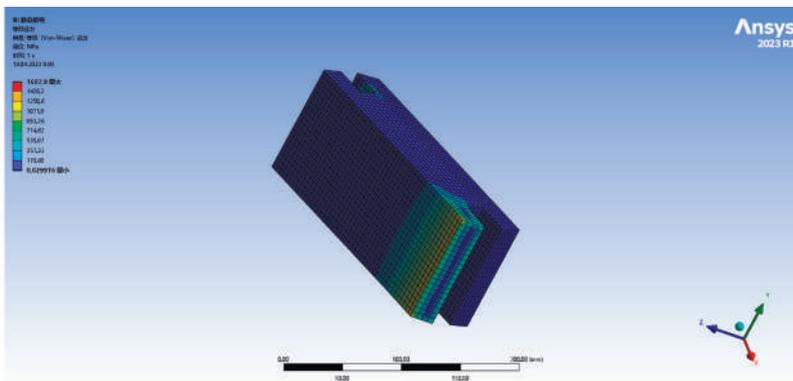


Рис. 5. Схема моделирования эквивалентной силы компонентов CLT

Заключение

CLT — это новый вид инженерной древесины, при воздействии внеплоскостной нагрузки прочность CLT на сдвиг при качении мала, и характеристики сдвига при качении влияют на общую структурную прочность CLT, поэтому особенно важно точно оценить и улучшить прочность на сдвиг при качении.

На основании анализа методом конечных элементов были сделаны следующие выводы: максимальная деформация наблюдается в верхней части элемента, и чем дальше вниз по элементу, тем меньше деформация. Эквивалентная упругая деформация и максимальное напряжение сдвига наибольшие вблизи неподвижного конца и относительно небольшие в других местах. Максимальная деформация составляет 29,634 мм, что указывает на то, что произошло повреждение при сдвиге.

Литература

1. Министерство жилищного строительства и городского и сельского развития Китайской Народной Республики. Кодекс для проектирования деревянных конструкций: GB 50005-2017 [S]. Пекин: Издательство строительной промышленности Китая, 2010.
2. Karacabeyli E., Gagnon S. Канадский справочник по CLT-конструкциям [M]. Квебек, Канада: FPInnovations, 2019.

3. *Wang Yunlu, Cao Yu, Wang Zheng, et al.* Новое поколение технологии сверхпрочных деревянных конструкций CLT в стране и за рубежом. Прогресс исследований нового поколения технологии сверхпрочных деревянных конструкций CLT в стране и за рубежом [J]. *Journal of Northwest Forestry College*, 2017, 32(2): 286-293.
4. *Lu Yao, Li Minmin, Wang Zheng, et al.* Механические свойства 3-слойных ортотропных фанерных конструкций из болиголова [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2018, 33(6): 231–235.
5. EN 789. Деревянные конструкции – методы испытаний – определение механических свойств древесных плит [S].
6. *Ансари В., Гуан З. В., Китамори А., Юнг К., Комацу К.* Структурные свойства деревянных балок из склеенного слоя, предварительно напряженных сжатой древесиной [J]. *Строительные и строительные материалы*, 2012, 29.
7. ASTM D 2718 – 2000, метод испытаний для плоского сдвига (роликовые ножницы) структурных силовых панелей [S].
8. *Ли Минхао, Донг Вэньчен, Линь Сяньси.* Влияние соотношения сторон слоя и методов испытаний на оценку прочности скользящего сдвига кросс – ламинированной древесины [J]. *Журнал материалов гражданского строительства*, 2019, 31 (12).
9. *Ван Чжэцян, Фу Хунмэй, Ло Хуань, Донг Вэйцюнь, Ло Цзянь, Лу Сяонин.* Скоростной тополь поперечного слоя ортогонального склеенного дерева характеристики скользящего сдвига [J]. *Журнал Нанкинского технологического университета (версия естественных наук)*, 2016, 38 (05): 116 – 120.
10. *Ян Инь.* Исследование механизма разрушения при прокрутке и сдвиге ортогонального склеенного дерева на основе технологии акустической эмиссии [D]. *Нанкинский университет лесного хозяйства*, 2020.
11. *Цян Цзяньхуа, Чжао Пэнсян, Чэнь Гоцзянь.* Исследования по дистанционному зондированию на основе NDVI для мониторинга роста естественных лесов сосны нефти [J]. *Журнал Северо – Западного лесного института*, 2007 (01): 149 – 151 + 172.
12. *Правильно. Горы Теория текучести и пластического потока анизотропных металлов [J]. Журнал Лондонского королевского общества. Серия А, Математика и Физические науки*, 1948193 (1033).
13. *Ван Минцян, Сун Сяобин, Гу Сянлинь.* Древесина не основана на трехмерной модели пластического повреждения снаряда Линейный анализ [J]. *Журнал гражданского строительства*, 2018, 51 (7): 22 – 28, 49.
14. *Hashin Z.* Критерии отказа для композиционных материалов из односторонних волокон [J]. *Журнал прикладной механики*, 1980, 47 (2).

УДК 692.52

Дмитрий Валерьевич Тихомиров,
студент
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный
университет)
E-mail: hypersinus@yandex.ru

Dmitriy Valerievich Tihomirov,
student
(Saint Petersburg
State University of Architecture
and Civil Engineering)
E-mail: hypersinus@yandex.ru

РАСЧЕТ ПЕРЕКРЫТИЯ ИЗ ДПК, ОПИРАЮЩЕГОСЯ ПО ЧЕТЫРЕМ СТОРОНАМ, С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕОРИИ ИЗГИБА ПЛАСТИН

CALCULATION OF THE CLT FLOOR BASED ON FOUR SIDES USING THE THEORY OF BENDING OF PLATES

В работе показана последовательность расчета плиты междуэтажного перекрытия из ДПК (CLT) размером 6×6 м, опирающейся шарнирно по четырем сторонам на систему из несущих балок, с использованием теории изгиба анизотропных пластин. Плита перекрытия составлена из двух плит шириной по три метра с соединением стыка между ними одним из описанных способов, которое обеспечивает равную прочность с основным материалом плит. Определяются внутренние изгибающие моменты и нормальные напряжения, вызванные этими усилиями, определяются геометрические характеристики поперечного сечения плиты перекрытия. Показано, что расчет перекрытия по схеме изгибающейся пластины дает значения внутренних усилий на 30 % меньше значений усилий, получаемых при расчете плиты перекрытия как балки. Дается заключение по определению прочностных характеристик плит из ДПК.

Ключевые слова: ДПК, перекрытие, анизотропные пластины, изгиб, ортотропность.

The paper shows the sequence of calculation of a floor slab made of CLT 6x6 m in size, hinged on four sides on a system of load-bearing beams, using the theory of anisotropic plate bending. The floor slab is made up of two slabs three meters wide each with a joint between them using one of the described methods, which provides equal strength with the base material of the slabs. The internal bending moments and normal stresses caused by these forces are determined, the geometric characteristics of the cross section of the floor slab are determined. It is shown that the calculation of the floor according to the scheme of the bending plate gives the values of internal forces 30 % less than the values of the forces obtained when calculating the floor slab as a beam. A conclusion is given on the determination of the strength characteristics of CLT plates.

Keywords: CLT, floor, anisotropic plates, bending, orthotropy.

Размеры выпускаемых отечественной промышленностью плит из перекрестноклееной древесины (CLT, ДПК) ограничены по ширине до 3,6–3,8 м, по длине – до 18 м [1, 2]. Ограничения по ширине связаны с возможностями производства и возможностями транспортировки материалов до строительной площадки.

В связи с ограничением по ширине плиты возникают проблемы по восприятию полезной нагрузки во вторичном направлении плиты, что приводит к недоиспользованию несущей способности перекрытий, составленных из нескольких плит. За рубежом эта проблема привлекает исследователей и там ведутся работы по разработке способов крепления стыков между плитами [3, 4]. Ниже на рис. 1–3 представлены некоторые типы креплений стыков.

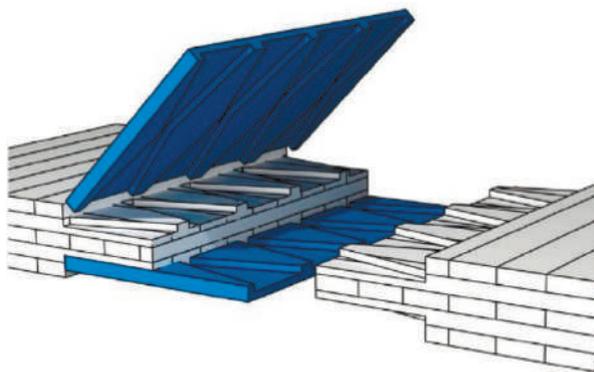


Рис. 1. Соединение шип-паз

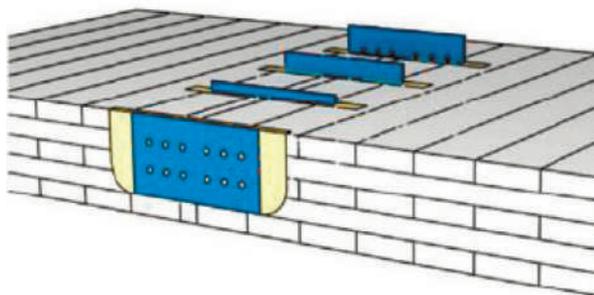


Рис. 2. Соединение с помощью вклеенных пластин

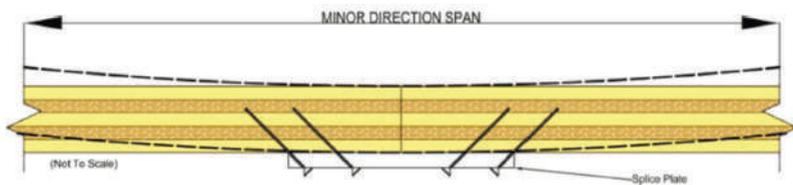


Рис. 3. Соединение пластинами с саморезами

Эти соединения показывают высокую надежность и способность распределять нагрузку между плитами вдоль направления ширины плит и имеют почти одинаковую прочность в сравнении с материалом плит. Использование таких соединений позволяет создать условия для пространственной схемы работы перекрытий из ДПК (работа по схеме пластины), и таким образом полностью использовать несущую способность плит.

Учет в расчетах перекрытий из ДПК изгиба по двум направлениям, который фактически возникает при эксплуатации перекрытий, составленных из нескольких плит с применением равнопрочного крепления стыка между ними, позволит точнее обосновать размеры применяемых плит ДПК.

Учет этого явления производится с применением теории изгиба анизотропных пластин. Главными условиями применения этой теории являются отношение толщины пластины к другому ее наименьшему размеру не более 0,2 и отношение сторон пластины в плане не более 2 [5–8].

Произведем расчет внутренних изгибающих моментов в перекрытии из ДПК. В качестве примера рассмотрим перекрытие общественного здания размером 6х6 м, опирающееся шарнирно по всем четырем сторонам на систему несущих балок. Перекрытие состоит из двух половин размером 3×6 м, которые соединены между собой одним из указанных выше способов. Стык считаем равнопрочным с основным материалом плит. Толщина плиты 165 мм, плита состоит из 5 равных слоев толщиной по 33 мм.

Исходные данные для расчета (приняты по СП 64.13330.2017 [9, 10])

Материал плиты – сосна плотностью 500 кг/м³;

Класс прочности древесины – С27;

Модуль упругости при изгибе (вдоль волокон) $E_{0, cp} = 11,5 \cdot 10^9$ Па;

Модуль упругости поперек волокон $E_{90, cp} = 0,38 \cdot 10^9$ Па;

Модуль сдвига $G_{cp} = 0,72 \cdot 10^9$ Па;

Коэффициент Пуассона поперек волокон при напряжениях, направленных вдоль волокон $\nu_{90,0} = 0,45$;

Коэффициент Пуассона вдоль волокон при напряжениях, направленных поперек волокон $\nu_{0,90} = 0,015$.

На рис. 4 и 5 представлены схема перекрытия и поперечное сечение плиты.

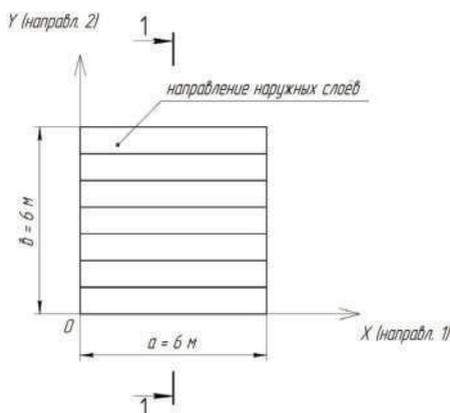


Рис. 4. Схема рассчитываемого перекрытия



Рис. 5. Поперечное сечение перекрытия из ДПК

Для решения задачи необходимо решить уравнение Софи Жермен для ортотропной пластины (1) [6 – 8].

$$D_1 \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2D_3 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + D_2 \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = q \quad (1)$$

где D_1 – изгибная жесткость пластинки в направлении оси X ; D_2 – изгибная жесткость пластинки в направлении оси Y ; D_3 – главная жесткость пластины; q – равномерно распределенная по поверхности пластины нагрузка.

После нахождения решения уравнения внутренние изгибающие моменты определяются по формулам [6 – 8]:

$$\left. \begin{aligned} M_x &= -D_1 \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu_2 \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \\ M_y &= -D_2 \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu_1 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где M_x – изгибающий момент, действующий на сечение, перпендикулярное оси X ; M_y – изгибающий момент, действующий на сечение, перпендикулярное оси Y .

Решение уравнения (1) выглядит следующим образом [6, 7]:

$$w(x, y) = \frac{16q}{\pi^6} \sum_{m=1,3,\dots}^{\infty} \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \frac{\sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b}}{mn \left(D_1 \frac{m^4}{a^4} + 2D_3 \frac{m^2 n^2}{a^2 b^2} + D_2 \frac{n^4}{b^4} \right)}$$

Взяв частные производные по x и y от выражения (3) и подставив их в уравнения (2), получим выражения для изгибающих моментов M_x и M_y .

$$\begin{aligned} M_x(x, y) &= D_1 \frac{16q}{\pi^6} \sum_{m=1,3,\dots}^{\infty} \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \times \\ &\times \frac{\sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} \left(\left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 + \nu_2 \left(\frac{n\pi}{b} \right)^2 \right)}{mn \left(D_1 \frac{m^4}{a^4} + 2D_3 \frac{m^2 n^2}{a^2 b^2} + D_2 \frac{n^4}{b^4} \right)} \end{aligned} \quad (4)$$

$$M_y(x, y) = D_2 \frac{16q}{\pi^6} \sum_{m=1,3,\dots,n}^{\infty} \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \times$$

$$\frac{\sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} \left(\left(\frac{n\pi}{b} \right)^2 + \nu_1 \left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 \right)}{mn \left(D_1 \frac{m^4}{a^4} + 2D_3 \frac{m^2 n^2}{a^2 b^2} + D_2 \frac{n^4}{b^4} \right)} \quad (5)$$

Далее по методике, приведенной в [7, с. 162], для многослойной пластины, составленной из ортотропных слоев, рассчитываем значения жесткостей нашего перекрытия D_1, D_2, D_3 и коэффициентов Пуассона ν_1 и ν_2 для решения уравнений (2)–(5).

На рис. 6 изображена схема сечения для расчета характеристик плиты по методике [7].

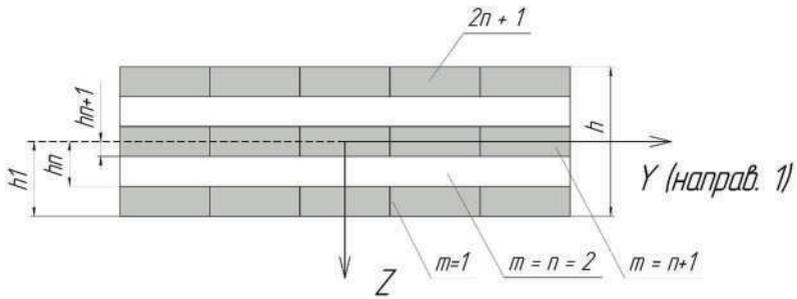


Рис. 6. К расчету характеристик плиты по методике [7]

Характеристики $D_1, D_2, D_3, D_k, \nu_1, \nu_2$ для многослойной пластины с нечетным количеством однородных ортотропных слоев, расположенных симметрично относительно среднего слоя, см. рис. 6, определяются по формулам (6) [7]:

$$\begin{aligned}
D_1 &= \frac{2}{3} \left[\frac{E_1^{n+1} h_{n+1}^3}{1 - \nu_1^{n+1} \nu_2^{n+1}} + \sum_{m=1}^n \frac{E_1^m}{1 - \nu_1^m \nu_2^m} (h_m^3 - h_{m+1}^3) \right] \\
D_2 &= \frac{2}{3} \left[\frac{E_2^{n+1} h_{n+1}^3}{1 - \nu_1^{n+1} \nu_2^{n+1}} + \sum_{m=1}^n \frac{E_2^m}{1 - \nu_1^m \nu_2^m} (h_m^3 - h_{m+1}^3) \right] \\
D_3 &= D_1 \nu_2 + 2D_k \\
D_k &= G^{n+1} h_{n+1}^3 + \sum_{m=1}^n G^{n+1} (h_m^3 - h_{m+1}^3) \\
\nu_2 &= \nu_1 \frac{D_2}{D_1} \\
\nu_1 &= \frac{2}{3D_2} \left[\frac{E_2^{n+1} \nu_1^{n+1} h_{n+1}^3}{1 - \nu_1^{n+1} \nu_2^{n+1}} + \right. \\
&\quad \left. + \sum_{m=1}^n \frac{E_2^m \nu_1^m}{1 - \nu_1^m \nu_2^m} (h_m^3 - h_{m+1}^3) \right]
\end{aligned} \tag{6}$$

где $2n + 1$ – число слоев (крайние слои имеют номера 1 и $2n + 1$, средний слой имеет номер $n + 1 - m$ – *ый* по счету); h – полная толщина пластины; $h_1, h_2, h_n \dots, h_{n+1}$ – расстояния от срединной плоскости до границ слоев (рис. 6); $E_1^m, E_2^m, \nu_1^m, \nu_2^m, G^m$ – модули Юнга, коэффициенты Пуассона, модуль сдвига для слоя с номером m вдоль направлений 1 и 2.

Найденные значения сведены в табл. 1.

Таким образом получаем как бы однослойную ортотропную изгибающуюся пластину с характеристиками D_1, D_2, D_3 и коэффициентами Пуассона ν_1 и ν_2 . Моменты определяются по формулам (2), (4), (5), а прогиб по формуле (3).

Расчет условной нагрузки q на перекрытие здания приведен в табл. 2. Сбор нагрузок произведен как для общественного здания с офисами в соответствии с СП 20.13330.2016 [11].

Таблица 1

**Жесткости и коэффициенты Пуассона перекрытия 6×6 м
из 5-слойной плиты CLT толщиной 165 мм**

Величина	Значение	Размерность	Определение
D_1	$3,46 \cdot 10^6$	Н*м	Изгибная жесткость вдоль оси X (напр. 1)
D_2	$1,01 \cdot 10^6$	Н*м	Изгибная жесткость вдоль оси Y (напр. 2)
D_k	$2,7 \cdot 10^5$	Н*м	Жесткость кручения
ν_1	0,064		коэф. Пуассона по оси Y (напр. 2) при напряжениях вдоль оси X (напр. 1)
ν_2	0,019		коэф. Пуассона по оси X (напр. 1) при напряжениях вдоль оси Y (напр. 2)
D_3	$6,04 \cdot 10^5$	Н*м	Главная изгибная жесткость

Таблица 2

Сбор нагрузок на перекрытие

№	Наименование	Нормативное значение нагрузки, кН/м ²	Коэффициент надежности по нагрузке γ_f	Расчетное значение нагрузки, кН/м ²
<i>Постоянная нагрузка</i>				
1	Паркетная доска, 15 мм	0,09	1,1	0,1
2	Цементно-песчаная смесь, 50 мм	0,87	1,3	1,13
3	Звукоизоляция, 20 мм	0,02	1,2	0,024
4	Теплоизоляция из керамзита, 50 мм	0,15	1,3	0,19
5	CLT-панель, 165 мм, плотность 5 кН/м ³	0,83	1,1	0,91
Итого:		1,96		2,35
<i>Временная нагрузка</i>				
1	Полезная нагрузка (офисные помещения обществ. зданий)	2	1,2	2,4
Итого: постоянная + временная		3,96		4,75

Собрав все данные, входящие в уравнение (1), рассчитаем значения изгибающих моментов $M_x(x, y)$ и $M_y(x, y)$ для центра плиты перекрытия с координатами центра $x = a/2 = 3$ м и $y = b/2 = 3$ м, где возникают максимальные усилия (рис. 7).

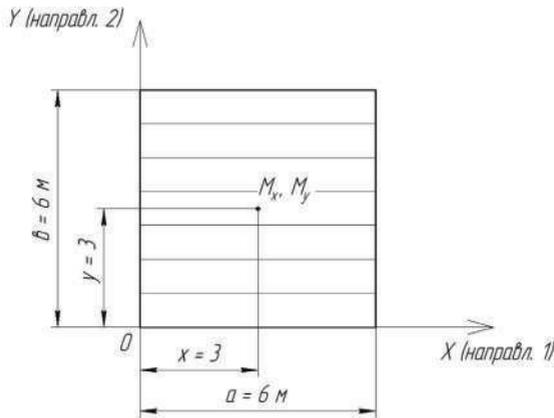


Рис. 7. Координаты центра, где определяются M_x и M_y

Для нахождения моментов по уравнениям (4), (5) было взято по 9 членов ряда ($n = 1, 3, 5$; $m = 1, 3, 5$), хотя анализ значений показывает, что для приемлемой точности достаточно брать первые четыре члена ряда.

Найденные значения изгибающих моментов M_x и M_y приходятся на 1 метр длины поперечного сечения и составляют:

$$M_x = 16400 \text{ Нм/м (действует в плоскости } XoZ);$$

$$M_y = 4620 \text{ Нм/м (действует в плоскости } YoZ).$$

Для сравнения максимальный изгибающий момент, действующий в шарнирной балке шириной 1 м и длиной 6 м и находящейся под действием такой же равномерной нагрузки $q = 4750 \text{ Н/м}^2$ равен 21 375 Нм. Разница составляет 30 %. Отсюда можно сразу сделать подтверждающий вывод, что, рассчитывая перекрытие как балку без учета ее опирания по другим двум сторонам, мы получаем завышенные значения усилий, а значит и перерасход материала.

Далее определим напряжения от изгиба по осям X и Y . Как сказано в изменениях № 3 к СП 63.13330.2017 [9, 10] для ДПК расчет-

ный момент инерции определяется без учета слоев, расположенных перпендикулярно направлению нормальных напряжений.

Напряжения определяются по формулам:

$$\sigma_x = \frac{M_x}{J_y} Z \quad (7)$$

$$\sigma_y = \frac{M_y}{J_x} Z$$

Моменты инерции определяются на единицу длины поперечного сечения и имеют размерность м^3 [5].

На рис. 8 и 9 изображены схемы поперечных сечений для расчета моментов инерции.

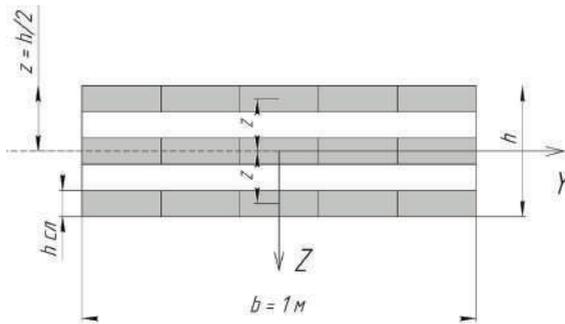


Рис. 8. Сечение для расчета J_y

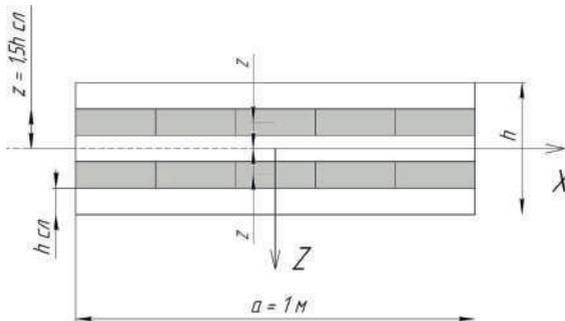


Рис. 9. Сечение для расчета J_x

Моменты инерции:

$$J_y = \frac{h_{\text{сп}}^3}{12} + 2 \cdot (z^2 \cdot h_{\text{сп}} + \frac{h_{\text{сп}}^3}{12}) = \frac{33^3}{12} + 2 \cdot (66^2 \cdot 33 + \frac{33^3}{12}) =$$

$$= 2 \cdot 995,7 + 2 \cdot (143 \, 748 + 2 \, 995,7) = 296 \, 483,1 \text{ мм}^3 = 296,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$$

$$J_x = 2 \cdot (z^2 \cdot h_{\text{сп}} + \frac{h_{\text{сп}}^3}{12}) = 2 \cdot (33^2 \cdot 33 + \frac{33^3}{12}) =$$

$$= 2 \cdot (35 \, 937 + 2 \, 995,7) = 77 \, 865,4 \text{ мм}^3 = 77,8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$$

Напряжения:

$$\sigma_x = \frac{M_x}{J_y} Z = \frac{M_x}{J_y} \cdot \frac{h}{2} = \frac{16 \, 400}{295,6 \cdot 10^{-6}} \cdot \frac{0,165}{2} = 4,6 \text{ МПа}$$

$$\sigma_y = \frac{M_y}{J_x} Z = \frac{M_y}{J_x} \cdot 1,5 \cdot h_{\text{сп}} = \frac{4 \, 620}{77,8 \cdot 10^{-6}} \cdot 1,5 \cdot 0,033 = 2,9 \text{ МПа}$$

Расчетное сопротивление изгибу согласно [9, 10]:

$$R_n^p - R_n^h \cdot m_{\text{дл}} \cdot \Pi m_i / \gamma m$$

$R_n^p = 27 \text{ МПа}$ – нормативное сопротивление изгибу древесины С27;

$m_{\text{дл}} = 0,66$ – коэффициент длительной прочности;

$\Pi m_i = 0,9$ – произведение коэффициентов условий работы;

$\gamma m = 1,2$ – коэффициент надежности по материалу при изгибе.

$$R_n^p = R_n^h \cdot m_{\text{дл}} \cdot \Pi m_i / \gamma m = 27 \cdot 0,66 \cdot 0,9 / 1,2 = 13,4 \text{ МПа}$$

Таким образом напряжения изгиба в перекрытии не превосходят расчетного сопротивления материала изгибу.

Для сравнения в шарнирно закрепленной балке шириной 1 м и длиной 6 м, находящейся под действием такой же равномерной нагрузки $q = 4750 \text{ Н/м}^2$ с моментом $M = 21375 \text{ Нм}$, напряжения составят:

$$\sigma_x = \frac{M_x}{J_y} Z = \frac{M_x}{J_y} \cdot \frac{h}{2} = \frac{21 \, 375}{295,6 \cdot 10^{-6}} \cdot \frac{0,165}{2} = 6 \text{ МПа} > 4,6 \text{ МПа}$$

Разница в напряжениях при расчетах по двум разным схемам составляют те же 30 %.

В статье показана последовательность расчета перекрытия с учетом его изгиба по двум направлениям и преимущество такого расчета по сравнению расчета перекрытия по схеме балки. Учет пространственной работы перекрытия позволит более обоснованно назначать типоразмер панелей ДПК и экономить материал.

С другой стороны, входящие в уравнения (1) – (5) параметры D_1, D_2, D_3 обладают некоторой условностью, так как их приходится определять расчетом на основе упругих характеристик отдельных составляющих слоев – ламелей без учета конструктивных особенностей панелей (наличие зазоров между кромками ламелей, прочность клеевого соединения между ламелями и т. п.).

Те же рассуждения касаются и значений нормативных сопротивлений ДПК, поэтому рекомендуется для более точных расчетов применять экспериментально определенные значения упругих характеристик $E_1, E_2, G, \nu_1, \nu_2$ плит из ДПК и их нормативных сопротивлений с учетом количества слоев и технологии производства, как это рекомендуется в изменениях к СП 64.13330.2017 [9, 10].

Для расчета перекрытий, как пластинчатых конструкций, также возможно применение вариационных методов, как это показано в статье [12] (с существенными упрощениями для пластин).

Литература

1. ЛДСК – О производстве – Продукция – Плита CLT [Электронный ресурс] – URL: <https://ldskcorp.com/products/> (дата обращения: 20.04.23).
2. ГОСТ Р 56706-2022 Плиты из перекрестноклееной древесины. Общие технические условия – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200192566?ysclid=ljzvc5korp11776927> 9 дата обращения 20.04.2023).
3. *Cristobal Tapia, Marian Claus, Simon Aicher*. A finger-joint based connection for the weak direction of CLT plates. // Construction and Building Materials, Vol. 340, 18 July, 2022. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061822013204> (дата обращения 20.04.2023).
4. *Julian Asselstine, Frank Lam, Chao Zhang*. New edge connection technology for cross laminated timber (CLT) floor slabs promoting two-way action. // Engineering Structures, Vol. 233, 15 April, 2021. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141029620343789> (дата обращения 20.04.2023).
5. *Галеркин Б. Г.* Собрание сочинений в 2 т. [Отв. Ред. Н. И. Мухелишвили]; Акад. Наук СССР. – М. : Изд-во Акад. наук СССР, 1952–1953. – т. 2.

6. Тимошенко С. П., Войновский-Кригер С. Пластинки и оболочки. М., 1966., 636 с.
7. Лехницкий С. Г. Анизотропные пластинки. М., 1947, 355 с.
8. Вайнберг Д. В., Вайнберг Е. Д. Расчет пластин. Киев, 1970, 436 с.
9. СП 64.13330-2017 Деревянные конструкции. Актуализированная редакция СПиП П-25-80 – URL: <https://docs.cntd.ru/document/456082589?ysclid=ljzve5as9t493613503> (дата обращения: 20.04.23).
10. Изменение № 3 к СП 64.13330.2017 «СНиП П-25-80 Деревянные конструкции» – URL: <https://minstroyrf.gov.ru/docs/141561/> (дата обращения: 20.04.23).
11. СП 20.13330.2016 Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83 – URL: <https://docs.cntd.ru/document/456044318?ysclid=ljzvg5h82g208829943> (дата обращения: 20.04.23).
12. Каменев И. В., Черных А. Г., Бакусов П. А., Малов Ю. В. Решение задачи устойчивости оболочечных конструкций с применением тригонометрического и полиномиальных базисов. // Вестник гражданских инженеров. 2022. № 5(94). С. 54–60.

УДК 691.11

Виктория Александровна Ноздрачева,
магистрант
Юлия Валерьевна Трунина,
студент
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный
университет)
E-mail: b.victoria2000@yandex.ru,
yuvtrunina@yandex.ru

Viktoriya Aleksandrovna Nozdracheva,
Master's degree student
Yuliya Valeryevna Trunina,
student
(Saint Petersburg
State University of Architecture
and Civil Engineering)
E-mail: b.victoria2000@yandex.ru,
yuvtrunina@yandex.ru

АНАЛИЗ МЕТОДИК РАСЧЕТА ЗДАНИЯ ИЗ CLT ПО НОРМАМ РАЗНЫХ СТРАН В DLUBAL RFEM

ANALYSIS OF CALCULATION METHODS FOR A BUILDING FROM CLT ACCORDING TO NORMS OF DIFFERENT COUNTRIES IN DLUBAL RFEM

В странах, где применение перекрестно клееных конструкций снижало популярность, было выпущено множество книг, посвященных данному виду массивной древесины. В некоторых странах данные руководства называются “CLT Handbook”. Подобные сборники позволяют «погрузиться» в методологию работы с таким сравнительно молодым материалом, как CLT или, в переводе на русский, перекрестно клееная древесина.

В каждом таком руководстве есть отдельные разделы, посвященные расчету прочности и жесткости конструкций. В каждой стране есть своя нормативная база по расчету конструкций и своя «система надежности». Она определяется множеством факторов и влияет буквально на каждый аспект расчета конструкций.

Ключевые слова: зарубежные нормы, Еврокод, методики расчета, CLT, деревянные конструкции, перекрестно клееная древесина.

In countries where the use of cross-laminated structures has gained popularity, many books have been published on this type of solid wood. In some countries these manuals are called “CLT Handbook”. Such collections allow you to “immerse yourself” in the methodology of working with such a relatively young material as CLT or, translated into Russian, cross-laminated wood.

Each such manual has separate sections devoted to the calculation of the strength and rigidity of structures. Each country has its own regulatory framework for the calculation of structures and its own “reliability system”. It is determined by many factors and affects literally every aspect of structural analysis.

Keywords: foreign standards, Eurocode, calculation methods, CLT, wooden structures, cross-laminated wood.

Расчет производится в программном комплексе Dlubal RFEM 5.29, реализующем метод конечных элементов. ПК включает в себя множество встроенных дополнительных модулей, позволяющих рассчитывать нестандартные модели конструкций, модуль RF-Laminate служит инструментом для расчета многослойных оболочек, в том числе и ортотропных.

Для расчета принято пятиэтажное жилое здание со смешанной конструктивной системой. Несущий каркас представляет собой перекрытия из ДПК, несущие колонны из клееного бруса и пятислойные стены – ядра жесткости. Прямоугольные плоскости и стержни, закрепленные от смещения по вертикали и горизонтали, образуют расчетную схему. Для предотвращения взаимного поворота плоскостей они соединены линейными шарнирами конечной жесткости. В основании колонн задан моментный шарнир по местным осям стержня X и Z по рекомендации производителя программного комплекса. При ориентировании местных осей элементов ось X направляется вдоль продольных слоев панелей – по более жесткому направлению. На рис. 1 представлена расчетная модель.

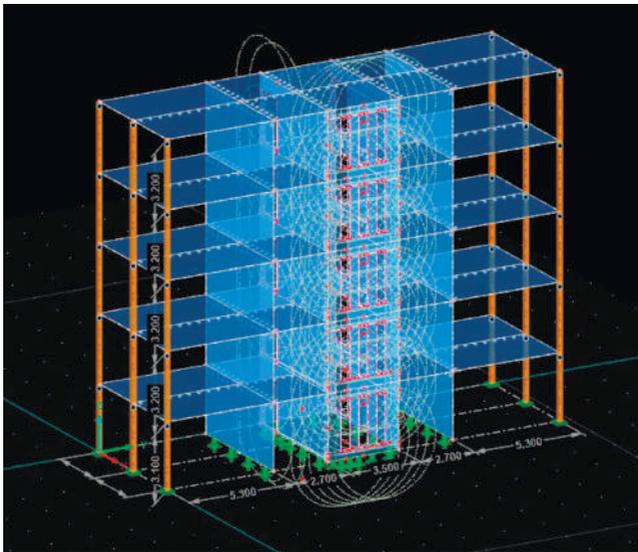


Рис. 1. Расчетная модель

После готовности модели можно приступать к работе с встроенным модулем RF-LAMINATE и заданием характеристик. Панели разбиты на три группы: перекрытия, стены – ядра жесткости и поперечные стены. Материал для расчетов принят один и тот же, древесина класса прочности С30.

Далее, внутри самого модуля, перед расчетом предлагается выбрать нормативы, по которым будет производиться расчет. Для каждой страны появляется дополнительная вкладка, в которой можно задать коэффициенты, присущие текущей расчетной ситуации, но с учетом особенностей норм каждой из стран (табл.1,2). Исходные характеристики, соответствующие каждой стране, представлены ниже для каждого норматива соответственно.

Расчет по ANCI/AWC NDS-2018 – нормы, применяющиеся в США

Таблица 1

Коэффициенты продолжительности нагрузки для ASD, CD

Продолжительность нагрузки	Коэффициент продолжительности нагрузки, C_D	Стандартная расчетная нагрузка
Постоянная	0,9	Статическая
Десять лет	1,0	Постоянная
Два месяца	1,15	Снеговая
Семь дней	1,25	Конструктивная
Десять минут	1,6	Ветровая/землетрясение
Мгновенная	2,0	Ударная

Коэффициенты продолжительности нагрузки не применяются к модулю упругости E , модулю упругости для устойчивости балки и колонны E_{\min} , и для значений сжатия F_c , основанных на предельной деформации [1].

Таблица 2

Температурные коэффициенты C_t

Проектное значение	Режим влажности при эксплуатации	Температурные коэффициенты, C_t		
		$T \leq 100 \text{ }^\circ\text{F}$	$100 \text{ }^\circ\text{F} \leq T \leq 125 \text{ }^\circ\text{F}$	$125 \text{ }^\circ\text{F} \leq T \leq 150 \text{ }^\circ\text{F}$
F_c, E, E_{\min}	Влажный или сухой	1,0	0,9	0,9
$F_b, F_v, F_c, F_{c\perp}$	Сухой	1,0	0,8	0,7
	Влажный	1,0	0,7	0,5

Расчет по DIN 1052:2010-12 – нормы, применяющиеся в Германии.

На рис. 2 и 3 показаны исходные данные для расчета в RFEM по DIN 1052:2010-12.

Норма - DIN 1052:2010-12

Категория коэффициента: Массивная древесина

Частичные коэффициенты надежности по 5.4

Расчетная ситуация:

- устойчивая и переходная γ_M : 1.30
- особая γ_M : 1.00

Коэффициенты модификации по табл. F.1

Класс длительности нагрузки (КДН)	Класс сооружения		
	1	2	3
- постоянная	k_{mod} : 0.60	k_{mod} : 0.60	k_{mod} : 0.50
- длительные	k_{mod} : 0.70	k_{mod} : 0.70	k_{mod} : 0.55
- средневременные	k_{mod} : 0.80	k_{mod} : 0.80	k_{mod} : 0.65
- кратковременные	k_{mod} : 0.90	k_{mod} : 0.90	k_{mod} : 0.70
- мгновенные	k_{mod} : 1.10	k_{mod} : 1.10	k_{mod} : 0.90

Рис. 2. Коэффициенты, зависящие от материала, применяемые в Германии

Расчет по EN 1995-1-1:2004-11/SS – нормы, применяющиеся в Швеции (табл. 3, 4, 5).

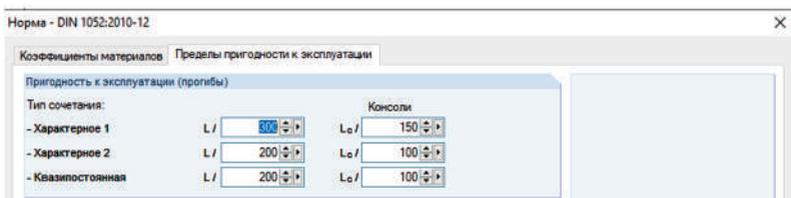


Рис. 3. Пределные прогибы для расчетов в Германии [3]

Таблица 3

Частный коэффициент для класса безопасности

Класс безопасности	Уровень опасности	Частный коэффициент, γ_d
1	Низкий, небольшой риск серьезной травмы	0,83
2	Нормальный, некоторый риск серьезной травмы	0,91
3	Высокий, большой риск серьезной травмы	1,0

Таблица 4

Примеры частного коэффициента по материалу

Страна	Частный коэффициент, γ_m
Швеция	1,25
Норвегия	1,15
Австрия	1,25
Германия	1,3

Частный коэффициент γ_m зависит от однородности материала, его значение указывается в национальных приложениях к Еврокоду и отличается в зависимости от страны. Для CLT в Швеции следует использовать 1,25 или 1,3 [2].

Таблица 5

Значения коэффициента модификации для CLT

Класс обслуживания	Класс продолжительности нагрузки				
	Постоянная	Долгосрочная	Средне-срочная	Кратко-срочная	Мгновенная
1	0,6	0,7	0,8	0,9	1,1
2	0,6	0,7	0,8	0,9	1,1
3	–	–	–	–	–

Расчет по CSA 086-19 – нормы, применяющиеся в Канаде (табл. 6)

Таблица 6

Коэффициент продолжительности нагрузки

Продолжительность нагрузки	Коэффициент продолжительности нагрузки, K_D
Краткосрочная	1,15
Стандартная	1,00
Долгосрочная	0,65

Коэффициент условий эксплуатации, K_S

CLT, указанные в стандартах ANSI/APA PRG 320 и CSA 086, следует использовать только в сухих условиях эксплуатации. Следовательно, все коэффициенты условий эксплуатации следует принимать за единицу.

Коэффициент обработки, K_T

Коэффициент обработки K_T следует принимать равным 1,0 для необработанных продуктов CLT. Для CLT, обработанных антипиренами или любыми другими химическими веществами, потенциально снижающими прочность, прочность и жесткость должны основываться на задокументированных результатах испытаний.

Системный коэффициент, K_H

В связи с тем, что CLT-панели действуют как ортотропные плиты, рекомендуется использовать системный коэффициент K_H , равный 1,0 для всех прочностных свойств [4].

По вышеприведенным исходным данным был выполнен расчет в ПК RFEM.

Согласно расчету по нормативам США и Канады наиболее опасная ситуация возникает при втором сочетании нагрузок в панели 7 (перекрытие) в слое № 4 в нижней грани (рис. 4, 5).

В результате расчета по нормативам Германии и Швеции максимальное напряжение возникает в панели 15 (поперечная стена) в слое № 3 в нижней грани (рис. 6, 7).

Наг-ружки	Пор-сть №	Точка №	Координаты точки [м]			№	Слой z [мм]	Сторона	Напряжения [Н/мм ²]		Соотнош. [-]	Диаграмма в окрестности результатов
			X	Y	Z				Расчетн.	Пределн.		
СН32	Сочетание нагрузок.1											
	27	23	6,000	19,500	6,300	2	80,0 Снизу	$\sigma_{x,0}$	-1,21	60,00	0,02	-
	27	23	6,000	19,500	6,300	5	200,0 Снизу	$\sigma_{x,100}$	-0,04	60,00	0,00	-
	13	21	6,000	19,500	3,100	2	40,0 Сверху	$\sigma_{x,0,0}$	2,45	36,00	0,07	-
	27	23	6,000	19,500	6,300	5	160,0 Сверху	$\sigma_{x,0,100}$	-0,16	2,70	0,06	-
	13	21	6,000	19,500	3,100	2	40,0 Сверху	$\sigma_{x,0,0,0}$	3,56		0,09	-
	27	23	6,000	19,500	6,300	5	200,0 Снизу	$\sigma_{x,0,100,0}$	-0,20		0,06	-
	55	262	6,000	19,500	12,700	3	100,0 Средина	$\tau_{x,z}$	0,56	1,00	0,56	-
	14	27	3,000	19,500	3,100	3	100,0 Средина	$\tau_{x,z}$	0,40	4,00	0,10	-
	55	262	6,000	19,500	12,700	5	200,0 Снизу	$\tau_{x,y}$	-1,05	4,00	0,26	-
	55	262	6,000	19,500	12,700	5	180,0 Средина	$\text{int}(\sigma_{x,0,0}*\tau_{x,z})$			0,05	-
55	262	6,000	19,500	12,700	3	80,0 Сверху	$\text{int}(\sigma_{x,0,0}*\tau_{x,z})$			0,56	-	
СН44	Сочетание нагрузок.2											
	27	23	6,000	19,500	6,300	2	80,0 Снизу	$\sigma_{x,0}$	-1,29	60,00	0,02	-
	27	23	6,000	19,500	6,300	1	40,0 Снизу	$\sigma_{x,100}$	-0,04	60,00	0,00	-
	13	21	6,000	19,500	3,100	2	40,0 Сверху	$\sigma_{x,0,0}$	2,50	36,00	0,07	-
	27	23	6,000	19,500	6,300	5	160,0 Сверху	$\sigma_{x,0,100}$	-0,17	2,70	0,06	-
	27	23	6,000	19,500	6,300	4	160,0 Снизу	$\sigma_{x,0,0,0}$	-3,87		0,08	-
	27	23	6,000	19,500	6,300	5	200,0 Снизу	$\sigma_{x,0,100,0}$	-0,21		0,06	-
	55	262	6,000	19,500	12,700	3	100,0 Средина	$\tau_{x,z}$	0,59	1,00	0,59	-
	14	27	3,000	19,500	3,100	3	100,0 Средина	$\tau_{x,z}$	0,42	4,00	0,10	-
	55	262	6,000	19,500	12,700	5	200,0 Снизу	$\tau_{x,y}$	-1,13	4,00	0,28	-
	55	262	6,000	19,500	12,700	5	180,0 Средина	$\text{int}(\tau_{x,z}*\tau_{x,y})$			0,05	-
55	262	6,000	19,500	12,700	3	80,0 Сверху	$\text{int}(\sigma_{x,0,0}*\tau_{x,z})$			0,59	-	

Рис. 4. Результаты расчета по североамериканским нормам

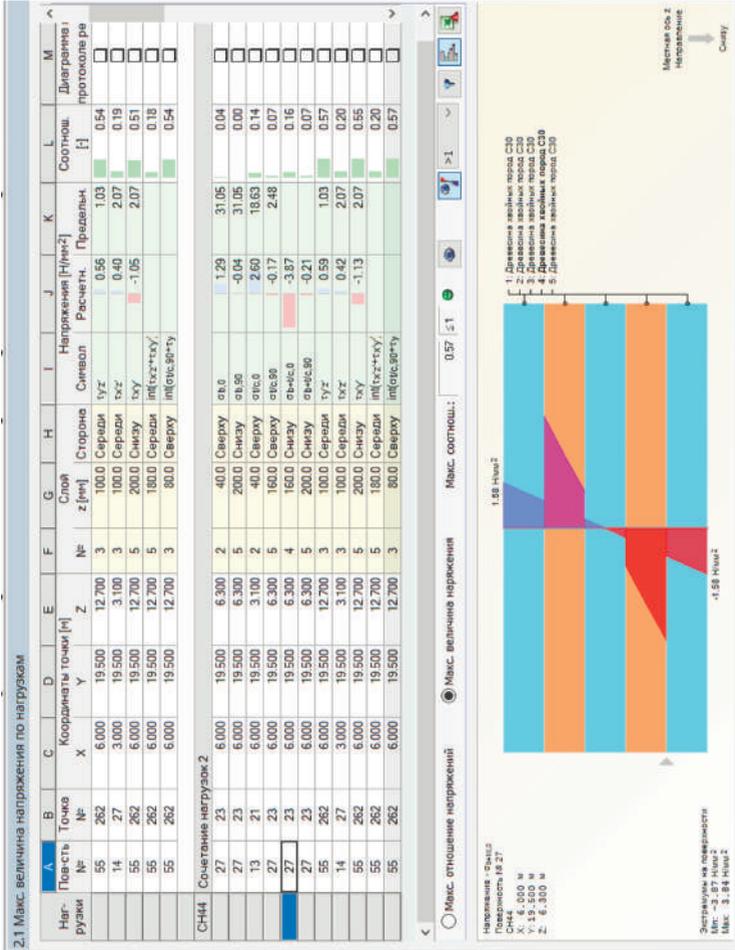


Рис. 5. Максимальная величина напряжения по североамериканским нормам

Наг-рузки	Пло-ща №	Точ-ка №	Координаты точки (м)			Z	№	Срой z [мм]	Скорос-та	Символ	Напряжения [Н/мм ²]		Продольн.	Согпош. H	Диаграмма в относн. резултаты
			X	Y	Z						Расчет.	Пределн.			
СН33 Сочетание нагрузок 1															
	13	2057	4,500	19,500	3,100	2	40,0 Северу	$\sigma_{y,y}$	-0,84	20,77	0,04	-			
	13	2057	4,500	19,500	3,100	1	0,0 Северу	$\sigma_{y,y}$	-0,03	20,77	0,00	-			
	1	40	0,000	5,300	0,000	2	40,0 Северу	$\sigma_{y,y}$	-2,35	15,92	0,15	-			
	13	21	6,000	19,500	3,100	1	0,0 Северу	$\sigma_{y,y}$	0,11	0,28	0,41	-			
	15	41	0,000	5,300	3,100	3	120,0 Силу	$\sigma_{y,y}$	-2,69		0,16	-			
	13	21	6,000	19,500	3,100	1	0,0 Северу	$\sigma_{y,y}$	0,14		0,41	-			
	55	262	6,000	19,500	12,700	3	100,0 Средина	$\tau_{x,y}$	0,56	0,69	0,81	-			
	14	27	3,000	19,500	3,100	3	100,0 Средина	$\tau_{x,y}$	0,41	1,38	0,29	-			
	55	262	6,000	19,500	12,700	5	200,0 Силу	$\tau_{x,y}$	-0,79	1,38	0,57	-			
	55	262	6,000	19,500	12,700	5	180,0 Средина	$\ln(\tau_{x,y}, \tau_{x,z})$			0,23	-			
	55	262	6,000	19,500	12,700	3	80,0 Северу	$\ln(\sigma_{y,y}, \tau_{x,z})$			0,80	-			
СН44 Сочетание нагрузок 2															
	13	2057	4,500	19,500	3,100	2	40,0 Северу	$\sigma_{y,y}$	-0,89	20,77	0,04	-			
	13	2057	4,500	19,500	3,100	1	0,0 Северу	$\sigma_{y,y}$	-0,03	20,77	0,00	-			
	1	40	0,000	5,300	0,000	2	40,0 Северу	$\sigma_{y,y}$	-2,39	15,92	0,15	-			
	13	21	6,000	19,500	3,100	1	0,0 Северу	$\sigma_{y,y}$	0,12	0,28	0,43	-			
	15	41	0,000	5,300	3,100	3	120,0 Силу	$\sigma_{y,y}$	-2,80		0,17	-			
	13	21	6,000	19,500	3,100	1	0,0 Северу	$\sigma_{y,y}$	0,15		0,43	-			
	55	262	6,000	19,500	12,700	3	100,0 Средина	$\tau_{x,y}$	0,59	0,69	0,85	-			
	14	27	3,000	19,500	3,100	3	100,0 Средина	$\tau_{x,y}$	0,43	1,38	0,31	-			
	55	262	6,000	19,500	12,700	5	200,0 Силу	$\tau_{x,y}$	-0,83	1,38	0,60	-			
	55	262	6,000	19,500	12,700	5	180,0 Средина	$\ln(\tau_{x,y}, \tau_{x,z})$			0,25	-			
	55	262	6,000	19,500	12,700	3	80,0 Северу	$\ln(\sigma_{y,y}, \tau_{x,z})$			0,85	-			
СН56 Сочетание нагрузок 3															
	13	21	6,000	19,500	3,100	4	120,0 Северу	$\sigma_{y,y}$	0,85	20,77	0,04	-			
	13	21	6,000	19,500	3,100	5	200,0 Силу	$\sigma_{y,y}$	-0,03	20,77	0,00	-			
	1	40	0,000	5,300	0,000	2	40,0 Северу	$\sigma_{y,y}$	-2,66	15,92	0,17	-			
	13	21	6,000	19,500	3,100	1	0,0 Северу	$\sigma_{y,y}$	0,11	0,28	0,41	-			
	15	41	0,000	5,300	3,100	3	120,0 Силу	$\sigma_{y,y}$	-2,78		0,17	-			

Рис. 6. Результаты расчета по европейским нормам

Анализируя полученные результаты, можно прийти к выводу, что методики расчета близлежащих регионов в конечном итоге не дают существенных различий. В то время как результаты расчетов по североамериканским и европейским нормам существенно отличаются друг от друга.

Литература

1. CLT Handbook. – Cross-laminated timber, US edition, 2013. – 288 с.
2. The CLT Handbook. CLT structures – facts and planning. Swedish wood. – Stockholm, 2019. – 188 с.
3. Справочник по КМД. Технический университет г. Грац. – Грац, 2010. – 391 с.
4. The CLT Handbook. – Canada, 2019. – 193 с.

УДК 691-408.64

Дарья Вячеславовна Попова,
магистрант
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный
университет)
E-mail: popovadashylka@mail.ru

Daria Viacheclavovna Popova,
Master's degree student
(Saint Petersburg
State University of Architecture
and Civil Engineering)
E-mail: popovadashylka@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ОБОЛОЧЕЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ CLT

INVESTIGATION OF SHELL STRUCTURES FROM CLT

В статье приведены сегментные, складчатые оболочки, изогнутые плиты из CLT, которые позволяют создавать интересные варианты большепролетных конструкций или зданий со свободной планировкой. Рассмотрены типы креплений, которые можно использовать при проектировании швов между плитами CLT. Уделено внимание новым конструктивным схемам – изогнутые панели CLT. Использование изогнутых элементов из перекрестно-клееной древесины позволяет создавать очень тонкие конструкции крыши различной формы. Здания из CLT являются экологичными, экономически выгодными, с возможностью монтажа в кратчайшие сроки, однако зачастую имеют сложные стыки и нетиповые решения для соединения элементов.

Ключевые слова: перекрестноклееные панели, CLT, оболочечные конструкции, изогнутые панели, когтевые пластины.

The article presents segmented, folded shells, curved plates made of CLT, which allow you to create interesting variants of large-span structures or buildings with a free layout. The types of fasteners that can be used in the design of joints between CLT plates are considered. Attention is paid to new design schemes – curved CLT panels. The use of curved elements made of cross-glued wood allows you to create very thin roof structures of various shapes. CLT buildings are eco-friendly, cost-effective, with the possibility of installation in the shortest possible time, however, they often have complex joints and atypical solutions for connecting elements.

Keywords: cross-glued panels, CLT, shell structures, curved panels, claw plates.

Введение

CLT – это инженерный материал, который используется как в промышленных масштабах, так и в частном домостроении, имеющий высокую степень заводской готовности.

Возможность больших поперечных сечений придает компонентам высокую несущую способность и жесткость, что также увеличивает жесткость всего здания. Панели могут быть изготовлены с высокой степенью заводской готовности, а их небольшой собственный вес является преимуществом с точки зрения подготовки основания, транспортировки и сборки.

Современные технологии производства в сочетании с хорошими прочностными свойствами делают CLT полезным строительным материалом с уникальными свойствами:

- Высокая прочность по отношению к собственному весу материала;
- Небольшие производственные допуски;
- Хорошая несущая способность при пожаре;
- Хорошая теплоизоляционная способность;
- Малый собственный вес, а значит более низкие затраты на транспортировку и сборку, а также снижаются затраты на фундамент;
- Гибкость CLT вносит ценный вклад в развитие строительства;
- Хорошая способность переносить химически агрессивные среды.

Конструкции CLT характеризуются быстрой и простой сборкой готовых элементов. Компоненты могут быть соединены с помощью простых и традиционных методов, таких как забивание гвоздей и завинчивание. Для высокой степени надежности конструкций существуют более совершенные способы крепления [1].

С появлением CLT панелей выросла возможность осуществить многие архитектурные и конструктивные решения из дерева, такие как балконы квартир, консоли, лифтовые шахты и лестничные клетки.

CLT по сравнению с железобетоном или деревянным каркасом обладает рядом преимуществ. Деревянные панели значительно легче, крепление и земляные работы также упрощаются.

Условия при проектировании:

Для проектирования конструкций из CLT есть несколько рекомендаций, которые следует учитывать:

- CLT следует рассматривать как ортотропную панель с тремя взаимно перпендикулярными плоскостями, с различными свойствами в каждом направлении;

- CLT также может подвергаться воздействию сил, перпендикулярных источнику;
- Следует избегать эксцентриситета и кручения;
- В зависимости от конструктивных особенностей для монтажа необходимы специальные крепежные элементы.

Устройство стен и полов

CLT как конструкция пола должна воспринимать вертикальные нагрузки, такие как временная нагрузка и собственный вес, и передавать их на опоры. Напольная панель также может выдерживать горизонтальные нагрузки, например ветровую. Наиболее распространенная схема опирания – панели размещенные на двух опорах.

Типы соединений

Существует много различных типов креплений, которые можно использовать при проектировании швов между плитами CLT.

Длинные шурупы для дерева обычно используются в соединениях между панелями CLT, но широко используются и другие традиционные варианты крепления, такие как гвозди, вставные пластины и гвоздевые накладки. Существует также несколько более инновационных решений, таких как клеиваемые стержни, которые охватывают все угловые решения, включая монтажные крепления и системы для невидимых соединений, передающих нагрузку. Новые системы часто полагаются на высокую степень заводской сборки панелей CLT и тот факт, что для проектирования креплений используются станки с ЧПУ (рис. 1).

Шурупы для дерева, шурупы и дюбели

Соединения с использованием специальных шурупов по дереву, универсальных шурупов или шурупов для деревянных конструкций – это простые решения, которые широко используются для крепления CLT.

Популярность шурупов для дерева отчасти объясняется их способностью выдерживать как усилия сдвига, так и растяжения, а также простотой использования на строительной площадке без предварительного сверления. Шурупы по дереву изготавливаются диаметром от 4 мм до 13 мм и длиной до 1000 мм. Они разработаны в соответствии с областью их применения. Для соединений, в которых используются гвоздевые пластины или другие стандартные

металлические кронштейны, обычно используются анкерные гвозди или анкерные винты.

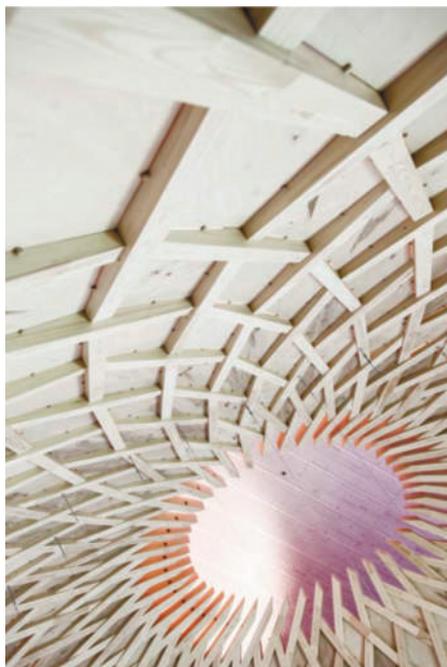


Рис. 1. Крыша из клееного бруса и CLT

Стандартные металлические пластины и кронштейны

Стандартные металлические пластины и кронштейны являются важным типом крепления, например, для соединения плит перекрытия и стеновых панелей в CLT. Существуют всевозможные угловые кронштейны, от кронштейнов, которые выдерживают большие растягивающие усилия, до кронштейнов, предназначенных главным образом для передачи усилий сдвига.

Наклонная гвоздевая пластина

Наклонные гвоздевые пластины можно использовать для соединений между плитами пола и стеновыми панелями или для прижимающих соединений при умеренной нагрузке. Они изготавливаются из оцинкованной горячим погружением или нержавеющей

стали толщиной 2–4 мм и диаметром отверстий 5 мм для анкерных гвоздей или анкерных шурупов.

Угловые скобки

Угловые скобки часто используются для примыкающих соединений в CLT. Они также могут использоваться для крепления CLT к бетону и доступны во многих размерах для адаптации к рассматриваемой нагрузке. Они изготавливаются из оцинкованной горячим погружением или нержавеющей стали толщиной 2–3 мм с диаметром отверстий 5 мм для анкерных гвоздей или анкерных шурупов и более крупными отверстиями для расширительных шурупов.

Когтевые пластины

Когтевые пластины – хороший вариант для умеренных усилий. Перфорированные когтевые пластины бывают многих вариантов. Перфорированные пластины обычно являются наиболее экономичной альтернативой просверленным пластинам.

При штамповке пластин требуется, чтобы толщина пластины не превышала диаметр отверстия. Отверстие должно быть примерно на 1 мм больше диаметра крепежа. Пластины гвоздя могут быть отлиты в бетонную плиту или приварены к литым сварочным пластинам [1].

CLT как оболочечная структура

Перекрестно клееная древесина открывает возможности выполнять сложные проекты, в том числе для большепролетных конструкций, без использования дополнительных опор.

CLT в качестве оболочечных структур встречается редко. На данный момент в других странах уже в производственных масштабах производят изогнутые панели. Такие компоненты оболочки, которые в значительной степени подвержены нормальным усилиям или изгибу, используются в основном для специальных кровельных конструкций.

Комбинируя несколько компонентов оболочки одного типа, можно создать множество различных форм крыши. Относительно распространенные конструкции оболочек включают коноид и гиперболический параболоид (рис. 2). Ценным свойством этих двух элементов является то, что они могут быть созданы с использованием прямых линий.

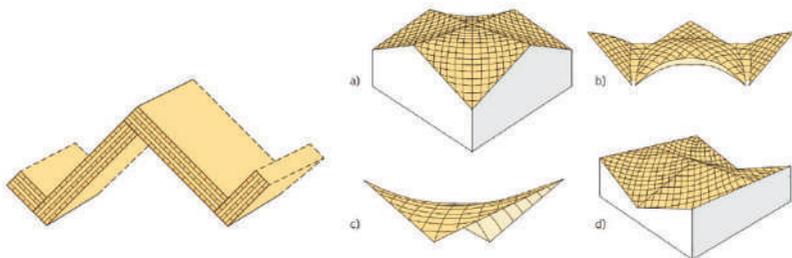


Рис. 2. Примеры оболочечных структур: *a* – оболочка гиперболического параболоида; *b* – оболочки, пересекающие друг друга; *c, d* – гиперболические параболоиды

Складчатые оболочки

Сложенные пластинчатые конструкции можно создавать из повторяющихся простых элементов или может состоять из уникально подобранных деталей, в зависимости от выбранной архитектуры и конструктива. При проектировании учитывается жесткость всей конструкции, в зависимости от требований могут применяться как со стабилизирующим каркасом, так и в виде полностью жестких оболочек пример на рис. 3.

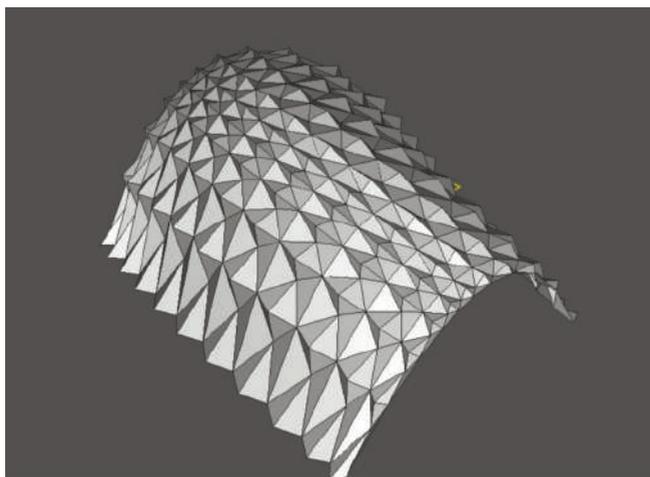


Рис. 3. Пример складчатой оболочки на основе CLT

Такая схема была выполнена на основе существующего здания женского монастыря Сен-Лу в Швейцарии (рис. 4), является очевидным примером развития трехмерной формы и топологии фасадов. Складная конструкция крыши имеет длину приблизительно 9 м.

При проектировании решений для соединения элементов CLT анизотропия древесины должна учитываться в отношении угла нагрузки по отношению к крепежным элементам и соотношение между размерами крепежных элементов и материала. Прочность и жесткость значительно ниже в перпендикулярном направлении волокон, чем параллельном [2].



Рис. 4. Женский монастырь Сен-Лу в Швейцарии

Купольные сегментные конструкции

Примером купольного сооружения из CLT может служить павильон Технического университета Кайзерслаутерна (рис. 5). Пролет конструкции – 12 м, высота – 4 м, а сам купол состоит из 229 сегментов шириной около 600 мм.

Соседние панели соединены вклеенными буковыми дюбелями и соединителями X-fix, которые представляют собой фанерные

соединители типа «ласточкин хвост». Разъемы X-fix противостоят растяжению и сдвиговым усилиям, возникающим в результате смещения прилегающей поверхности в плоскости. Они также обеспечивают соединение панелей без зазоров во время сборки. Вклеенные буковые дюбели фиксируют пластины и передают поперечные силы, действующие перпендикулярно пластинам.



Рис. 5. Павильон Технического университета в Кайзерслаутерне [3]

Еще один пример сегментного строительства из CLT является выставочный зал (рис. 6) для ежегодной выставки Landesgartenschau, которая состоялась в Швебиш-Гмюнде в 2014 году.

Геометрия выставочного зала напоминает «арахис». Основные участки поверхности являются синкластическими, и только незначительные участки поверхности в центральной части являются антикластическими.

Дверные проемы и стеклянные фасады, обрамленные колоннами, расположены на двух концах «арахиса». Наибольший пролет составляет около 11 м; расстояние в продольном направлении составляет около 17 м; высота составляет около 6 м. Его конструкция состоит из однослойных сегментных пластин, изготовленных из буковых панелей толщиной 50 мм. Предполагается, что выставочный зал простоят на месте не менее пяти лет и поэтому спроектирован с учетом соответствующих требований к ветровой и снеговой нагрузке.

Новый способ соединения для пластинчатых конструкций: схема соединения подобна типу ласточкин хвост, данный вариант отлично воспринимает сдвиговые усилия в плоскости, в то время как меньшие осевые усилия и внеплоскостные сдвигающие усилия воспринимаются пересекающимися винтовыми соединениями (рис. 7). Пересекающиеся винты лежат в параллельных плоскостях, перпендикулярных к краю, на расстоянии 20 мм друг от

друга. Винты пересекаются друг с другом под определенным углом при виде сбоку (рис. 7) [4].



Рис. 6. Выставочный зал в Швебиш-Гмюнде

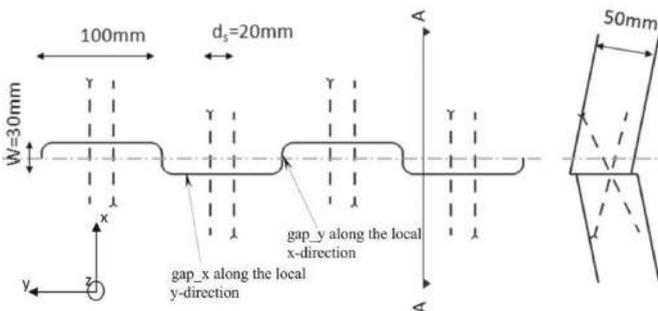


Рис. 7. Узловое соединение сегментных плит

Изогнутые CLT плиты

К новым конструктивным схемам относят также изогнутые панели CLT. Использование изогнутых элементов из перекрестно-клееной древесины позволяет создавать очень тонкие конструкции крыши различной формы.

Компания Holzbau Unterrainer, построила новый производственный цех (рис. 8) летом 2013 г., с использованием изогнутых панелей CLT для строительства крыши.

Несмотря на относительно высокую снеговую нагрузку $3,60 \text{ кН/м}^2$ толщина этих элементов составляет всего 160 мм при ширине

пролета 20 м. Из-за особых свойств, проявляемых поперечно-ламинированной древесиной, важно особо учитывать следующие факторы: внутреннее напряжение, проявляемое ламелями в результате предварительной кривизны и возможного расслабления, взаимодействие сдвига при качении и растягивающей нагрузки, перпендикулярной волокнам, из-за кривизны, а также качество клеевых соединений [1].

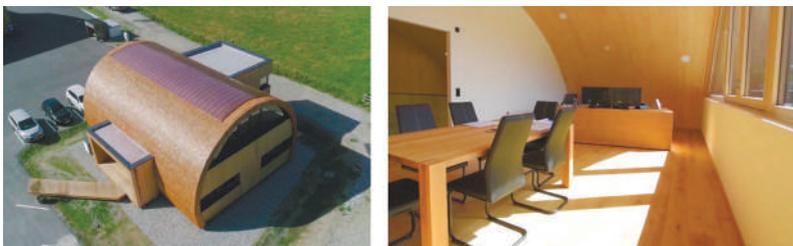


Рис. 8. Производственный цех Holzbau Unterrainer для изогнутых панелей CLT

Заключение

Сегментные, складчатые оболочки, изогнутые плиты из CLT позволяют создавать интересные варианты большепролетных конструкций или зданий со свободной планировкой. Такие дома являются экологичными, экономически выгодными, позволяют возводить здания в кратчайшие сроки, однако зачастую имеют сложные стыки и нетиповые решения для соединения элементов.

Литература

1. The CLT Handbook, Eric Borgström and Johan Fröbel, 2019г, 188 стр clt-handbook-2019-eng-m-svensk-standard-2019.pdf (swedishwood.com) (дата обращения 26.10.2022).
2. Folded plate structures as building envelopes, Andreas Falk, Peter Von Buelow, 2012 г., 12 стр (PDF) Фальцевые плитные конструкции как ограждающие конструкции зданий (researchgate.net) (дата обращения 26.10.2022).
3. Diemersteiner Tal – Free Form, Germany, Technical University of Kaiserslautern, Germany, 2015 г. Diemersteiner Tal – свободная форма, Германия | Программное обеспечение Dlubal (дата обращения 12.03.2023).
4. Segmental Timber Plate Shell for the Landesgartenschau Exhibition Hall in Schwäbisch Gmünd – the Application of Finger Joints in Plate Structures Jian-Min Li,

Jan Knippers , 2014 г., 139 стр. (PDF) Сегментная деревянная оболочка для выставочного зала Landesgartenschau в Швебиш-Гмюнде – применение стыковых соединений в плитных конструкциях (researchgate.net) (дата обращения 25.05.2023).

5. Curved cross-laminated timber elements, Georg Stecher Roland Maderebner, 2016 г., 9 стр., (PDF) Curved cross-laminated timber elements (researchgate.net) (дата обращения 25.05.2023).

6. Theory of Laminated Composite Shells Cross Laminated Timber Application Zoltán I. Bocskai, Ph.D. Strusoft Ltd., Hungary 2019 г., 102 стр. theory_of_laminated_composite_shells_CLT_fd19_v1.0.pdf (strusoft.com) (дата обращения 25.05.2023).

УДК 694.14

Татьяна Николаевна Казакевич,
канд. техн. наук, доцент
Александр Григорьевич Черных,
д-р техн. наук, профессор
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный
университет)
E-mail: kazakevich.t.n@mail.ru,
chagrigrig@spbgasu.ru

Tatyana Nikolaevna Kazakevich,
PhD in Sci. Tech., Associate Professor
Alexandr Grigoryevich Chernykh,
Dr. Sci. Tech., Professor
(Saint Petersburg
State University of Architecture
and Civil Engineering)
E-mail: kazakevich.t.n@mail.ru,
chagrigrig@spbgasu.ru

АНАЛИЗ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ ШИПОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В КДК

ANALYSIS OF GEOMETRIC DIMENSIONS OF STUD JOINTS USED IN GLT

В работе приведено сравнение проекта ГОСТ 19414-2021 «Конструкции деревянные клееные. Общие требования к зубчатым клееным соединениям» с действующим ГОСТ 19414-90 «Древесина клееная массивная. Общие требования к зубчатым клееным соединениям» по размерам зубчатых шипов клееной древесины, используемых для сращивания. Проведен мониторинг производителей клееного бруса. Выявлен размер зубчатого шипового соединения, используемого в производстве несущих клееных деревянных конструкций, который не учтен в проекте ГОСТ 19414-2021. Рассмотрены геометрические размеры шиповых соединений и показатели оценки качества. Требуется внести изменения в проект ГОСТ 19414-2021.

Ключевые слова: клееные деревянные конструкции, геометрический размер шипового соединения, зубчатые клееные соединения, длина шипа.

General requirements for toothed adhesive joints" according to the size of the toothed spikes of glued wood used for splicing. The producers of glued beams were monitored. The size of the toothed stud joint used in the production of load-bearing glued wooden structures, which is not taken into account in the draft GOST 19414-2021, has been revealed. The geometric dimensions of stud joints and quality assessment indicators are considered. It is required to make changes to the draft GOST 19414-2021.

Keywords: glued wooden structures, geometric size of the spike joint, toothed adhesive joints, length of the spike.

Профессиональное сообщество обсуждало проект ГОСТ 19414-2021 «Конструкции деревянные клееные. Общие требования к зубчатым клееным соединениям» [1]. Проект стандарта выходит взамен действующего ГОСТ 19414-90 «Древесина клееная массивная. Общие

требованиям к зубчатым клеевым соединениям» [2]. В новой версии ГОСТа приведены геометрические размеры шиповых соединений, некоторые из них не используются в промышленности (высота шипа 50 и 32 мм), некоторые используются на единичных производствах (25 мм).

В связи с этим, целью работы явилось проведение мониторинга производств на предмет исследования геометрических размеров шиповых соединений.

Для достижения поставленной цели, были решены задачи:

- проведен анализ нормативных документов, касающихся зубчатых клеевых соединений;
- проведен мониторинг изготовителей клееного бруса;
- проведено аналитическое исследование зубчатых шиповых соединений.

В новой версии ГОСТ 19414-2021, во – первых, изменили серию стандартов. Общие требования к зубчатым клеевым соединениям, которые раньше были в серии стандартов «Древесина клееная массивная», к которой относилась и мебель в том числе, переведены в серию «Конструкции деревянные клееные» с сохранением размеров зубчатых соединений, используемых в производстве мебели (4–5 мм). Мебель не относится к деревянным конструкциям. В связи с тем, что для производства мебели нельзя ссылаться на конструкции, возникает необходимость в разработке нового стандарта.

Во-вторых, геометрические размеры зубчатых соединений ГОСТ 19414-2021 аналогичны размерам соединений ГОСТ 19414-90. Сравнение размеров зубчатых шипов приведено в табл. 1.

Мониторинг производителей клееного бруса в Алтайском крае, Новосибирской, Свердловской, Челябинской, Кировской, Нижегородской, Московской, Тверской, Новгородской, Московской и Ленинградской областях, Удмуртской республики и Марий-Эл выявил преимущественное использование шипового соединения с высотой шипа 15мм: ООО «Сильва-Хаус», ООО «Тайга», СКМД, «Уралхимтекс», ООО «Меридиан», ООО «Вятка Лес», ООО «Форест», ООО «НВ», ООО «Тимбер», ООО «Стезя», ООО «Юнона», Юта Дом, ДСК «Стройконструкция», ЗАО Вышневолоцкий леспромхоз, Стройлеспоставка, Гринсайд. Количество перечисленных организаций составляет не менее трети, выпускающих клееный брус. Однако, длина шипа 15 мм не учтена в новом нормативном документе.

Таблица 1

Геометрические размеры зубчатых соединений

Категория прочности соединения	Значения геометрических параметров соединения (ГОСТ 19414-90)			Значения геометрических параметров соединения (ГОСТ 19414-2021)		
	длина	шаг	загугление	длина	шаг	загугление
I	50	12,0	2,0	50	12	1,7
I	32	8,0	1,0	32	8	0,6
I	–	–	–	25	6	0,4
II	20	6,2	1,0	20	6	1,0
II	10	3,8	0,6	10	3,2	0,5
II	–	–	–	5	1,6	0,2
	4	1,6	0,2	–	–	–

В зависимости от значения относительной прочности (в проекте введено новое понятие) и области применения в ГОСТ 19414-2021 установлено две категории прочности соединений:

I категория – для сращивания по длине однослойных деревянных клееных элементов и слоев КДК высоких классов прочности или 1 сорта, а также устройства крупных соединений под различными углами элементов из массивного бруса, КДК, ДПК, ЛВЛ.

II категория – для сращивания слоев КДК, ДПК, различных строительных деталей и не несущих малонагруженных конструкций.

Относительная прочность соединений зависит от геометрических размеров соединения и должна соответствовать требованиям табл. 2.

Относительная прочность зубчатого соединения – это прочность соединений, выраженная в процентах от прочности цельного элемента без зубчатого соединения.

Таблица 2

Требования к относительной прочности зубчатых соединений

Вид испытаний	Относительная прочность соединений для групп прочности, %		Метод испытаний
	I	II	
Растяжение	65	55	ГОСТ 21554.5*
Изгиб	80	65	П.9 ГОСТ 33120-2014

Можно учесть примечание к таблице 1 ГОСТ 19414-2021: допускаются соединения с другими геометрическими размерами, если они обеспечивают требования прочности. Но для этого необходимо провести испытания на растяжение. По статистике результаты испытаний зубчатых шиповых соединений с длиной шипа 15 мм выше, чем соединений с длиной шипа 20 мм.

Другие геометрические размеры соединений, отсутствующие в новом стандарте, выбирают из условий:

$$b/t \leq 0,18 \quad (1)$$

$$i = (0,5t - b)/L \leq 1/8, \quad (2)$$

где i – уклон шипа; t – шаг шипа (шаг соединения); b – затупление шипа (ширина основы шипа); L – длина шипа

$$L > 4t(1 - 2i) \quad (3)$$

Используемые в производстве клееных деревянных конструкций шиповые соединения имеют профили со следующими размерами (табл. 3).

Таблица 3

Профили шипов

Длина шипа, L , мм	Шаг шипа, t , мм	Ширина основы шипа, b , мм	Степень ослабления, v	Относительный зазор, s , мм
10	3,8	0,6	0,16	0,3–0,5
15	3,8	0,42	0,11	0,45–0,75
20	5,0	0,5	0,1	0,6–1,0
20	6,2	1,0	0,16	0,6–1,0
30	6,2	0,6	0,1	0,9–1,5
50	12,0	2,0	0,17	1,5–2,5

Параметры профилей шипов необходимы для расчета геометрических размеров соединений в соответствии с ГОСТ 19414 – 2021 [1] приведены в табл. 4.

ГОСТ 20850-2014 «Конструкции деревянные клееные несущие. Общие технические условия» [3] не содержит в номенклатуре показателей качества прочность зубчатых соединений на растяжение, приведена только ссылка для определения прочности зубчатых соединений на изгиб.

В ГОСТ 19414-2021 введено понятие относительной прочности, однако в ГОСТ 19414-90 используется термин «Характеристическая прочность зубчатого клееного соединения». Вычисляют характеристическую прочность в МПа по формуле:

$$\sigma_x = X(\sigma) - 2S(\sigma), \quad (4)$$

где $X(\sigma)$ – среднее арифметическое значение предела прочности на статический изгиб испытанных образцов, МПа; $S(\sigma)$ – среднее квадратическое отклонение значения предела прочности испытанных образцов, МПа.

Таблица 4

Расчет геометрических размеров соединений

Длина шипа, мм	Шаг шипа, мм	Затупление шипа	Отношение затупления к шагу	Уклон шипа	Длина шипа должна быть больше величины
L	t	b	$[b/t] \leq 0,18$	$[i = (0,5t - b)/1] \leq 1/8$ или $\leq 0,125$	$l \leq [4t(1 - 2i)]$
10	3,8	0,6	0,16	0,13	11,25
15	3,8	0,42	0,11	0,1	12,2
20	5,0	0,5	0,10	0,1	16,0
20	6,2	1,0	0,16	0,11	19,59
30	6,2	0,6	0,10	0,08	20,67
50	12	2,0	0,17	0,08	40,32

Результат округляют до первого десятичного знака.

Характеристическая прочность зубчатого клеевого соединения должна быть не ниже нормативной прочности, установленной техническими требованиями на продукцию.

Графическая зависимость относительной прочности зубчатых соединений от их геометрических параметров шипов в сопоставлении с прочностью чистой древесины приведена в приложении А ГОСТ 19414-2021. Нормируемые показатели на растяжение зубчатых шиповых соединений появились и впервые приведены только в новом ГОСТ 19414-2021 для 1–3 сортов.

ГОСТ 20850-2014 регламентирует минимальные пределы прочности при изгибе на плась зубчатых соединений в зависимости от

сорта: 32 МПа для 1 сорта, 29 МПа для 2 сорта и 20 МПа для 3 сорта. В ГОСТ 19414-2021 нормативная прочность элементов, отсортированных по сортам при изгибе на плась для 1 сорта 30 МПа, для 2 сорта 27 МПа и для 3 сорта 20 МПа. Возникает вопрос: в связи с чем изменены требования в ГОСТ 19414-2021?

ГОСТ 19414-2021 п.5.3.2 изменяет требования и к зазору: для соединений II категории прочности геометрические размеры должны быть такими, чтобы после запрессовки шипы сомкнулись и зазор (размер S) стал равен нулю, после запрессовки для соединений I категории прочности зазор должен составлять 1–3 % от длины шипа. ГОСТ 19414-90 регламентирует, что в зубчатых клеевых соединениях после запрессовки должен оставаться зазор в стыках значением не более 5 % длины шипа.

При разработке новых нормативных документов учитывают требования европейских и международных стандартов [4], но в данном случае, требования к зубчатым соединениям не учтены.

Новые нормативные документы, как правило, используют актуальные результаты НИОКР. Работ в области изучения свойств зубчатых клеевых соединений не так много, но проводились.

В работе [5] проведена классификация и сформирован перечень комплексных и единичных показателей качества шипового соединения по длине.

Показатели качества продукции, основные их понятия, термины и определения приведены в ГОСТ 15467 [6].

Если рассмотреть общие данные по прочности клеевых соединений, то в зависимости от профиля шипов оцениваются в 40–70 % прочности массивной древесины без пороков.

Качество сращивания на производстве большепролетных несущих конструкций рассмотрено в работе [7]. Высота шипового соединения 20 мм, склеивание осуществлялось с использованием ммФ клея. Большая часть склеенных по длине на зубчатые клеевые соединения заготовок при производственных испытаниях разрушается по древесине, а меньшая их часть – по древесине и клею.

Зубчатый шип хорошо работает на растяжение, изгиб, кручение и сжатие [8]. От возникающих растягивающих усилий N зубчатой поверхности стыка возникают основные скалывающие напряжения t ,

действующие под небольшими углами к направлению волокон древесины, и дополнительные растягивающие напряжения σ , действующие поперек волокон древесины. Эти напряжения не превышают напряжений, возникающих при расчетной несущей способности стыка, поскольку площадь зубчатой его поверхности достаточно велика. Разрушение зубчатого шипа происходит мгновенно от главных растягивающих напряжений. Эти напряжения имеют максимальную величину у концов зубьев, где остаются небольшие отверстия (шириной s) после изготовления шипа и поверхность разрыва всегда происходит через эти отверстия. Однако, ослабление шипа через эти отверстия значительно меньше, чем ослабление сечения досок первого сорта пороками [9]. В клеевых соединениях при условии правильного их проектирования отсутствуют высокие уровни концентрации напряжений, что позволяет в полной мере реализовать свойства материалов. Однако, клеевые соединения требуют значительно большей площади контакта между материалами и клеевым слоем для того, чтобы выдерживать такую же нагрузку, что и в случае использования механического крепления [10].

Заключение

Новые нормативные документы должны учитывать накопленный отечественный и зарубежный опыт по применению новых решений в области конструирования, использовать актуальные результаты НИОКР в области изучения свойств зубчатых клеевых соединений, определения нормируемых параметров и совершенствования конструктивных решений, отвечающим требованиям безопасности зданий и сооружений в соответствии с Федеральным законом № 384 «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений»

В связи с тем, что в промышленности широко используется шиповое соединение для сращивания с высотой шипа 15 мм, рекомендуем внести изменения в проект ГОСТ 19414-2021:

1. Дополнить перечень геометрических размеров зубчатого соединения длиной шипа 15мм.
2. Внести изменения, касающиеся зазора в шиповом соединении после проведения соответствующей НИОКР.

Литература

1. ГОСТ 19414-2017 «Конструкции деревянные клееные. Общие требования к зубчатым клеевым соединениям».
2. ГОСТ 19414-90 «Древесина клееная массивная. Общие требованиям к зубчатым клеевым соединениям».
3. ГОСТ 20850-2014 «Конструкции деревянные клееные несущие. Общие технические условия».
4. *Черных А. Г., Бызов В. Е.* Краткий курс лекций «Международная нормативная база проектирования «Еврокоды»». Учебное пособие / СПб. 2014. – 80 с.
5. *Рублева О. А.* Методика оценки уровня качества шиповых соединений URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodika-otsenki-urovnya-kachestva-shipovyh-soedineniy>.
6. ГОСТ 15467-79 (СТ СЭВ 3519-81) Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения.
7. Производственные показатели прочности склеенных по длине заготовок для клееных деревянных конструкций. Успенская Н.А., Казакевич Т.Н.// Строительная механика и расчет сооружений. 2014. № 3(254), с. 62–66.
8. *Поциус А. В.* Клей, адгезия, технология склеивания /Перевод с английского Ю.А. Гаращенко. Под редакцией Г. В. Комарова СПб. : Профессия, 2007. – 376 с.
9. *Ведяков И. И., Погорельцев А. А., Пятикрестовский К. П.* Перспективы совершенствования норм проектирования деревянных конструкций // Промышленное и гражданское строительство. – 2015. – № 4. – С. 28–32.
10. Оценка прочности зубчатого шипа в балочных деревянных конструкциях. Мальхина В. С., Фролов Н. В., Фам Суан Хуан Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова, 2016. № 5, 80– 83 с.

УДК 691:694

Егор Владимирович Данилов,
канд. техн. наук, доцент
Максим Сергеевич Росляков,
студент
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный
университет)
E-mail: sleepme@mail.ru,
maks.roslyakov.85@mail.ru

Egor Vladimirovich Danilov,
PhD in Sci. Tech., Associate Professor
Maxim Sergeevich Roslyakov,
student
(Saint Petersburg
State University of Architecture
and Civil Engineering)
E-mail: sleepme@mail.ru,
maks.roslyakov.85@mail.ru

**ИССЛЕДОВАНИЯ ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ
И ДЕФОРМАТИВНОСТИ СОЕДИНЕНИЙ
С КОГТЕВЫМИ ШАЙБАМИ
В КОНСТРУКЦИЯХ ИЗ LVL**

**STUDIES OF LONG-TERM STRENGTH
AND DEFORMABILITY OF JOINTS
WITH CLAW WASHERS IN LVL STRUCTURES**

В данной работе проведен обзор и анализ существующих исследований длительной прочности и деформативности нагельных соединений. Работа выполнена с целью поиска решения ползучести нагельных соединений в LVL, с помощью когтевых шайб. Длительная прочность данных соединений в настоящее время недостаточно изучена и требует дальнейших исследований. Проанализированы работы над нахождением зависимости длительной прочности от влажности и угла наклона волокон, исследована длительная прочность соединений на МЗП. С целью поиска недостающих данных в этой области, а также разработки плана и методики дальнейшего исследования данных соединений.

Ключевые слова: LVL, нагельное соединение, длительная нагрузка, ползучесть.

In this paper, a review and analysis of existing studies on the long-term strength and deformability of nail joints is carried out. The work was carried out in order to find a solution to the creep of nail joints in LVL, using claw washers. The long-term strength of these compounds is currently insufficiently studied and requires further research. The work on finding the dependence of long-term strength on humidity and the angle of inclination of the fibers is analyzed, the long-term strength of the joints on the MZP is investigated. In order to search for missing data in this area, as well as to develop a plan and methodology for further investigation of these compounds.

Keywords: LVL, nail connection, long-term load, creep.

Введение

Древесина, как строительный материал в России, используется достаточно редко, в основном при строительстве малоэтажных жилых и общественных зданиях, как несущая конструкция покрытия. Применение древесины в более масштабных проектах раньше являлось практически невозможным из-за ряда ее минусов, таких как ползучесть соединений, а также более низкие расчетные характеристики по сравнению с более популярными материалами, такие как строительная сталь и железобетон. Однако с течением временем был разработан *LVL*-брус. Данный материал по сравнению с обычной древесиной обладает более высокими расчетными характеристиками и меньшими анизотропными свойствами, что сделало древесину конкурентоспособным материалом в строительной отрасли. Данная работа выполнена с целью поиска решения ползучести нагельных соединений в *LVL*, с помощью когтевых шайб. Длительная прочность данных соединений в настоящее время недостаточно изучена и требует дальнейших исследований.

Исследование длительной прочности нагельных соединений

Данной тематикой занимались как зарубежные, так и российские ученые. Длительную прочность нагельных соединений исследовали такие ученые как Н. В. Шешукова и Б. К. Михайлов [1, 2]. Они провели работу над нахождением зависимости длительной прочности от влажности и угла наклона волокон. Длительные испытания проводились на пружинных установка, изображенных на рис. 1.

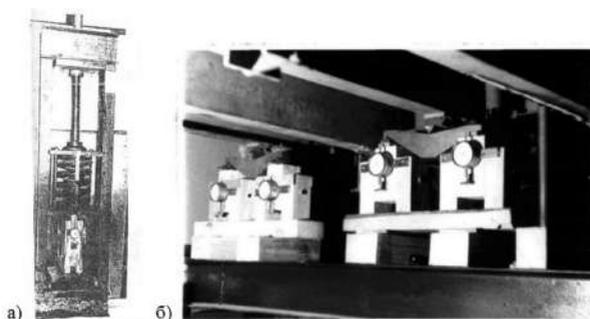


Рис. 1. Испытания нагельных соединений: *а* – длительные испытания в исследовании Н. В. Шешуковой [1]; *б* – испытания В. Н. Шапошникова [3]

Испытывалось 3 партии образцов влажностью 8 %, 12 % и 30 %, в одной партии 5 образцов. Образец представлял собой 3 доски соединенных между собой одним нагелем, сопряженных под углом 0° и 90°, с зазором 1 мм для предотвращения возникновения сил трения.

В результате эксперимента была выявлена зависимость результатов от влажности и направления волокон образцов, а также составлены кривые деформаций с течением времени для образцов влажностью 12 %. В результате исследования было разработано уравнение, описывающее деформации ползучести [1].

$$\varepsilon(t) = \frac{\alpha(1 + k_1 t^\beta)\sigma}{(1 - b(1 + k_1 t^\beta)\sigma)} \quad (1)$$

где s – напряжение; $\varepsilon(t)$ – деформация; t^β – время наблюдения; α , b , k_1 – коэффициенты.

Но в своих исследованиях Н. В. Шешукова и Б. К. Михайлов [1, 2] не произвели испытания другими методами, вследствие чего невозможно оценить методику испытаний, которая наиболее приближена к работе нагельных соединений в строительных конструкциях, также не было предусмотрена возможность усиления нагельных соединений в деревянных конструкциях, к примеру когтевых шайб, и их влияние на конечные результаты длительной прочности древесины.

Также изучению подлежала работа В. Н. Шапошникова [3]. В своем исследовании В. Н. Шапошников составил математическую модель многонагельного соединения при действии длительных нагрузок. Данная модель была основана на обобщенном законе Гука. С помощью данной модели возможно определить деформации в нагельном соединении в определенный промежуток времени. В. Н. Шапошников провел серию испытаний нагельных соединений на длительную нагрузку. Были взяты образцы, которые представляли из себя 3 бруска, скрепленных одним нагелем. Данные образцы были помещены под рычажную установку, нагрузка на образцы передавалась через призму. Нагрузки на образцы была принята 0.4, 0.5, 0.6 и 0.7 от предельной кратковременной. Данная установка изображена на рисунке 2.

По итогу испытаний была составлена таблица с результатами испытаний [3].

**Результаты испытаний
В. Н. Шапошникова**

Показатель	Образцы под нагрузкой Р в кН			
	0,4 Р _D = 8,8	0,5 Р _D = 11,0	0,6 Р _D = 13,2	0,7 Р _D = 15,4
I	2	3	4	5
Деформация соединения в момент загрузки, мм	<u>0,277 - 0,280</u> 0,279	<u>0,570 - 0,595</u> 0,582	<u>0,990 - 1,132</u> 1,061	<u>1,497 - 1,615</u> 1,556
Приращение деформации за 30 суток нагружения, мм	<u>0,132 - 0,150</u> 0,141	<u>0,095 - 0,207</u> 0,151	<u>0,560 - 0,520</u> 0,540	<u>1,097 - 1,100</u> 1,099
Полные деформации на 30 суток нагружения, мм	<u>0,410 - 0,430</u> 0,420	<u>0,665 - 0,802</u> 0,734	<u>1,550 - 1,652</u> 1,601	<u>2,595 - 2,715</u> 2,655
Среднее отношение полных деформаций сдвига к начальным	1,507	1,259	1,508	1,706
Остаточная деформация в момент разгрузки, мм	<u>0,125 - 0,168</u> 0,146	<u>0,118 - 0,210</u> 0,164	<u>0,615 - 0,485</u> 0,550	<u>1,192 - 1,531</u> 1,362
Упругая деформация в момент разгрузки, мм	<u>0,285 - 0,262</u> 0,274	<u>0,547 - 0,592</u> 0,570	<u>0,935 - 1,167</u> 1,051	<u>1,402 - 1,183</u> 1,293
Уменьшение деформаций за 30 суток отдыха, мм	<u>0,072 - 0,070</u> 0,071	<u>0,032 - 0,040</u> 0,036	<u>0,075 - 0,067</u> 0,071	<u>0,080 - 0,084</u> 0,082
Остаточная деформация на 30 суток после разгрузки	<u>0,052 - 0,097</u> 0,075	<u>0,085 - 0,170</u> 0,127	<u>0,540 - 0,417</u> 0,497	<u>1,112 - 1,447</u> 1,280
Среднее отношение остаточной деформации к остаточной в момент разгрузки	0,514	0,774	0,871	0,940

Но в работе Шапошникова не учтена возможность усиления соединения, к примеру когтевой шайбой, и влияние усиления на результаты испытаний, также не представлены испытания на установках со штампами другой формы и размеров, что не позволяет оценить приближенность испытаний к реальной работе нагельного соединения.

Также можно выделить работы Крицина А. В. [4]. Крицын А. В. исследовал длительную прочность соединения на МЗП. Были проведены испытания по воздействию осевой силы и изгибающего момента. Были произведены испытания 8 образцов для апробации математической модели. Опытные образцы показана на рисунке 2.

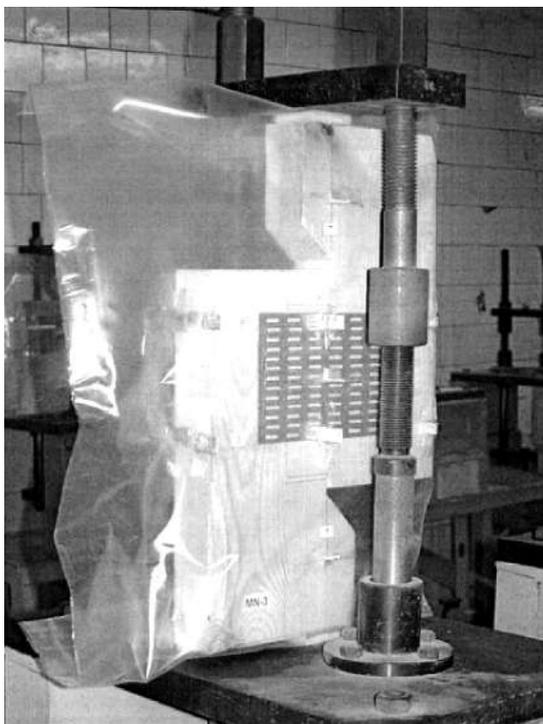


Рис. 2. Образец для испытаний А. В. Крицина [4]

По результатам исследований была выведена формула модуля упругости, учитывающая не только упруговязкие деформации, но и накопление остаточных деформаций [4].

$$E_{\text{дл}} = \frac{E_{\text{н}}}{(\psi_1 * (1 + b * \tau^{0,21}) + \psi_2 * (1,1 + 0,114 * 10^{(-5)*\tau}))} \quad (2)$$

где $E_{\text{н}}$ – кратковременный модуль упругости древесины с влажностью W ; ψ_1 и ψ_2 – доли соответственно нормативной постоянной и нормативной снеговой нагрузки по отношению к полной нормативной нагрузке; τ – продолжительность нормативного срока службы, ч; b – параметр, характеризующий изменение скорости деформации в зависимости от влажности;

$$b = \frac{0,01}{0,735 - 0,02087 * W\%} \quad (3)$$

$$A = 1,21 * 10^{(-6)} W - 1,076 * 10^{(-5)} \quad (4)$$

В данной работе были рассмотрены соединения на МЗП, но не были испытаны нагельные соединения.

Была рассмотрена работа Ермолаева В. В. [5]. В своем исследовании Ермолаев изучал влияние влажности на длительную прочность и деформативность на МЗП. Эксперимент по определению прочности длительной прочности заключался в том, что два деревянных бруска влажность 7 %, 12 % и 30 %, соединенных торцами МЗП подвергли испытаниям на разрывной машине МР-0.5, при непрерывном нагружении и ступенчато-возрастающей нагрузке (рис. 3).

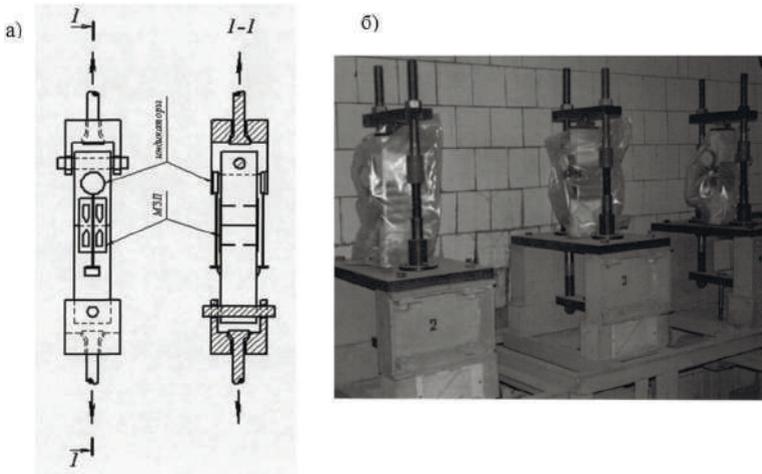


Рис. 3. Схемы проведения испытаний: *a* – схема проведения испытаний на длительную прочность МЗП-соединений [5];
б – испытание на ползучесть соединения на МЗП [5]

По результатам испытаний значение разрушающих нагрузок для древесины влажности 7 % составило 536,2 Н, для древесины влажностью 12 % 486,3 Н, для древесины влажностью 30 % 343,4 Н. Данный результат доказал зависимость длительной прочности от

влажности древесины. Ползучесть МЗП определялась экспериментом с двумя типами образцов. В первом типе два бруска соединялись МЗП, широкой плоскостью зуба вдоль волокон, во втором типе широкой плоскостью поперек волокон. Проведение испытаний изображено на рис. 4. Испытание проводилось на рычажных установках. Значения влажности для образцов первого типа составили 6,25 %, 9,54 %, 18 % и 21,95 %, для второго типа 9,5 %, 15,5 %, 25,4 % и 30 %. Нагрузка на образец передавалась через стальные шары.

В результате испытаний аппроксимирована математическая модель соединения на МЗП. В работе Ермолаева не исследованы нагельные соединения Жук В. В. и Матвиенко Е. С. изучали расчет соединений на гвоздях [6]. В данной работе рассмотрено сравнение нормативных документов на расчет соединения на гвоздях. По результатам исследований выявлены дополнительные параметры, учитываемые в расчете данных соединений, в соответствии с Еврокодом. В данном исследовании нет информации о других нагельных соединениях и о возможности усиления данного соединения.

Особое внимание следует обратить на работы Данилова Е. В. [7-12]. В них описываются методы определения длительной прочности нагельных соединений с использованием когтевых шайб в *LVL*, а также длительной прочности *LVL*-бруса. Методика определения длительной прочности *LVL*-бруса заключается в проведении испытаний посредством вдавливания штампов треугольной и цилиндрической формы в древесину влажности 9,8 % и 11,2 %.



Рис. 4. Проведение испытаний *LVL*-древесины на длительную прочность треугольными штампами с разной высотой [7]

По результатам данных испытаний была выявлена зависимость деформаций в *LVL*-брусе от геометрических размеров штампов. Ползучесть в *LVL* возможно определить с помощью уравнения 5, используемое Крицыным А. В.

$$K_0(t)_{t=0} = \frac{c}{\sigma_0} * \frac{d\delta(t)}{dt} \quad (5)$$

где c – мгновенный коэффициент постели, Н/мм³; σ_0 – напряжение под штампом, МПа; $\frac{d\delta(t)}{dt}$ – скорость роста деформаций упругого последействия, мм/сек.

Данное уравнение возможно упростить (уравнение 6)

$$K_0(t) = A \frac{e^{-\beta t}}{t^{1-\alpha}} \quad (6)$$

где A , α , β – постоянные уравнения. Параметр A и влажность пря-мо пропорциональны

$$A = 1,21 * 10^{(-6)} W - 1,076 * 10^{(-5)} \quad (7)$$

В данной работе не исследовано влияние геометрических параметров штампов при испытании нагельных соединений с когтевыми шайбами.

Выводы

Проанализировав существующие исследования длительной прочности и деформативности соединений *LVL*-конструкций можно сделать вывод, что имеющихся данных для достоверного проектирования недостаточно. Так, сведения о прочности *LVL* при вдавливании штампов цилиндрической и треугольной формы при различной влажности и угле наклона недостаточны, а также отсутствуют данные о зависимости значения прочности соединения с когтевыми шайбами при действии длительной нагрузки от геометрических параметров штампов. Необходимо произвести испытания нагельного соединения с когтевыми шайбами в *LVL*, а также требуются испытания прочности *LVL* при вдавливании треугольных и цилиндрических штампов с разными геометрическими характеристиками для нахождения недостающих прочностных и жесткостных характеристик, применяемых для уточненной методики расчета соединений с когтевыми шайбами в *LVL*-конструкциях.

Литература

1. *Шешукова Н. В.* Длительная прочность и деформативность деревянных конструкций на нагельных соединениях / Н. В. Шешукова, Б. К. Михайлов // Санкт-Петербург : СПбГАСУ, 2006. – С. 169.
2. *Шешукова Н. В.* Развитие методов прогнозирования деформативности древесины с учетом влажности / Н. В. Шешукова, Б. К. Михайлов // ISSN 0536-1036. ИВУЗ. «Лесной журнал». 2007. № 1. – С. 88–93.
3. *Шапошников В. Н.* Особенности работы многонагельных соединений элементов деревянных конструкций и теория их расчета при действии кратковременных, длительных и повторных нагрузок: Автореф. дисс. канд. техн. наук: 05.23.01 – Новосибирск, 1983 – С. 20.
4. *Крицин А. В.* Расчет сквозных деревянных конструкций на металлических зубчатых пластинах с учетом упруго-вязких и пластических деформаций : дисс. канд. техн. наук: 05.23.01 /Крицин А. В. ; Нижний Новгород : НГАСУ, 2004. – С. 180.
5. *Ермолаев В. В.* Влияние влажности древесины на длительную прочность и ползучесть соединений строительных конструкций на МЗП: дисс. канд. техн. наук: 05.23.01/ Нижний Новгород: НГАСУ, 2009. – 20 с.
6. *Жук В. В.* Расчет соединений деревянных элементов на гвоздях. Отечественный и зарубежный опыт/ В. В. Жук, Е. С. Матвеевко// Вестник Брестского государственного технического университета – 2022 – № 2 – С. 6–10.
7. *Данилов Е. В.* Развитие методов расчета соединений деревянных конструкций из однонаправленного клееного бруса с когтевыми шайбами: Автореф. дисс. канд. техн. наук: 05.23.01 – Санкт-Петербург : СПбГАСУ, 2019. – 11 с.
8. *Данилов Е. В.* Методы исследования соединений деревянных конструкций на когтевых шайбах/ Е. В. Данилов, А. Г. Черных //Санкт-Петербург : СПбГАСУ.
9. *Данилов Е. В.* Расчет жесткости соединений конструкций из *LVL* с когтевыми шайбами/ Е. В. Данилов, А. Г. Черных, П. С. Коваль //ISSN 0536-1036 «Известия вузов. Лесной журнал». 2020. № 4 – 156 – 167 с.
10. *Данилов Е. В.* Исследование кратковременной прочности *LVL* при смятии треугольным штампом/ Вестник гражданских инженеров. 2014. № 1 (42) – 28–33 с.
11. *Данилов Е. В.* К вопросу определения несущей способности нагельных соединений в конструкциях из бруса, клееного из однонаправленного шпона (*LVL*) / Е. В. Данилов, А. Г. Черных, К. С. Григорьев, П. С. Коваль, В. В. Бакрышева, И. Т. Кашапов// Санкт-Петербург: СПбГАСУ.
12. *Данилов Е. В., Глухих В. Н., Черных А. Г.* Деревянные конструкции с применением когтевых шайб и учетом начальных напряжений древесины/ Е. В. Данилов, В. Н. Глухих, А. Г. Черных// Санкт-Петербург: СПбГАСУ моногр., 2018 г.

УДК 691:661.1

Александр Евгеньевич Кочнев,
студент

Леонид Дмитриевич Никандров,
студент

(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный
университет)

E-mail: sleepme@mail.ru,

mortalfolly23@mail.ru,

lenya.nickandrov@yandex.ru

Alexandr Evgenyevich Kochnev,
student

Leonid Dmitrievich Nikandrov,
student

(Saint Petersburg
State University of Architecture
and Civil Engineering)

E-mail: sleepme@mail.ru,

mortalfolly23@mail.ru,

lenya.nickandrov@yandex.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ НАГЕЛЬНЫХ СОЕДИНЕНИЙ В КОНСТРУКЦИЯХ ИЗ LVL

INVESTIGATION OF THE LONG-TERM STRENGTH OF NAGEL JOINTS IN LVL STRUCTURES

Проведены исследования совместной работы нагельных и когтевых соединителей в работе элементов из LVL под воздействием длительных нагрузок различных уровней. В качестве экспериментальных использовались двухсрезные симметричные нагельные соединения, сплачиваемые под различными углами с установленной парой когтевых шайб и одним нагелем. Испытания проходили две серии образцов, поделенных на группы по процентному содержанию влаги (8 и 15 %). По результатам были построены графики относительных перемещений и ползучести соединений, свидетельствующие о том, что из-за увеличения влажности и увеличения угла между направлением волокон крайних и среднего элемента, наблюдаются изменение ползучести для всех испытанных образцов.

Ключевые слова: LVL, нагельное соединение, длительная нагрузка, ползучесть.

Studies of the joint operation of nagel and claw connectors in the operation of LVL elements under the influence of prolonged loads of various levels have been carried out. As experimental samples, two-cut symmetrical nagel joints were used, joined at different angles with a pair of claw washers and one nagel installed. The test was carried out in two series of samples divided into groups according to the percentage of moisture (8 and 15 %). Based on the results obtained, graphs of relative displacements and graphs of creep of the joints were constructed, indicating that due to an increase in humidity and an increase in the angle between the direction of the fibers of the extreme and middle elements, a change in creep is observed for all tested samples.

Keywords: LVL, nagel connection, long-term load, creep.

Введение

В настоящее время отмечается высокий интерес к использованию деревянных конструкций при строительстве общественных и промышленных зданий, но ограничения, характерные для древесины, препятствуют ее использованию в конструкциях конкурентноспособных с другими материалами. Однако на рынке появились материалы из инженерной древесины, прочностные характеристики которых значительно выше, и возможность применения их в строительстве возрастает, например, брус *LVL*. Для современных *LVL*-конструкций обосновано применение нагельных соединений с когтевыми шайбами, обладающими высокой прочностью и жесткостью. В существующих нормативных документах подробно не отражено влияние длительной нагрузки на характер одновременной работы двух разных соединителей. Существующих исследований по данной тематике недостаточно. Наблюдается необходимость в апробации существующей математической модели соединения с нагельными и когтевыми шайбами с учетом длительного действия нагрузки. Поэтому исследования, проводимые с целью оптимизации методик расчета проектирования соединений деревянных конструкций, выполненных из бруса клееного однонаправленного шпона с применением когтевых шайб, является актуальными.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование деформированного состояния нагельных соединений конструкций с когтевыми шайбами при длительном действии нагрузки. В работе ставятся следующие задачи: провести обзор существующих исследований нагельных соединений с когтевыми шайбами; разработать методику испытаний нагельных соединений на деформативность при действии длительной нагрузки; провести испытания нагельных соединений по разработанной методике; проанализировать полученные результаты.

Методы испытаний

Был произведен анализ состояния вопроса и обзор существующих исследований нагельных соединений. Было изучено более 15 исследований нагельных соединений при действии длительной нагрузки, включая отечественный и зарубежный опыт.

Вопросами разработки эффективных зубчатых пластин занимался Дурновский А. М. [1]. Вопросами длительной прочности и деформативности соединений элементов деревянных конструкций на МЗП известны работы Цепаева В. А., Ермолаева В. В. [2, 3, 4, 5], Крицина А. В., Лоскутовой Д. В., [6, 7]. Нагельные соединения исследовались Дмитриевым П. А. [8, 9, 10, 11], Шапошниковым В. Н. [12], Шешуковой Н. В., Михайловым Б. К. [13, 14], Пуртовым В. В., Павликом А. В. [15], Даниловым Е. В. [16] и др. Исследованием влияния изменения климата на деревянные соединения с МЗП и когтевыми шайбами занимался Ян Виллем ван де Кулен [17]. Сравнил работу соединений с когтевыми шайбами с другими соединениями Д. Х. Бласс [18-20]. Изучением влияния длительного нагружения на соединения древесины с когтевыми шайбами посвящены работы [21-23]. Статья, посвященная обзору данных источников, была опубликована в сборнике статей [24].

Основываясь на данных исследованиях, можно сделать вывод, что в основном все исследования рассматривают поведение соединений конструкций из цельной древесины, при этом исследований, посвященных *LVL*-конструкциям, недостаточно. Нормативные документы, регламентирующие расчет нагельных соединений с когтевыми шайбами в условиях действия длительной нагрузки.

Описанные методы исследований позволяют получить новые сведения о поведении нагельных соединений с когтевыми шайбами в *LVL*-конструкциях при действии длительных воздействий, которые могут использоваться для дальнейших исследований с целью внесения предложений по актуализации норм проектирования.

Для изучения воздействия длительной нагрузки было принято решение произвести экспериментальное исследование. Методика проведения испытаний подразумевала подготовку двухсрезных симметричных нагельных соединений, сплавляемых под углом 0° , 45° , 90° волокон с установленной парой когтевых шайб и одним нагелем без гайки (рис. 1). Форма и диаметр соединений принимаются в соответствии с СтАДД – 3.2. – 2011 [25]. Для изготовления образцов используется материал *LVL Ultralam R* с толщиной 63 мм. В узле применяются двухсторонние зубчато-кольцевые пластины С1, диаметром 75 мм. В качестве нагеля используется гладкая арматура диаметром 16 мм.

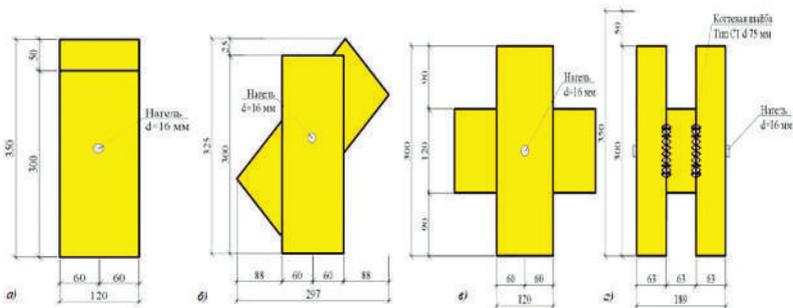


Рис. 1. Геометрические характеристики образцов для угла между направлением волокон крайних и среднего элементов:
 $a - 0^\circ$, $b - 45^\circ$, $c - 90^\circ$; $d -$ вид сбоку

Испытания производятся на пружинных установках. Перед испытаниями производится тарировка пружинных установок на необходимую нагрузку с помощью динамометра с точность до 0,1 кН. Для измерения деформаций к образцам прикрепляются индикаторы часового типа с ценой деления 0,01 мм. С целью предотвратить раскрытие щелей между центральным и средним элементами соединения должны быть оснащены металлическими хомутами-зажимами (рис. 2).



Рис. 2. Схема проведения длительных испытаний

Проведение испытаний производится в несколько серий. Испытывается 24 образца (два дубликата для четырех типов испытаний). В зависимости от влажности все образцы делятся на две партии с влажностью 8 и 15 %. Уровень нагружения для соединений принимается 50 и 60 % от максимальной разрушающей нагрузки. Продолжительность нагружения составляет 40 суток и еще предусматривается срок в течении 10 суток после снятия нагрузки для измерения остаточных деформаций. Проведение испытаний выполняется согласно существующим рекомендациям [26] и ГОСТ Р 57158–2016 [27]. Характеристики образцов и испытаний приведены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики образцов и проводимых испытаний

Характеристика соединения	Номер группы испытаний			
	1	2	3	4
Для угла между направлением волокон крайних и среднего элементов 0°				
Влажность древесины, W , %	8	15	8	15
Уровень нагрузки, кН	0,5	0,5	0,6	0,6
Диаметр нагеля d , мм	16	16	16	16
Толщина элементов t , мм	63	63	63	63
Для угла между направлением волокон крайних и среднего элементов 45°				
Влажность древесины, W , %	8	15	8	15
Уровень нагрузки, кН	0,5	0,5	0,6	0,6
Диаметр нагеля d , мм	16	16	16	16
Толщина элементов t , мм	63	63	63	63
Для угла между направлением волокон крайних и среднего элементов 90°				
Влажность древесины, W , %	8	15	8	15
Уровень нагрузки, кН	0,5	0,5	0,6	0,6
Диаметр нагеля d , мм	16	16	16	16
Толщина элементов t , мм	63	63	63	63

Для выполнения экспериментального исследования по указанной методике производилась заготовка образцов. Для насыщения необходимой влагой образцов (8 и 15 %) они кондиционировались в лаборатории в течении двух месяцев, а также вымачивались в воде. Для образцов 8 % влажности условия кондиционирования составляли влажность воздуха 60 %, температура 22 °С. Для достижения 15 % влажности элементы вымачивались в воде (рис. 3) до проектного насыщения влагой. Для равномерного распределения влажности по сечению элемента после вымачивания образцы кондиционировались два месяца, путем заворачивания в стрэч-пленку.



Рис. 3. Процесс вымачивания элементов соединения для достижения 15 % влажности

Для определения максимальной разрушающей нагрузки были произведены пробные кратковременные испытания образцов вдоль, поперек и под углом 45 градусов с влажностью 8 % и 15 %. Скорость приложения нагрузки составила 2 мм/мин. По результатам испытаний представлены в табл. 2.

Результаты кратковременных испытаний

	Влажность образца W , 8 %			Влажность образца W , 15 %		
	0°	45°	90°	0°	45°	90°
Угол между направлением волокон крайних и среднего элементов	0°	45°	90°	0°	45°	90°
F_{I-II} – нагрузка соответствующая точке перехода в пластическую стадию, кН	42	27	22	28	18	15
F_{max} – максимальная разрушающая нагрузка, кН	55	42	45	37	28	30

В первой серии основных испытаний на длительное действие нагрузки были испытаны образцы с влажностью 8 % и нагрузкой $0,5F_{I-II}$. Во второй серии испытания испытывались аналогичные образцы, но с нагрузкой $0,6F_{I-II}$. В третьей серии испытаний были испытаны образцы с 15 % влажностью и нагрузкой $0,5F_{I-II}$. Во четвертой серии испытывались аналогичные образцы, но с нагрузкой $0,6F_{I-II}$ (рис. 4).



Рис. 4. Длительные испытания нагельных соединений с когтевыми шайбами

Результаты

По результатам испытаний были построены графики относительных перемещений (рис. 5–6) и графики ползучести соединений (рис. 7).

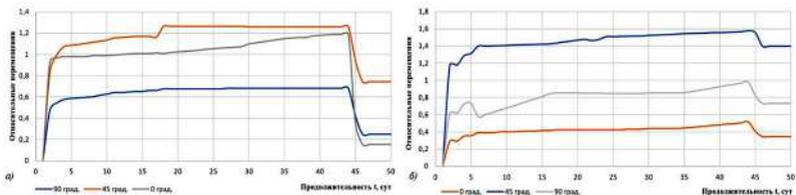


Рис. 5. Относительные перемещения соединений во времени:
a – уровень нагрузки $0,5F_{1-II}$; *б* – уровень нагрузки $0,6F_{1-II}$

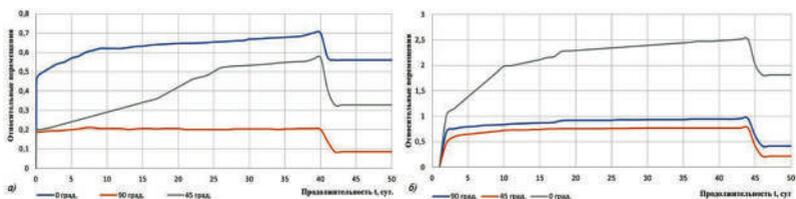


Рис. 6. Относительные перемещения соединений во времени:
a – уровень нагрузки $0,5F_{1-II}$; *б* – уровень нагрузки $0,6F_{1-II}$

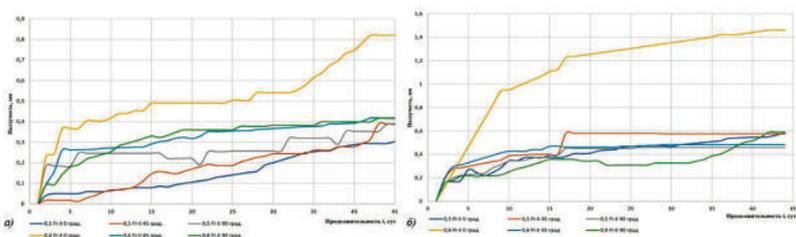


Рис. 7. Ползучесть соединений:

a – влажностью 8 % во времени при нагрузке $0,5F_{1-II}$ и $0,6F_{1-II}$;
б – влажностью 15 % во времени при нагрузке $0,5F_{1-II}$ и $0,6F_{1-II}$

Обсуждения

На рисунках 5 и 6 видно, что на протяжении всего испытания для всех образцов вне зависимости от влажности и угла наклона

к волокнам характерны наибольшие скорости деформирования в первые сутки после нагружения, что является характерным для всех упруго-вязких материалов. Также после снятия нагрузки образцы восстанавливали до 80 % от начальных значений перемещений, это говорит о том, что образцы способны к восстановлению при уровнях нагрузки $0,5F_{I-II}$ и $0,6F_{I-II}$. На рисунке 7 наблюдается увеличение ползучести в рассматриваемые промежутки времени (40 суток), что может быть объяснено необходимостью расширения срока исследований до 100 и более суток.

В ходе анализа экспериментальных данных можно сделать вывод, что из-за увеличения влажности и увеличения угла между направлением волокон крайних и среднего элемента, при действии длительной нагрузки наблюдаются увеличение ползучести для всех испытанных образцов. В среднем ползучесть увеличивается на 60 %. Наибольший прирост ползучести заметен в образцах с углом направления волокон 0° . Наименьший прирост ползучести характерен для образцов с углом направления волокон 90° . На протяжении всего испытания кривые ползучести имеют затухающий характер. Рост ползучести в среднем прекращается на 25 суток испытаний. Это говорит о том, что образец стабилизировался. Испытания показывают, что рост ползучести в большей степени зависит от уровня нагрузки, с повышением нагрузки происходит не только увеличение значений ползучести, но и увеличение скорости ползучести.

Таким образом, в результате исследований была разработана методика испытаний нагельных соединений из *LVL* с когтевыми шайбами при действии длительной нагрузки. Методика подразумевает проведение испытаний в течении 40 суток под нагрузкой и наблюдение в течении 10 суток после разгрузки с фиксацией соответствующих смещений. Были проведены испытания соединений влажностью 8 % и 15 %, углом наклона волокон 0° , 45° , 90° и уровнем нагружения $0,5F_{I-II}$ и $0,6F_{I-II}$. В результате длительных испытаний были получены значения ползучести, которые могут быть использованы оптимизации методик расчета нагельных соединений с когтевыми шайбами.

Литература

1. Дурновский А. М. Разработка и исследование соединений деревянных конструкций металлическими зубчатыми пластинами: Автореф. дисс. канд. техн. наук: 05.23.01 / Дурновский А. М.; М. 1982. – 22 с.

2. *Ермолаев В. В.* Влияние влажности древесины на длительную прочность и ползучесть соединений строительных конструкций на МЗП: Автореф. дисс. канд. техн. наук: 05.23.01 – Казань, 2009. – 20 с.
3. *Цапаев В. А.* Исследование длительной прочности и деформативности соединений элементов деревянных конструкций на металлических зубчатых пластинах: дисс. канд. тех. наук: 05.23.01 – М., 1982 г. – 201 с.
4. *Цапаев В. А.* Контроль деформативности соединений на металлических зубчатых пластинах / Цапаев В. А.; Механическая обработка древесины. Научн.-техн. реф. сб. – М.: ВНИПИЭИ леспром, 1985. Вып. 2. – с. 15–16.
5. *Цапаев В. А.* Контроль деформативности соединений на металлических зубчатых пластинах. / Цапаев В. А.; Механическая обработка древесины. 1985, № 2, с. 15–16.
6. *Крицин А. В.* Расчет сквозных деревянных конструкций на металлических зубчатых пластинах с учетом упруго-вязких и пластических деформаций: дисс. канд. техн. наук: 05.23.01 / Крицин А. В.; Нижний Новгород. – 2004. – 180 с.
7. *Лоскутова Д. В.* Прочность и деформативность узловых соединений на МЗП в сквозных деревянных конструкциях: дисс. канд. техн. наук: 05.23.01 / Лоскутова Д. В.; Томск, 2009 г., 174 с.
8. *Дмитриев П. А.* Исследование длительной несущей способности соединений деревянных элементов на стальных цилиндрических нагелях. / Дмитриев П. А.; Известия вузов. Строительство и архитектура № 5, 1973 г. – с. 28–35.
9. *Дмитриев П. А.* Исследование прочности древесины на смятие в отверстиях поперек волокон при действии кратковременных и длительных нагрузок. / Дмитриев П. А. Стрижаков Ю. Д. // Известия вузов. Строительство и архитектура, 1969, № 7, с. 22–28.
10. *Дмитриев П. А.* Исследование смятия древесины в отверстиях с помощью оптически чувствительных покрытий. / Дмитриев П. А., Жилкин В. А., Стрижаков Ю. Д. // Известия вузов. Строительство и архитектура, 1971, № 2 – с. 18–24.
11. *Дмитриев П. А.* Исследование деревянных элементов на дюбелях при действии кратковременных нагрузок / П. А. Дмитриев, Ю. Д. Стрижаков // Изв. вузов. Строительство и архитектура, 1969. – № 8. – с. 41–49.
12. *Шапошников В. Н.* Особенности работы многонагельных соединений элементов деревянных конструкций и теория их расчета при действии кратковременных, длительных и повторных нагрузок: Автореф. дисс. канд. техн. наук: 05.23.01 – Новосибирск, 1983 – 20 с.
13. *Шешукова Н. В.* Длительная прочность и деформативность деревянных конструкций на нагельных соединениях / Н. В. Шешукова, Б. К. Михайлов / Санкт-Петербург: СПбГАСУ, 2006. – 169 с.
14. *Шешукова Н. В.* Несущая способность и деформативность нагельных соединений деревянных конструкций при циклическом нагружении: дисс. канд. наук: 05.23.01, СПб. 2001. – 156 с.

15. Пуртов В. В. Расчет в программе ANSYS деревянных конструкций с крепежными элементами повышенной несущей способности / В. В. Пуртов, А. В. Павлик // VII Международный симпозиум «Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений (APCSCE 2018)»: программа и тезисы докладов (Новосибирск, 1–8 июля 2018 г.). – Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин), 2018. – с 72.
16. Данилов Е. В. Развитие методов расчета соединений деревянных конструкций из однонаправленного клееного бруса с когтевыми шайбами: Автореф. дисс. канд. техн. наук: 05.23.01 – Санкт-Петербург, 2019. – 11 с.
17. Van de Kuilen, J-W.G. Duration of load effects in timber joints, Dissertation Delft University of Technology / Van de Kuilen, J-W.G. // Creep of timber joints Delft University of Technology, The Netherlands. 1999. – 342 p.
18. Blass H. J., Aune P., Choo B. S., Gortlacher R., Griffiths D. R., Hilson B. O., Racher P., Steck G. Timber Engineering. Netherlands: Centrum Hout, 1995.
19. Blass H. J., Schlager M. Trial calculations for determination of the load-carrying capacity of joints with Bulldog connectors. CEN/TC 124/WG4 N23, April 1993.
20. Blass J. H., Ehlbeck J., Schlager M. Characteristic strength of toothed-plate connector joints. Holz als Roh und Werkstoff, 51, 1993, p. 395–399.
21. Kurstjens P. B. J., Stolle P. Creep and damage research on timber joints. Part four. Rapport 25.4-91-06/ C HD-28, Stevin-Laboratorium, Delft University of Technology, Netherlands, 1991.
22. Kurstjens P. B. J. Creep and damage research on timber joints. Part three. Rapport 25.4-90-12 C HD-26, Stevin- Laboratorium, Delft University of Technology, Netherlands.
23. Kurstjens P. B. J. Creep and damage research on timber joints. Part two. Rapport 25.4-89-15 C HD-24, Stevin- Laboratorium, Delft University of Technology, Netherlands.
24. Сборник научных трудов по материалам V Международной научно-практической конференции Безопасный и комфортный город г. Орел, июнь 2022 г. – 391 с.
25. Стандарт Ассоциации деревянного домостроения СтАДД-3.2–2011 «Деревянные конструкции. Соединения деревянных элементов с использованием зубчатых пластин. СПб., 2012. 59 с.
26. ЦНИИСК Кучеренко В. А. Рекомендации по проектированию и изготовлению деревянных конструкций с соединениями на пластинах с цилиндрическими нагелями (система КирПИ-ЦНИИСК). М., 1988.
27. ГОСТ Р 57158-2016 Конструкции деревянные. Методы испытаний соединений на гвоздях, винтах, дюбелях и болтах. Введ. в действие: 01.04.2017. М., 2017.

УДК 691:624.04

Анна Эдуардовна Кушнир,
студент
Анна Константиновна Гагарина,
студент
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный
университет)
E-mail: sleepme@mail.ru,
kushnir.ana@mail.ru,
gagarina.a.k@mail.ru

Anna Eduardovna Kushnir,
student
Anna Konstantinovna Gagarina,
student
(Saint Petersburg
State University of Architecture
and Civil Engineering)
E-mail: sleepme@mail.ru,
kushnir.ana@mail.ru,
gagarina.a.k@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЦИКЛИЧЕСКИХ НАГРУЖЕНИЙ LVL С ПРИМЕНЕНИЕМ КОГТЕВЫХ ШАЙБ

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF LVL CYCLIC LOADINGS USING CLAW WASHERS

Предметом написания статьи выступает анализ отечественных и зарубежных исследований на тему влияния вибрационных нагрузок на напряженно-деформируемое состояние нагельных соединений деревянных конструкций из LVL с применением когтевых шайб. Исследований деревянных конструкций из LVL и нормативных документов, регламентирующих расчет нагельных соединений в условиях действия вибраций очень мало. На основании проведенного анализа данных можно выделить необходимость проведения исследований влияния размеров штампов различных форм на прочность и коэффициент постели при смятии LVL при действии циклической нагрузки. Полученные результаты предполагается использовать для дальнейшего развития деревянных конструкций в строительстве зданий и сооружений.

Ключевые слова: LVL, испытание штампами, когтевая шайба, циклические нагрузки, виброползучесть.

The subject of this article is the analysis of domestic and foreign studies on the influence of vibration loads on the stress-strain state of the joints of LVL wooden structures with the use of claw washers. There are very few studies of LVL wooden structures and regulatory documents regulating the calculation of nail joints under vibration conditions. Based on the data analysis carried out, it is possible to highlight the need to conduct studies of the effect of the sizes of stamps of various shapes on the strength and coefficient of the bed when LVL is crumpled under the action of cyclic loading. The results obtained are supposed to be used for the further development of wooden structures in the construction of buildings and structures.

Keywords: LVL, stamp testing, claw washer, cyclic loading, vibration creep.

Введение

Актуальность темы исследования. В настоящее время, все больше возрастает спрос на использование когтевых шайб в конструкциях из древесины, в том числе и из *LVL*. Благодаря высоким прочностным характеристикам и способности значительно увеличить несущую способность узлов конструкции, такие соединения могут обогнать по востребованности на рынке уже хорошо изученные железобетонные и металлические конструкции. Несмотря на все преимущества соединений с применением когтевых шайб, они имеют особенность накапливать разрушения при действии вибрационных нагрузок. Этот аспект недостаточно хорошо исследован и требует дополнительных испытаний и доработок в дальнейшем. В нормативных источниках, как в отечественных, так и в зарубежных, информации о расчете таких соединений крайне мало, что затрудняет их использование в промышленных масштабах. Таким образом, развитие методик расчета нагельных соединений деревянных конструкций из бруса *LVL* с когтевыми шайбами при действии циклических нагрузок является актуальной задачей, требующей тщательного изучения.

Данные об исследовании виброползучести деревянных конструкций

Из-за распространения в современном строительстве деревянных конструкций, встал вопрос о более тщательном изучении их несущей способности и деформативности соединений. Оценке требуется подвергать влияние не только статических, но и динамических нагружений. Динамические нагружения подразумевают под собой быстрое изменение значения нагрузки во времени. Источником динамического воздействия может послужить ветровая нагрузка, технологическое, грузоподъемное и транспортное оборудование и т. д. В основном циклическим нагрузкам подвергаются конструкции покрытий промышленных зданий, их соединения при таких нагружениях могут достигать опасных пределов и разрушаться гораздо раньше, чем при действии только статических нагрузок. Для соединений деревянных конструкций используют в основном нагельные элементы, так как они равномерно распределяют воспринимаемые усилия и надежно фиксируют конструкцию. Тем не менее,

недостатком таких соединений является виброползучесть, которая возникает при совместном появлении статических и небольших динамических нагрузений. Среди отечественных ученых, занимающихся исследованиями в области виброползучести деревянных конструкций можно выделить: А. К. Малмейстера [1, 2], А. М. Локощенко [3], С. А. Шестерикова [4], А. П. Гусенкова [5, 6, 7], Г. И. Баренблатта [8, 9, 10], Ю. М. Иванова [11, 12, 13, 14], В. Г. Леннов [15], Б. В. Лабудин [16], Е. В. Попов [17], В. В. Пуртов [18] и др. Среди зарубежных исследователей большой вклад в изучение сделали: О. Граф [19], Baker L. S. и Carpenter [20], Barrett L. D. и Foschi R. O. [21], H. J. Blass, M. Schlager [22].

Проведенные испытания в данной области показали, что при воздействии циклических нагрузок значительное влияние на прочность материала имеют влажность и угол наклона волокон древесины. В ходе исследований был сделан вывод о том, что прочностные свойства древесины значительно понижаются в ходе циклического нагружения и сильно сокращается время до разрушения из-за свойства древесины накапливать повреждения.

Ссылаясь на современную нормативную документацию, можно описать методы циклических испытаний узлов по ГОСТ 57160-2016 [23]. Данный метод подразумевает разделение испытание на несколько циклов. Во время первого цикла прикладывается сжимающая нагрузка, пока деформация не составит 25 % от определенного значения текучести, которое может быть уточнено расчетом, опытным путем или с помощью ранее проведенных статических испытаний по ЕН 26891 [24]. Затем образец разгружается и прикладывается растягивающая нагрузка до получения нулевых деформаций. Далее прикладывается растягивающая нагрузка до получения деформаций, равными 25 % от определенного значения текучести. Следующим этапом образец снова разгружается и прикладывается сжимающая нагрузка до нулевых деформаций. Второй цикл заключается в аналогичных действиях, но уже с достижением деформаций 50 % от определенного значения текучести. Второй цикл повторяют трижды, но до получения деформаций, составляющих 75 % от значения текучести. Следующим этапом будет повторение уже проделанных циклов до достижения деформаций, равными значению текучести.

Далее еще раз проводятся серия из трех циклов со значениями в 2, 4, 6 раз больше определенного значения текучести до разрушения образца, либо до деформаций, равных 30 мм. Испытание повторяется, если значения деформации при текучести в два раза меньше определенного значения деформации текучести. В графическом виде методы циклических испытаний узлов по ГОСТ 57160-2016 [23] представлен на рис. 1.

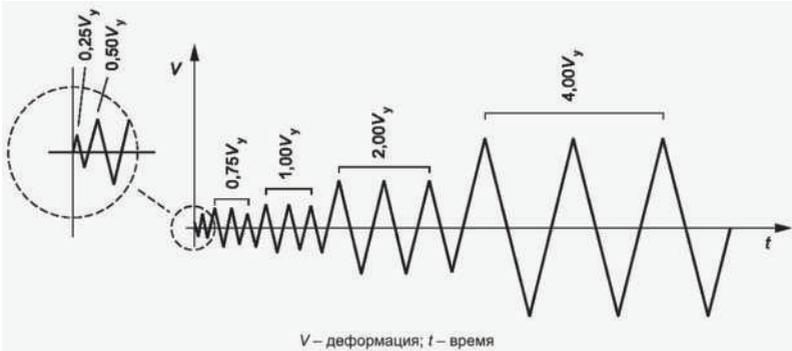


Рис. 1. Графическое изображение метода циклических испытаний узлов

Несмотря на количество проведенных исследований, в основном они рассматривают конструкции из цельной древесины. При этом исследований деревянных конструкций из *LVL* и нормативных документов, регламентирующих расчет нагельных соединений в условиях действия вибраций очень мало.

Данные об испытаниях треугольным и цилиндрическим штампами

Для расчета напряженно-деформируемого состояния нагельных соединений деревянных конструкций из *LVL* с применением когтевых шайб необходимо учитывать значение коэффициента постели *LVL* при передаче нагрузки треугольным когтем и цилиндрическим нагелем вдоль и поперек волокон. Исследования коэффициентов постели для древесины были проведены отечественными учеными Коченовым В. М. [25], Панферовым К. В [26], Наумовым А. К. [27], Дмитриевым П. А. [28], Стрижаковым Ю. Д. [29], Шешуковой Н. В. [30] и др. Исследователями получена зависимость

коэффициента постели от влажности древесины при разных диаметрах штампов. Найденные в ходе исследований коэффициенты постели для *LVL* при различных диаметрах цилиндрического штампа сильно разнятся, поэтому нуждаются в доработке и проведении дополнительных испытаний.

Данные об исследовании влияния размеров цилиндрического и треугольного штампов на прочность при смятии и на коэффициент постели *LVL* при действии кратковременной и длительной нагрузки были получены и описаны в диссертации Данилова Е. В. [31]. Эксперименты по определению коэффициента постели при смятии штампом проводятся путем вдавливания стержней различного размера в бруски из *LVL*.

На рис. 2 представлен образец *LVL*, который подвергался воздействию треугольного штампа при кратковременных нагрузках. На образце был выполнен пропил по центру, чтобы приблизить испытания к реальным условиям и учесть срезающие напряжения, создаваемые двумя боковыми гранями когтя шайбы. На рис. 3 продемонстрирована схема испытательной установки. Аналогично, в лабораторных условиях, проводились испытания на длительную нагрузку.



Рис. 2. Образец *LVL* с пропилом

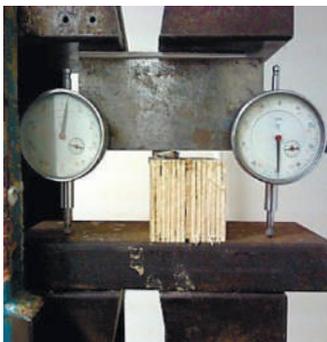


Рис. 3. Образец в испытательной установке

Для испытаний образцов цилиндрическим штампом под действием кратковременных нагрузках использовались нагели разных диаметров (12, 14 и 16 мм). Передача нагрузки на брус выполнялось при помощи металлической пластины с отверстием под нагель, располагаемый по краям образца. Это позволяло равномерно распределить нагрузку и предотвращало перекосы в соединении. На рис. 4 и 5 показаны испытания вдоль и поперек волокон. На рис. 6 можно наблюдать образец после проведения испытаний.

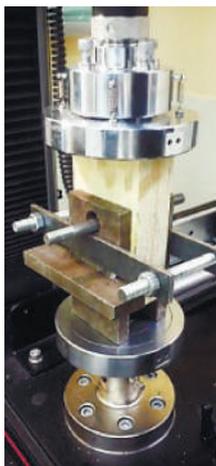


Рис. 4. Образец для смятия вдоль волокон, установленный в пресс

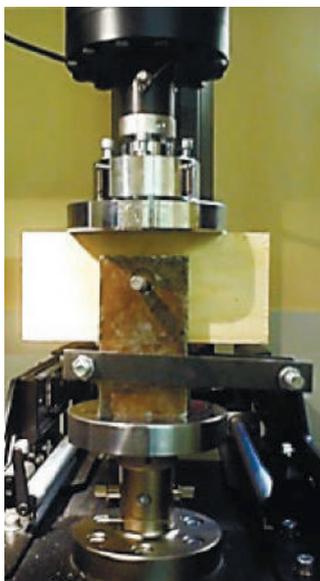


Рис. 5. Образец для смятия поперек волокон, установленный в пресс



Рис. 6. Образец после проведенных испытаний

В ходе исследований были получены уравнения регрессии, отражающие зависимость между пределом прочности LVL при сжатии и при смятии штампом, а также между величиной коэффициента постели и размером штампа для воздействия вдоль и поперек волокон.

Данных об аналогичных испытаниях при действии циклических нагрузок не было найдено, из чего следует обозначить необходимость в их проведении.

Выводы

На основании проведенного анализа данных можно выделить необходимость проведения исследований влияния размеров штампов различных форм на прочность и коэффициент постели при смятии LVL при действии циклической нагрузки.

Выполненный анализ состояния вопроса позволил сформулировать основные направления планируемых дальнейших исследований, включая программу испытаний.

Программа экспериментальных исследований включает: изучение напряженно-деформированного состояния нагельных соединений деревянных конструкций из LVL с применением когтевых шайб под действием циклической нагрузки, изучение влияния цилиндрических и треугольных штампов на напряженно-деформируемое состояние нагельных соединений под действием вибраций.

Литература

1. *Малмейстер А. К.* Виброползучесть бетона / Малмейстер А. К. – Рига : Изд. АН Латв. ССР, 1956. – 21 с.
2. *Малмейстер А. К.* Сопротивление жестких полимерных материалов / Малмейстер А. К., Тамуж В. П., Тетерс Г. А. – Рига : Зинатне, 1972. – 500 с.
3. *Локощенко А. М.* О виброползучести / Локощенко А. М., Шестериков С. А. // Инженерный журнал МТТ. – 1966. – № 3. – С. 141–143.
4. *Шестериков С. А.* Одноосная ползучесть при переменных напряжениях / Шестериков С. А. – Изв. АН СССР. Механика и машиностроение, 1961. – 148–149 с.
5. *Гусенков А. Л.* Сопротивление деформированию в связи с условиями малоциклового нагружения / Гусенков А. Л. – М. : Наука, -1969. – 50 с.
6. *Гусенков А. Л.* О свойствах кривых циклического деформирования в диапазоне мягкого и жесткого нагружений / Гусенков А. Л., Шнейдерович Р. М. // Изв. АН СССР.ОТН. Механика и машиностроение. – 1961. – № 2. – С. 150–152.

7. Гусенков А. П. Анализ некоторых подходов к описанию циклических диаграмм деформирования / Гусенков А. П., Москвитин Г. В. // Машиноведение. – 1973. – № 5. – С. 59–67.
8. Баренблатт Г. И. Об эффектах малых вибраций при деформировании полимеров / ПММ. – 1966. – вып. I. – С. 73–81.
9. Баренблатт Г. И. О виброползучести полимерных материалов / Баренблатт Г. И., Козырев Ю. И., Малинин Н. И., Павлов Д. Я., Шестериков С. А. // Доклады АН СССР. Механика. – 1966. – № 4. – С. 813–816.
10. Баренблатт Г. И. О влиянии вибрационного разогрева на распределение трещин в полимерах / Баренблатт Г. И., Ентов В. М., Салганик Р. Л. // Инженерный журнал мтг. – 1967. – № 6. – С. 47–58.
11. Иванов Ю. М. Работа древесины под действием повторной статической нагрузки / Иванов Ю. – М. : Исследования по деревянным конструкциям, 1950, с. 6–27.
12. Иванов Ю. М. О предельных состояниях деревянных элементов соединений и конструкций / Иванов Ю. М. – М. : Стройиздат, 1947. – 99 с.
13. Иванов Ю. М. Исследовательские работы по древесине и деревянным конструкциям в Англии / Иванов Ю. М. – М. : ЦНИИИТЭИ леспрома, 1966 г. – 34 с.
14. Иванов Ю. М. Исследование физических свойств древесины (эластичность, воздухопроницаемость, давление набухания) / Иванов Ю. М., Баженов В. А. – М. : Изд-во Академии наук СССР, 1959. – 75 с.
15. Леннов В. Г. Индустриальные деревянные фермы на когтевых шайбах: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / Горький, 1941. – 289 с.
16. Лабудин Б. В. Совершенствование клееных деревянных конструкций с пространственно-регулярной структурой: дис. ... д-тр. техн. наук: 05.23.01 / Лабудин Б. В. – Архангельск, 2007. – 267 с.
17. Попов Е. В. Напряженно деформированное состояние панелей на деревянном каркасе с различными вариантами крепления обшивки: в 4 т. / Попов Е. В., Столыпин Д. А., Лабудин Б. В., Мелехов В. И. // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2016 г. – № 5-2(25-2). – С. 133–139.
18. Пуртов В. В. Расчет в программе ANSYS деревянных конструкций с крепежными элементами повышенной несущей способности / Пуртов В. В., Павлик А. В. – Новосибирск : НГАСУ (Сибстрин), 2018. С. 72.
19. Graf O. Die daverfesti greit der verkstoffe und konstruktion selemente / Graf O. Die. – Berlin.: Verlag V. I. Springer, 1929. – 156 с.
20. Baker I. S. Deformation under combined static and vibrary stresses: vol. 236 / Baker I. S., Carpenter S. H. – Trans. Met. Sos., ASME. – 1966. – № 5. – p. 700 – 702.
21. Barrett I. O. Duration of load and probability of failure in wood. Part II. Constant, ramp, and cyclic loadings / Barrett I. O., Foschi R. O. – Can. J. of Civ. Eng. – 1978. – № 4. – p.515 – 532.

22. *Blass H. J.* Trial Calculations for Determination of the Load Carrying Capacity of Joints with Bulldog Connectors / Blass H.J., Schlager M. – CEN/TC 124/WG4 № 23. – 1993. – 6 p.
23. ГОСТ Р 57160-2016/EN 12512:2001+A1:2005 Конструкции деревянные. Методы циклических испытаний узлов с механическими.
24. ГОСТ Р 57161-2016/EN 26891:1991 – Соединения механические деревянных конструкций. Основные принципы определения прочностных и деформационных характеристик. – М. : Изд-во стандартов, 2016. – 17 с.
25. *Коченов В. М.* Несущая способность элементов и соединений деревянных конструкций / Коченов В. М. – М. : Стройиздат, 1953. – 319 с.
26. *Панферов К. В.* Декоративность конструкционных пластмасс при переменных режимах нагружения // Расчет конструкций с применением пластмасс. – М., 1974. – С. 4–14.
27. *Наумов А. К.* Исследование соединений легких деревянных несущих конструкций на металлических зубчатых пластинных: дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01 / Наумов А. К. – М., 1978. – С. 143.
28. *Дмитриев П. А.* Исследование длительной несущей способности соединений деревянных элементов на стальных цилиндрических нагелях / Изв. вузов. Строительство и архитектура. – 1973. – № 5. – С. 28–35.
29. *Стрижаков Ю. Д.* Исследование работы и расчет соединений деревянных элементов под углом на нагелях из стеклопластика АГ-С при действии кратковременных и длительных нагрузок: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.23.01 / Стрижаков Ю. Д. – Новосибирск, 1971. – 170 с.
30. *Шешукова Н. В.* Несущая способность и деформативность нагельных соединений деревянных конструкций при циклическом нагружении: дис. канд. техн. наук: 05.23.01 / Шешукова Наталья Владимировна. – СПб: СПбГАСУ, 2001. – 152 с.
31. *Данилов Е. В.* Развитие методов расчета соединений деревянных конструкций из однонаправленного клееного бруса с когтевыми шайбами: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / Данилов Егор Владимирович. – СПб. : СПбГАСУ, 2019. – 63 с.
32. *Шапошников В. Н.* Особенности работы многонагельных соединений элементов деревянных конструкций и теория их расчета при действии кратковременных, длительных и повторных нагрузках: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / Шапошников Владимир Николаевич. – Новосибирск: НИСИ, 1983 г. – 258 с.

УДК 69.059.3

Тимофей Владимирович Мосалев,
студент

Кирилл Максимович Добрянский,
студент

(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный
университет)

E-mail: mosalev.timofei@yandex.ru,
dobryanskiy.kirill.m@gmail.com

Timofei Vladimirovich Mosalev,
student

Kirill Maksimovich Dobryanskiy,
student

(Saint Petersburg
State University of Architecture
and Civil Engineering)

E-mail: mosalev.timofei@yandex.ru,
dobryanskiy.kirill.m@gmail.com

К РАСЧЕТУ ОДНОПРОЛЕТНЫХ БАЛОК ИЗ LVL И КЛЕЕНОЙ ДРЕВЕСИНЫ С УСЛОВНО ЖЕСТКИМИ ОПОРАМИ

TO THE CALCULATION OF SINGLE-SPAN BEAMS MADE OF LVL AND GLUED WOOD WITH CONDITIONALLY RIGID SUPPORTS

В статье приводятся промежуточные результаты конечно-элементного моделирования и оценки напряженно деформированного состояния (НДС) однопролетной жестко закрепленной балки. В силу упругой податливости соединения деревянной конструкции из LVL опорный узел не является абсолютно жестким. Численное моделирование конструкции позволяет оценить степень влияния жесткости опорного узла. Перед проведением натурных испытаний необходимо было дать предварительную оценку напряженно деформированного состояния балки. Для проведения эксперимента было выполнено численное моделирование испытываемого образца и технологической оснастки в программе SCAD Office.

Ключевые слова: жесткость узла, упругая податливость узла, клееная балка, условно жесткие опоры.

The article presents the intermediate results of finite element modeling and evaluation of the stress-strain state (VAT) of a single-span rigidly fixed beam. Due to the elastic pliability of the connection of the LVL wooden structure, the support unit is not absolutely rigid. Numerical modeling of the structure allows us to assess the degree of influence of the stiffness of the support node. Before conducting full-scale tests, it was necessary to give a preliminary assessment of the stress-strain state of the beam. To conduct the experiment, numerical modeling of the test sample and technological equipment was performed in the SCAD Office program.

Keywords: the rigidity of the node, elastic pliability of the node, glued beam, conditionally rigid supports.

Введение

Применение при проектировании методов учета жесткости опорных узлов позволяет более равномерно распределить усилия по всей длине балки, а также уменьшить напряжения в середине пролета. При этом появляется возможность использования меньших сечений, что снижает материалоемкость конструкции. Но в деревянном строительстве применение жестких узлов ограничено, по причине высокой трудоемкости расчета напряженно деформированного состояния конструкции.

Как известно в узловых соединениях дерево имеет упруго – податливые свойства, которые влияют на жесткость узла крепления. Поэтому благодаря сравнению теоретических и эмпирических исследований возможно вывести зависимость между упругой податливостью узлов деревянных конструкций и их деформациями, тем самым упростив их инженерный расчет и обеспечив более широкое применение жестких узлов в строительной сфере.

За опытные образцы были взяты два бруса длиной 6 метров из клееного шпона (LVL) сечением 250×90 , 280×90 мм и одна клееная деревянная балка сечением 300×90 мм длиной 6 метров. За материал конструкции принята сосна второго сорта (см. рис. 1).

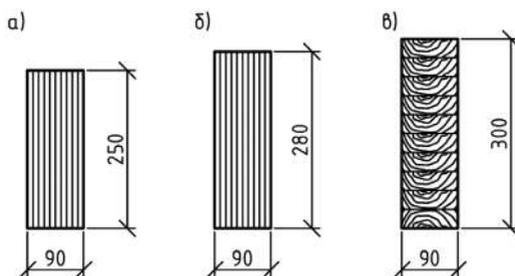


Рис. 1. Сечение испытуемых образцов: *a* и *б* – LVL-брус; *в* – клееная балка

Методы

Численное моделирование в программе SCAD Office

Перед проведением натуральных испытаний необходимо было дать предварительную оценку напряженно деформированного состояния балки. Для этого было выполнено численное моделирова-

ние испытуемого образца и технологической оснастки в программе *SCAD Office*.

Поверхности тел созданы из пластинчатых и стержневых элементов с учетом толщин в объемной модели в программе AutoCAD (рис. 2).

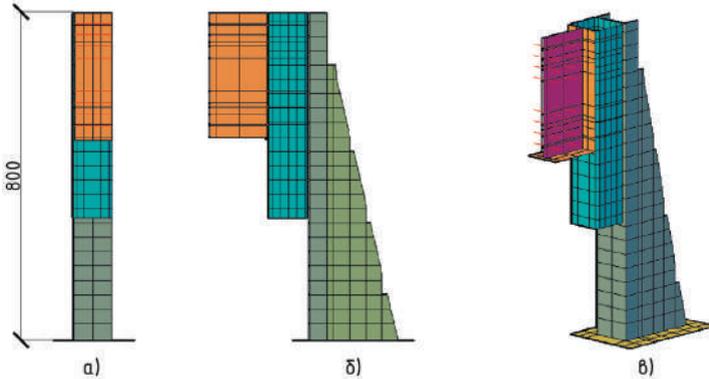


Рис. 2. Модель стойки в программе AutoCAD:
a – вид спереди; *б* – вид сбоку; *в* – 3D-вид

Древесина является анизотропным материалом, поэтому при моделировании балки пластинам и стержням назначаются различные жесткостные характеристики. Также для более точного моделирования балка разбита на пластины в продольном направлении и соединительными стержнями в поперечном направлении (рис. 3).

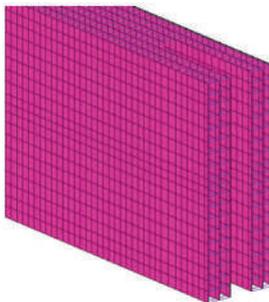


Рис. 3. Модель балки

Расчетная схема балки показана на рис. 4.



Рис. 4. Расчетная схема балки

Полученные графические результаты деформаций балок при распределенной нагрузке 1 т/м (рис. 5–7).



Рис. 5. Деформации вдоль оси z балки 250×90



Рис. 6. Деформации вдоль оси z балки 280×90



Рис. 7. Деформации вдоль оси z балки 300×90

Максимальный прогиб балки по оси z равен 62 мм у балки сечением 250×90 мм, что соответствует правилам строительной механики.

Для точного анализа численной модели в будущем необходимо сравнить жесткостные характеристики материалов, используемых в расчетной схеме модели и реальной конструкции. Тогда станет возможным прогнозирование напряжений при натурных испытаниях.

Численное моделирование испытания в ПК Ansys 2022 R2 Создание модели

Создание испытательной системы выполнено в ПК AutoCAD при помощи инструментов объемного моделирования (рис. 8). Все

элементы выполнены в масштабе 1:1 в отношении системы для натурных испытаний. Экспорт модели производится в формате «.sat» для последующего импорта в расчетный комплекс. Модель построена так, что ось X направлена вдоль балки, ось Y направлена по ширине балки, а ось Z направлена вверх.

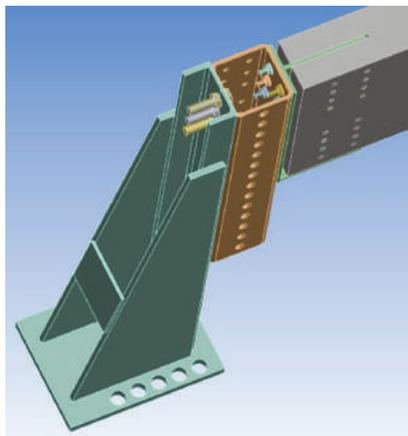


Рис. 8. 3D-схема опорного узла

Модели материалов

Для построения расчетной системы применялось два варианта модели материала: изотропный – сталь и ортотропный – древесина. Задавались следующие основные характеристики стали: плотность, модуль упругости (Юнга) и коэффициент Пуассона. Аналогично для древесины: плотность, модуль упругости (Юнга) в направлениях X , Y и Z , коэффициент Пуассона в плоскостях XY , YZ и XZ и модуль сдвига в плоскостях XY , YZ и ZX .

Создание расчетной модели

Элементам опорных стоек, опорных пластин, а также нагелей присвоена модель материала сталь, элементу балки присвоена модель материала древесина.

Важным аспектом выполнения корректного расчета является правильное моделирование контактов между различными поверхностями. В данном расчете использовался параметр «трение»

(*frictional*) моделирующий работу сил трения при непосредственном контакте различных поверхностей. Коэффициент трения стали о сталь принят равным 0,19. Коэффициент трения стали и дресины принят равным 0,55.

Нагружение

Нагрузка принята как равномерно распределенная по длине и ширине балки. Приложена к верхней грани балки по направлению минус Z . Так как рассматриваются 3 вида балок, отличающихся габаритами сечения, для каждого вида балок определена оптимальная нагрузка.

Для балки:

- 300×90 мм – $q = 120,32$ кН/(м²);
- 280×90 мм – $q = 106,29$ кН/(м²);
- 250×90 мм – $q = 86,47$ кН/(м²).

Анализ результатов

Наибольшие перемещения ожидаемо возникли в балке с габаритами сечения 300×90 мм. В середине пролета перемещения составили 41,3 мм, наибольшая деформация нагеля составила 3,5 мм (рис. 9, 10).



Заключение

На основе расчета представленных численных моделей можно сделать вывод о необходимости проведения натурных испытаний для подтверждения полученных результатов напряженно деформированного состояния балки и узловых элементов.

Литература

1. Исследование работы металлических и деревянных конструкций и оценка срока их службы с учетом условий эксплуатации: монография / А. Г. Черных, Е. И. Рыбнов, Н. А. Сенькин [и др.]; Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. – Санкт-Петербург : СПбГАСУ, 2022. – 356 с.
2. *Васильков Б. С., Володин Н. М.* Расчет сборных конструкций зданий с учетом податливости соединений. – М. : Стройиздат, 1985. – 144 с.

УДК 691.116

Мария Николаевна Низамова,
студент
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный
университет)
E-mail: marisheveleva@gmail.com

Mariya Nikolaevna Nizamova,
student
(Saint Peterburg
State University of Architecture
and Civil Engineering)
E-mail: marisheveleva@gmail.com

ВЛИЯНИЕ ЦИКЛИЧЕСКОГО УВЛАЖНЕНИЯ НА ПРОЧНОСТЬ БРУСА МНОГОСЛОЙНОГО КЛЕЕНОГО ИЗ ШПОНА

THE EFFECT OF CYCLIC HUMIDIFICATION ON THE STRENGTH OF LAMINATED LAMINATED VENEER LUMBER

В работе описаны результаты обследования элементов бруса многослойного клееного из шпона, длительное время хранившегося в неудовлетворительных условиях. Проведено несколько циклов увлажнения. Изучение свойств бруса многослойного клееного из шпона на предмет влияния циклического увлажнения на его целостность и изменения прочностных свойств показало уменьшение условного предела прочности при сжатии поперек волокон, при растрескивании наружных слоев шпона. При испытании образцов разрушение проходило по трещинам, открывшимся вследствие циклического изменения влажности. Показано изменение его прочностных свойств при циклическом увлажнении. Дана динамика роста трещин вследствие влияния влажностного фактора.

Ключевые слова: многослойный клееный брус из шпона, деревянные конструкции, прочностные свойства, остаточный ресурс, циклические увлажнения, трещины, воскодержащие покрытия.

The paper describes the results of the examination of the elements of laminated laminated veneer lumber, stored for a long time in unsatisfactory conditions. Several cycles of humidification have been carried out. The study of the properties of laminated laminated veneer lumber for the effect of cyclic wetting on its integrity and changes in strength properties showed a decrease in the conditional compressive strength across the fibers, when cracking the outer layers of veneer. When testing the samples, the destruction took place through cracks that opened due to cyclic changes in humidity. The change of its strength properties during cyclic humidification is shown. The dynamics of crack growth due to the influence of the humidity factor is given.

Keywords: laminated laminated veneer lumber, wooden structures, strength properties, residual life, cyclic dampening, cracks, wax-containing coatings.

Общие требования для конструкций из древесины необходимо выполнять и для несущих элементов из композиционных материалов на ее основе. Для обеспечения надежной работы многослойного клееного бруса из шпона его влажность должна составлять 8...12 % [1]. Однако, в процессе эксплуатации, показатели влажности превышают допустимые, что ведет к снижению прочности материала [2, 3, 4]. Кроме этого, ЛВЛ брус является относительно новым строительным материалом и незначительный опыт применения затрудняет детально охарактеризовать поведение материала при длительной эксплуатации [5].

Автор провел ряд испытаний с элементами из *LVL* бруса длительное время (более 10 лет), находившихся в непроветриваемом помещении при повышенной влажности: повышенная влажность и непроветриваемое помещение. На момент обследования на элементах появились трещины в наружных слоях шпона (см. рис. 1).



Рис. 1. Трещины в наружных слоях шпона LVL-бруса

Ширины трещин составляли 2 мм и располагались они на сучках и в присучковой зоне, что объясняется повышенной плотностью

сучка и изменением направления годичных слоев древесины, способствующим растрескиванию. Размеры трещин определялись с помощью программного обеспечения DinoCature 2.

Несмотря на то, что технологией производства бруса многослойного клееного из шпона предусматривается формирование лакокрасочного покрытия, содержащего воск, как способ повысить стойкость к негативному влиянию влажности [6], на обследуемых образцах данное покрытие отсутствует. На сегодняшний день только 60 % от объема выпускающей продукции подвергается обработке защитным средством.

Учитывая, что изменение влажности является весомым фактором, дестабилизирующим прочностные свойства для древесины и древесных материалов [7, 8], было принято решение изучить влияние циклического увлажнения на исследуемый материал.

Для этого были изготовлены образцы размером 135×31×31 мм, на внешних слоях которых отсутствовали сучки. Образцы выдерживали в воде и погружали таким образом, чтобы они были покрыты водой на 2–3 см. Вымачивание образцов проводилось три цикла: в течение 48 ч, 96 ч и 144 ч в воде с температурой 20±2 °С. Данную продолжительность вымачивания образцов приняли в соответствии с ГОСТ 33121-2014.

По истечении этого времени образцы извлекали из воды, протирали чистой сухой тканью, одну половину подвергали обмеру и механическим испытаниям на сжатие поперек волокнам, а другую – высушивали при нормальном температурно-влажностном режиме (кондиционировали) до достижения начальной влажности (рис. 2), а затем испытывали на сжатие поперек волокон. Определение показателей физико-механических свойств проводилось на универсальной электромеханической машине Instron 5969. Скорость перемещения нагружающей головки системы при испытаниях была принята 4 мм/мин.

По истечении этого времени образцы извлекали из воды, протирали чистой сухой тканью, одну половину образцов подвергали обмеру и механическим испытаниям на сжатие поперек волокнам, а другую – высушивали при нормальном температурно-влажностном режиме, кондиционировали до достижения начальной влажности, а затем испытывали на сжатие поперек волокон. Определение показателей физико-механических свойств проводилось на универ-

сальной электромеханической машине Instron 5969. Скорость перемещения нагружающей головки системы при испытаниях была принята 4 мм/мин.



Рис. 2. Образцы

Как показали испытания уже после первого цикла размеры микротрещин в поверхностных слоях шпона составили: длина до 40 мм, ширина раскрытия до 0,838 мм (рис. 3).



Рис. 3. Трещины после 1-го цикла замачивания

После 2-го цикла увлажнения трещины шли по всей длине образца, максимальная ширина раскрытия составила 1,812 мм (см. рис. 4). После третьего цикла увлажнения ширина трещин превышала 2 мм и наблюдалось отслоение древесины шпона по границе годичного кольца.



Рис. 4. Трещины после 2-го цикла замачивания

Причиной образования трещин является посечка – микротрещины, образующиеся в процессе лущения шпона. Посечка обра-

зуются по причине растягивания слоя древесины поперек волокон (здесь прочность древесины минимальна) при лущении [5, 9, 10].

Прочность на сжатие определяли в соответствии с СП64.13330-2017. По результатам определения условного предела прочности на сжатие поперек волокон резкого снижения не наблюдалось, не смотря на наличие трещин, по которым происходило разрушение целостности материала. Результаты представлены в таблице.

Результаты испытаний на сжатие поперек волокон образцов LVL-бруса

№ цикла увлажнения	Вид образцов	Прочность на сжатие поперек волокон, МПа
	Контрольные образцы	6,64
1	Влажные образцы	2,17
	Образцы после кондиционирования	4,68
2	Влажные образцы	1,89
	Образцы после кондиционирования	4,19
3	Влажные образцы	1,78
	Образцы после кондиционирования	3,85

При испытании образцов на сжатие поперек волокон определена его прочность, которая является функцией многих факторов, таких как геометрические параметры соединения, свойства клея и шпона, температура, влажность и остаточные напряжения.

При испытании образцов разрушение проходило по трещинам, открывшимся вследствие циклического изменения влажности, а также наблюдалось расслоение по клеевому шву (рис. 5).

Изучение свойств бруса многослойного клееного из шпона на предмет влияния циклического увлажнения на его целостность и изменения прочностных свойств показало уменьшение условного предела прочности при сжатии поперек волокон, при растрескивании наружных слоев шпона толщиной 3,2 мм каждый. Возможно, в расчетах элементов из исследуемого материала не следует учитывать

описанный дефект, учитывая значительное количество связующего в *LVL* брус. К негативным особенностям следует отнести факт разрушения образца по клеевому соединению (рис. 5). Вероятнее всего данный дефект стал возможен из-за наличия засмолков, присутствующих в древесине хвойных пород, из которых производят изучаемый вид строительного материала. Отсутствие на поверхности образцов обработки воскодержающих составов способствовало процессу образования трещин.



Рис. 5. Разрушение образцов

Литература

1. Оценка работоспособности клееных несущих конструкций каплевидного купола атриума многофункционального комплекса, меры по повышению эксплуатационной надежности / Т. Н. Казакевич, С. И. Миронова, П. С. Коваль, А. О. Васильев // *Инновации в деревянном строительстве* : Материалы 11-й Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 22–23 апреля 2021 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2021. – С. 112–120.

2. *Черных А. Г.* Определение остаточного ресурса деревянных конструкций / А. Г. Черных, Д. И. Корольков // *Устойчивое развитие региона: архитектура, строительство и транспорт* : Материалы IX-ой Международной научно-практической конференции, посвященной памяти академика РААСН Чернышова Е. М., Тамбов, 21–22 сентября 2022 года. – Тамбов : Издательство ИП Чеснокова А.В., 2022. – С. 317–321.

3. Ломакин А. Д. Особенности защиты несущих клееных деревянных конструкций / А. Д. Ломакин // Вестник НИЦ Строительство. – 2014. – № 11. – С. 30–39.
4. Кудрявцев И. А. Циклические изменения влажности древесины и их влияние на длительную прочность материала / И. А. Кудрявцев // Тенденции развития науки и образования. – 2022. – № 86–2. – С. 77–79.
5. Миронова С. И. Скрытые особенности нового строительного материала / С. И. Миронова, Д. В. Нижегородцев // Архитектура – строительство – транспорт: Материалы 74-й научной конференции профессорско-преподавательского состава и аспирантов университета, в 2-х частях, Санкт-Петербург, 03–05 октября 2018 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2018. – С. 23–29.
6. Талион Трейдинг. Торговое представительство [Электронный ресурс]. URL: <http://талион-трейдинг.рф/> (дата обращения: 02. 03.2023).
7. Оценка остаточного ресурса деревянных конструкций по величине физического износа / А. Г. Черных, Д. И. Корольков, Е. В. Данилов [и др.] // Жилищное строительство. – 2022. – № 4. – С. 66–72.
8. О работе составных двутавровых балок со стенкой из профилированного стального листа и поясами из однонаправленного клееного шпона / П. С. Коваль, А. Г. Черных, Е. В. Данилов [и др.] // Вестник гражданских инженеров. – 2022. – № 6(95). – С. 5–9.
9. Серов Е. Н. Усиление клееных деревянных конструкций / Е. Н. Серов, С. И. Миронова // Вестник гражданских инженеров. – 2018. – № 5(70). – С. 68–74.
10. Обзор исследований, нормирования и применения LVL бруса в отечественной и зарубежной строительной практике / А. Г. Черных, Е. В. Данилов, П. С. Коваль, Ш. М. Мамедов // Вестник гражданских инженеров. – 2020. – № 1(78). – С. 100–106. – DOI 10.23968/1999-5571-2020-17-1-100-106. – EDN XKBSGL.
11. G. Pot, L. Denaud, R. Collet, S. Girardon, F. Cottin. Influence of veneer lathe checks on the mechanical properties of LVL // Conference: 22th International Wood Machining Seminar, At Quebec City, Canada, 2015.
12. Patubicki B., Marchal R., Butaud J. C., Denaud L., L. Bl'eron, Collet R., Kowaluk G. A method of lathe checks measurement; SMOF device and its software // European Journal of Wood and Wood Products – Vol. 68, № 2, p. 151–159 – 2010.

УДК 691

Елизавета Владимировна Котова,
студент
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный
университет)
E-mail: elizaveta-kotova_2000@mail.ru

Elisaveta Vladimirovna Kotova,
student
(Saint Petersburg
State University of Architecture
and Civil Engineering)
E-mail: elizaveta-kotova_2000@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ДЕРЕВЯННОЙ КОНСТРУКЦИИ ИЗ LVL

STUDY OF THE WORK OF A WOODEN STRUCTURE FROM LVL

Целью данной работы является разработка методики испытаний материала из LVL с проведением испытаний на длительную прочность и установление сроков службы деревянного элемента. В отличие от нагрузок, которые приведены в стандартах и нормах, несущая способность деревянных элементов, находящиеся под действием длительных нагрузок, значительно ниже. Поэтому основная задача исследования заключается в необходимости уточнения методов нагружения длительной нагрузкой на деревянное строительное изделие и прогнозирования долговечности древесины. Результаты, полученные в ходе испытаний, предполагается использовать для проектирования деревянных конструкций из LVL.

Ключевые слова: LVL, длительная нагрузка, долговечность древесины, ползучесть, деформация.

The purpose of this work is to develop a methodology for testing LVL material with long-term strength tests and establishing the service life of a wooden element. In contrast to the loads that are given in the standards and norms, the bearing capacity of wooden elements that are under the influence of prolonged loads is significantly lower. Therefore, the main task of the study is the need to clarify the methods of loading with a long load on a wooden construction product and forecasting the durability of wood. The results obtained during the tests are supposed to be used for the design of LVL wooden structures.

Keywords: LVL, long-term load, durability of wood, creep, deformation.

Введение

В настоящее время древесина отмечается довольно широким спросом в использовании разных строительных конструкций (арок, ферм, рам и т. д.), так как этот материал один из первых, который начал использовать человек в своей жизни. Древесина имеет боль-

шой интерес не только в нашей стране, но и за рубежом. На рынке появились материалы, которые отмечаются высокой прочностной характеристикой по сравнению с другими материалами, и возросла возможность применения их в строительной сфере. Одним из таких материалов является брус *LVL*. Благодаря, таким достоинством, как высокая прочность, использование данного материала в регионах с повышенной влажностью, строение из бруса *LVL* защищают от шума и т.д. такие строительные материалы могут обогнать не только железобетон, но и металлические конструкции. Производство материала энергоемко, требует установки дорогостоящего оборудования, что сказывается на цене изделий. Но использование бруса *LVL* в конечном счете экономит деньги. При монтаже каркасных конструкций из него не требуется специального оборудования, возводятся они быстро, а служат долго. Это снижает затраты на ремонт.

Несмотря на все положительные качества бруса *LVL*, очень мало было изучено поведение данного материала при исследовании на длительную прочность и долговечность. В российских и также зарубежных источниках крайне мало сказано и изучено информации о расчетах таких материалов, что может в значительной степени затруднить использование подобного строительного изделия в промышленности, и в строительстве в целом.

Таким образом, изучение темы исследования деревянного материала *LVL* под действием длительной нагрузки является актуальной темой для изучения.

Методы исследования

Для анализа предстоящих исследований, был произведен обзор уже существующих исследований бруса *LVL* под действием длительной нагрузки. Исследованию длительной прочности деревянных элементов посвящен ряд работ российских ученых Ю. М. Иванова [1], Б. П. Уголева [2], Ю. Ю. Славика [3], Л. М. Перельгина [4], Е. Л. Леонтьева [5] и другими. Подобной проблематики были посвящены исследования отечественных и зарубежных ученых В. М. Хрулева [6], Д. П. Белянкина [7], Н. Я. Леонтьева [8], С. Н. Журкова [9], Madison [10] и других.

Исследования В. М. Хрулева [6] были направлены на разработку методов повышения долговечности и контроля качества клееных

соединений древесины, а также в развитии некоторых теорий ускоренных испытаний. В своем исследовании он описывает разрушение как процесс термической деструкции, то есть понятия «долговечность» и длительная стойкость имеют схожее значение, так как внутренние напряжения, возникающих в ненагруженных клеевых соединениях древесины при влажностных и температурных деформациях можно считать дополнительной нагрузкой, которая и активирует термодеструкцию. При изучении долговечности деревянных клеевых соединений особое значение имеет определение прочности. Также Хрулев отметил, что предел прочности – это величина условная, впоследствии неравномерного распределения напряжений в существующих образцах. В ту же очередь, неравномерное распределение напряжений зависит от физических характеристик древесины и клея при действии на них длительного и температурно-влажностного воздействий.

Исходя из испытаний на ускоренное тепловое старение, было получено, что такие характеристики, как прочность, продолжительность и температура связаны между собой, о чем говорит график изображенный на рис. 1.

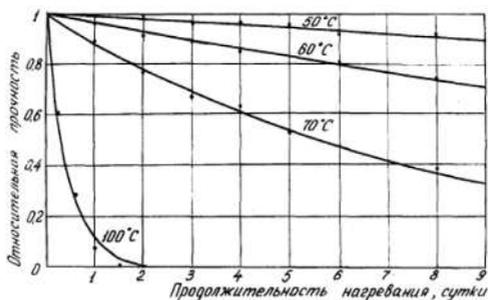


Рис. 1. Изменение прочности клеевых соединений при термообработке

Исследования С. Н. Журкова [10] концепция, которого заключалась в температурно-временной зависимости длительной прочности, в сущности позволила связать длительную прочность твердого тела с характеристиками его молекулярного строения. Согласно

данной теории, время до разрушения t (долговечность материала) выражается уравнением [1]:

$$t = \tau_0 \cdot \exp\left(v_0 - \frac{\gamma \cdot \sigma}{R \cdot T}\right), \quad (1)$$

где t – время до разрушения, с; σ – напряжение, МПа; τ_0 – период тепловых колебаний атомов 10^{13} , с; v_0 – начальная энергия активации процесса разрушения, равная потенциальному барьеру разрыва химических связей твердых тел, кДж/моль; R – газовая постоянная (8,314 Дж/моль·К); T – температура, К; γ – структурно-чувствительный коэффициент, кДж/(моль×МПа).

Таким образом, из исследования данного учебного можно утверждать, что интенсивность процесса разрушения зависит от нагрузки и температуры. То есть разрушение – кинетический процесс постепенного накопления повреждений.

Ученым Ю. М. Ивановым [1] был проведен анализ и обобщение экспериментального материала испытаний древесины под длительной нагрузкой и установлена закономерность описания длительной прочности древесины. Этот анализ принят за основу в нормативных документах и изображен на рис. 2.

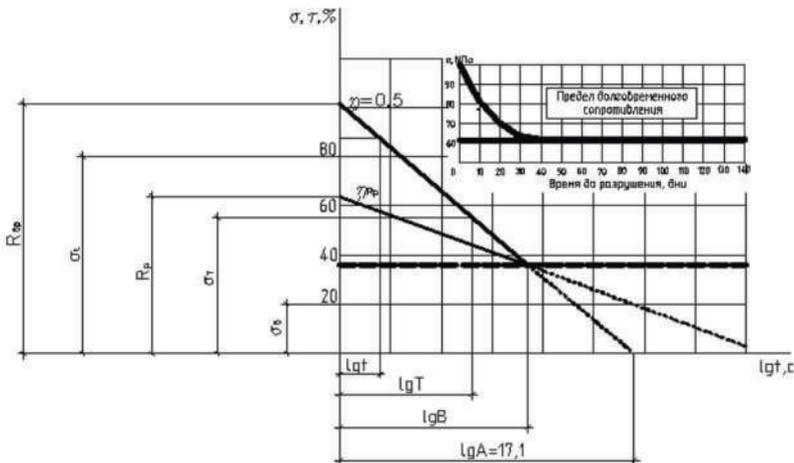


Рис. 2. Зависимость времени до разрушения от напряжения

Как свидетельствует сам Ю. М. Иванов, в результате постепенного разрыва химических связей в твердом теле происходит процесс накопления суб-микрповреждений, который занимает большую часть времени до момента разрушения. Ускоренное приближение к последнему начинается, когда субмикротрещины, рассеянные в теле и стабильны движущиеся, достигнут некоторой предельной концентрации и начнут сливаться. Эта меньшая часть времени соответствует процессу развития трещин, к которому могут применяться методы механики разрушения.

Относительное снижение прочности древесины под нагрузкой, таким образом, детерминировано физическим процессом разрыва химических связей (в данном случае высоко ориентированного полимерного компонента древесины – природной целлюлозы), в отличие от абсолютных значений прочности древесины, которые являются случайными величинами.

В своем исследовании Ф. П. Безлянкин выдвинул заключение, что на прочность древесины влияют скорость приложения нагрузки и продолжительность ее действия. Он взял несколько одинаковых деревянных образцов и загрузили на изгиб разной по значению постоянной нагрузкой и выяснил, что разрушение их произойдет через разные промежутки, то есть чем нагрузка будет больше, тем быстрее и разрушится образец. Однако не все образцы могут разрушиться. Такой результат испытаний был представлен в графической форме на рис. 3.

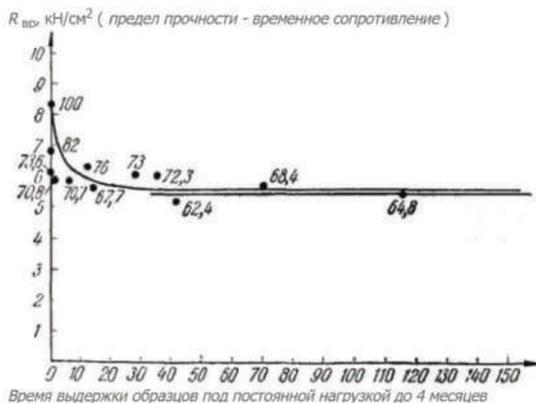


Рис. 3. Кривая длительной прочности древесины на изгиб

Данный график показывает, что предел прочности с увеличением длительности приложения нагрузок может и падает, но стремится к некоторому постоянному значению. Эта кривая была получена Ф. П. Безлянкиным и называется кривой длительного сопротивления древесины, ордината – предел длительного сопротивления, которая характеризует то предельное состояние напряжения, под действием чего образец не сможет разрушиться, как бы долго не действовала на него нагрузка.

В своей книге Г. Г. Карлсен, В. В. Большаков, М. Е. Каган, Г. В. Свенцицкий рассматривали подобное состояние древесины, что Ф. П. Безлянкиным, но был сделан акцент на то, что две области кривой (ниже линии кривой длительной прочности и выше нее) также различаются по характеру зависимости деформации от времени: затухающая и незатухающая ползучесть (рис. 4).

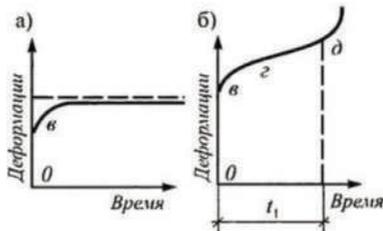


Рис. 4. Кривые ползучести древесины:
а – затухающая; б – незатухающая

Из этого можно сделать вывод, что древесина обладает свойством ползучести, то есть ростом деформаций в течение некоторого времени после приложения нагрузки на образец.

По результатам существующих достижений в области длительной прочности материалов на основе древесины возможно сформулировать план проведения исследований, который включает:

1. Обзор и анализ отечественных и зарубежных исследований и нормативных технических документов, затрагивающих методы и методики определения сроков службы конструкций из древесины.
2. Разработка Программы экспериментальных исследований с целью определения длительной прочности и жесткости бруса клееного многослойного из шпона *LVL*.

3. Проведение экспериментальных исследований с целью определения долговечности и длительной прочности бруса клееного многослойного из шпона *LVL*.

4. Анализ и обработка экспериментальных данных. Определение расчетных значений длительной прочности и сроков службы *LVL* в зависимости от направления приложения силы к волокнам и напряженного состояния.

Вывод

Таким образом, на основании приведенного анализа источников, определена необходимость в дополнительном исследовании длительной прочности материала *LVL* с использованием ускоренных методов испытаний. По результатам существующих достижений в области длительной прочности материалов на основе древесины возможно сформулировать план проведения испытаний, который включает изучение прочности и ползучести материала *LVL* при различных напряженных состояниях и углах приложения силы к волокнам.

Литература

1. *Иванов Ю. М.* Длительная прочность древесины / Иванов Ю. М.; Известия 169 вузов. Лесной журнал, 1972, № 4, С. 76–82.
2. *Уголев Б. Н.* Древесиноведение и лесное товароведение: учебник для студ. сред. проф. образования/Б.Н. Уголев. – 4 изд., стер. – М. : Издательский центр «Академия», 2011. – 272 с.
3. *Славик Ю. Ю.* Использование зубчатых клеевых соединений для склеивания древесины: (Обзор) / Ю. Ю. Славик. – Москва : ВНИИПИЭИлеспром, 1976. – 50 с.
4. *Перельгин Л. М.* Строение древесины М. : АН СССР, 1954 г.
5. *Леонтьев Н. Я.* Техника испытания древесины. – М. : Лесн. пром-сть, 1970. 469 с.
6. *Хрулев В. М.* Долговечность и контроль качества клеевых соединений древесины в строительных изделиях и конструкциях: Автореферат дисс. на соискание учен. степени д-ра техн. наук / Новосибир. инж.-строит. ин-т им. В. В. Куйбышева. 1968. 29 с.
7. *Белянкин Ф. П.* Длительное сопротивление дерева. 1934 ОНТИ. М.-Л. : Госстройиздат, – 1934. – 39 с. пер. с укр. В. Л. Сиваш.
8. *Леонтьев Н. Я.* Техника испытания древесины. – М. : Лесн. пром-сть, 1970. 469 с.
9. *Журков С. Н., Нарзуллаев Б. Н.* Временная зависимость прочности твердых тел. // ЖТФ. 1953. Т.23. Вып. 10. С. 1677–1680.
10. *Madison 5, Wisconsin.* Relation of strength of wood to duration of load CEN/TC 124/WG4 N23, 1993. 6 p.

УДК 624.04

Павел Сергеевич Коваль,

канд. техн. наук, доцент

Юлия Валерьевна Трунина,

студент

(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный
университет)

E-mail: pkoval@lan.spbgasu.ru,

yuvtrunina@yandex.ru

Pavel Sergeevich Koval,

PhD in Sci. Tech., Associate Professor

Yuliya Valeryevna Trunina,

student

(Saint Petersburg

State University of Architecture
and Civil Engineering)

E-mail: pkoval@lan.spbgasu.ru,

yuvtrunina@yandex.ru

О ВЛИЯНИИ ДЕФОРМАЦИЙ СДВИГА НА ПРОГИБ БАЛОК ИЗ ДРЕВЕСИНЫ И МАТЕРИАЛОВ НА ЕЕ ОСНОВЕ

ON THE EFFECT OF SHEARING DEFORMATIONS ON THE DEFLECTION OF BEAMS MADE OF TIMBER AND MATERIALS BASED ON IT

Расчет деревянных конструкций по предельным состояниям второй группы производят с учетом сдвига. Пренебрежение влиянием поперечной силы на напряженно-деформированное состояние элемента преуменьшает действительное значение прогибов. Приняв во внимание уже разработанные концепции расчета, новые исследования и разнообразие свойств строительных материалов, рассмотрены вопросы определения поперечных деформаций статически определимых балок от действия поперечных сил и факторов влияния на величину максимальных прогибов с помощью имеющихся аналитических способов. Оценена разработанная отечественными нормами методика для их учета с использованием коэффициента. Его значение не в полной мере отображает действительное влияние характеристик материала на прогибы, что может отражаться на точности получаемых результатов.

Ключевые слова: прогиб, сдвиговые деформации, упругие характеристики материала, клееные древесина, LVL.

The calculation of wooden structures according to the limiting states of the second group is carried out considering the shift. Neglecting the influence of the transverse force on the stress-strain state of the element understates the actual value of deflections. Considering the already developed calculation concepts, new research and the diversity of the properties of building materials, the issues of determining the transverse deformations of statically definable beams from the action of transverse forces and factors influencing the magnitude of maximum deflections using the available analytical methods. The methodology developed by domestic standards for their

accounting using the coefficient is evaluated. Its value does not fully reflect the actual effect of material characteristics on deflections, which may affect the accuracy of the results obtained.

Keywords: deflection, shearing deformations, elastic responses of material, glued laminated timber, LVL.

В элементах конструкций помимо прогибов, которые вызваны изгибаемым моментом, возникает дополнительный от поперечной силы. Это происходит от сдвига смежных поперечных сечений друг относительно друга, причем неравномерно распределенные касательные напряжения искривляют сечения балки (рис. 1, 2). При расчетах это воздействие на величину поперечных деформаций балок с различными условиями закрепления учитывают общая формула Максвелла-Мора [1, 2] и теория балки Тимошенко [3].

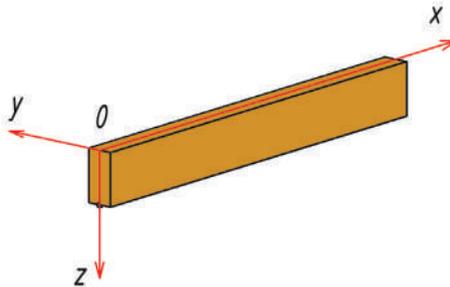


Рис. 1. Схема балки с главными направлениями анизотропии свойств в декартовой системе координат

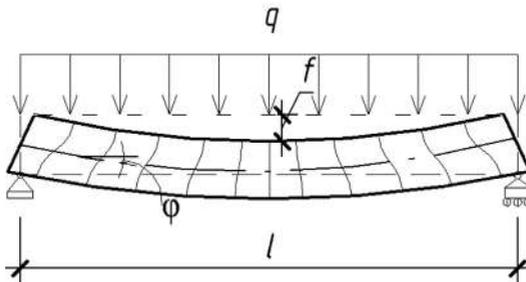


Рис. 2. Схема деформированной только от сдвигов шарнирно опертой балки

Деформациями сдвига обычно пренебрегают при анализе балок, так как эта погрешность, как правило, составляет 1–3 % или их принимают во внимание, только когда речь идет о тонкостенных сечениях [3, 4]. Однако для строительных конструкций из древесины и материалов на ее основе выявлено, что такие деформации могут в значительной степени увеличить прогибы и их необходимо учитывать. При определении причин такого отличия в поведении элемента при одинаковых условиях нагружения и защемления, но разных материалах, следует рассмотреть теоретический аспект вопроса.

При изгибе бруса угол наклона касательной к его оси φ :

$$\frac{df_{\text{сд}}}{dx} = \frac{kQ}{GF} \quad (1)$$

где $df_{\text{сд}}$ – дополнительный прогиб от сдвига; Q – поперечная сила; F – площадь поперечного сечения; G – модуль сдвига. Полная кривизна балки находится как сумма кривизны, вызываемой изгибающим моментом и полученной дифференцированием обеих частей формулы (1) по x :

$$\frac{d^2f}{dx^2} = \frac{M}{EI} = \frac{kq}{GF} \quad (2)$$

где M – изгибающий момент; I – момент инерции поперечного сечения; E – модуль упругости; k – коэффициент формы поперечного сечения. Решение дифференциального уравнения позволяет вычислить полные прогибы. В случае одного из самых распространенных вариантов расчетных схем строительных конструкций – равномерно нагруженной балки постоянного поперечного прямоугольного сечения, свободно лежащей на двух опорах – имеем следующее уравнение полных прогибов:

$$f = \frac{5ql^4}{384EI} \left(1 + \frac{48kEI}{5GFl^2} \right) = \frac{5ql^4}{384EI} \left[1 + 19,2 \left(\frac{h}{l} \right)^2 \right] \quad (3)$$

при E – модуле упругости древесины вдоль волокон равным 10 ГПа, а $G = 0,5$ ГПа [5], $k = 1,2$ [6], $F = bh$, $I = bh^3/12$. Как видно из формулы (3) при определенных значениях упругих характеристик древесины и коэффициента формы сечения выражение приобретает вид

аналогичный представленной в СНиП II-25-80 методике [5] и его актуальной редакции [7]. Значение коэффициента c , учитывающего деформации сдвига, по СП 64.13330.2017 для рассматриваемого случая равен 19,2.

При свободно опертой балке загруженной посередине сосредоточенной нагрузкой и постоянном прямоугольном поперечном сечении коэффициент c равен 24. Полный прогиб:

$$f = \frac{Pl^3}{48EI} \left(1 + \frac{12kEI}{5GFl^2} \right) = \frac{Pl^3}{48EI} \left[1 + 24 \left(\frac{h}{l} \right)^2 \right] \quad (4)$$

При свободно опертой балке загруженной двумя одинаковыми по величине сосредоточенными нагрузками, находящимися на одинаковом расстоянии от опор $a = l/4$ коэффициент c равен 17,45. Полный прогиб:

$$f = \frac{11Pl^3}{384EI} \left(1 + \frac{96kEI}{11GFl^2} \right) = \frac{11Pl^3}{384EI} \left[1 + 17,45 \left(\frac{h}{l} \right)^2 \right]. \quad (5)$$

При консольной балке с сосредоточенной на конце нагрузкой c равно 6. Полный прогиб:

$$f = \frac{Pl^3}{3EI} \left(1 + \frac{3kEI}{GFl^2} \right) = \frac{Pl^3}{3EI} \left[1 + 6 \left(\frac{h}{l} \right)^2 \right]. \quad (6)$$

Вычисленные по формулам (3–6) значения совпадают с результатами расчета по методике из действующих норм [7]. Однако такой результат был достигнут с некоторыми допущениями принятых ранее параметров. Коэффициент формы сечения k — это величина отношения общей площади сечения к площади его сдвига, которая фактически препятствует сдвиговым деформациям. Существует несколько вариантов подсчета этого коэффициента, которые дают разные результаты [8, 9], а соответственно оказывают разную степень влияния на итоговый результат прогибов. Обычно критериями являются равные собственные частоты [3], равные средние значения перемещений [10] или равные энергии деформации сдвига [11]. Учет сдвигов при вычислении прогибов упругих стержней переменного сечения можно принять во внимание с использованием следующих работ [12, 13].

Другой параметр – отношение модуля упругости к модулю сдвига – при создании нормативной документации был взят как постоянная величина равная 20 для всех деревянных элементов. Для композиционных материалов на основе древесины (например, LVL или CLT) и их различных упругих характеристиках, такое решение можно считать некорректным. Разные физико-механические характеристики для древесины и древесных материалов не сохраняют указанное соотношение постоянным. Для наглядности ниже приведены графики (рис. 3 и 4) и табл. 1, 2 на которых отображены вычисленные значения.

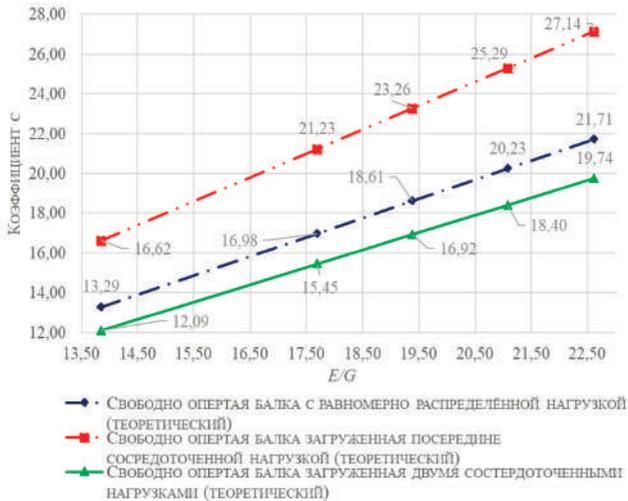


Рис. 3. График зависимости изменения значения коэффициента от класса прочности ДК

Таблица 1

Результаты расчета для ДК

Класс	E/G	c при расч. схеме 1	c при расч. схеме 2	c при расч. схеме 3	Запас, %
к20	13,85	13,29	16,62	12,09	30,77
к24	17,69	16,98	21,23	15,45	11,54
к28	19,38	18,61	23,26	16,92	3,08
к32	21,08	20,23	25,29	18,40	-5,38
к36	22,62	21,71	27,14	19,74	-13,08

По таблице В.4 СП 64.13330.2017 были выбраны характеристики ДК, установленные для классов прочности, где среднее значение модуля сдвига (и некоторые другие характеристики) является постоянным для всех классов, при этом модуль упругости при изгибе нет. Такие параметры могут подвергаться сомнению, но в нормативной и технической документации нет сведений о причинах такого заключения. Анализируя полученные данные, можно сказать, что меньший класс прочности обеспечивает больший запас, достигаемый практически 30 %, и как следствие – значительный перерасход в случае принятия коэффициента по нормам. Упругие характеристики более высоких классов дают противоположный результат. Минус в результатах свидетельствует о превышении нормативных значений. При условии, что установленные сводом правил упругие характеристики верны, применение методики, в которой их учет отсутствует при расчете полных прогибов, недопустимо.

Таблица 2

Результаты расчета для конструкционных пиломатериалов

Класс	E/G	c при расч. схеме 1	c при расч. схеме 2	c при расч. схеме 3	Запас, %
c14	15,91	15,27	19,09	13,89	20,45
c20	16,10	15,46	19,32	14,06	19,49
c27	15,97	15,33	19,17	13,94	20,14
c40	15,91	15,27	19,09	13,89	20,45
c50	16,00	15,36	19,20	13,97	20,00

В случае исследования конструкционных пиломатериалов, принимая во внимание упругие характеристики, запасы, полученные в результате вычислений, при разных классах имеют небольшую разницу между собой в $\pm 0,5$ %. Но значительное расхождение с нормами все еще сохраняется и составляет 20 %.

Как видно уже из вышеизложенных положений для принятия эффективных проектных решений и адекватного анализа зависимости прогибов от сдвига необходимо иметь сведения обо всех основных упругих постоянных материала. Однако, в нормативной и тех-

нической документации практически нет сведений о части из них. В основном нормативном документе по проектированию деревянных конструкций [7] не отражены различия свойств клеенного из шпона бруса различных пород древесины, включая комбинированные, а также не учитывается влияние поперечно ориентированных слоев, их количества и суммарной толщины изделия. Вместо этого приводятся прочностные показатели материала трех классов прочности – 1 (K45), 2 (K40) и 3 (K35), вводимые отечественными нормами без определения. Хотя такие характеристики не находят отражения ни в ГОСТе [15], ни в стандарте изготовителей [16] оценка степени влияния свойств материала для них тоже проведена.



Рис. 4. График изменения значения коэффициента для LVL

Анализ произведен с учетом E/G от K45 до K35. Как видно из приведенной выше графика, значения LVL класса прочности K35 имеют максимальное отношение модуля упругости к модулю сдвига и полностью соответствуют приведенной методике, но при увеличении класса до K45 появляется значительный запас в 14,3%, что может привести к необоснованному перерасходу материала.

Погрешность такого рода может быть устранена, если оставлять в формуле упругие характеристики анизотропного материала. Подобная практика присутствует в европейских нормах. Согласно

Еврокоду [17,18] влияние поперечной силы на напряженно-деформированное состояние элемента также учитывается коэффициентом, однако разные свойства материалов приняты во внимание. Значения 0,96; 1,2; 0,873 и 0,3 для самых распространенных вариантов расчетных схем строительных конструкций также получены по формулам (3–6) соответственно.

Существующая тенденция выполнять все элементы при проектировании строительных конструкций из современных материалов стимулирует производить моделирование для оценки эффективности и рациональности таких решений. *LVL*-конструкции, а именно разные классы прочности рассчитанные с учетом отношения модуля упругости к модулю сдвига и без него на рис. 5 и 6 достаточно наглядно показывают, что от выбора материала и геометрических характеристик будет зависеть значимость перерасхода. Этот аспект достаточно целесообразен на этапе вариантного проектирования и для каждого конкретного случая должен обосновываться отдельно. В данной ситуации принята балка постоянного поперечного прямоугольного сечения, свободно лежащая на двух опорах воспринимая равномерную нагрузку $q = 1,5$ кН/м.

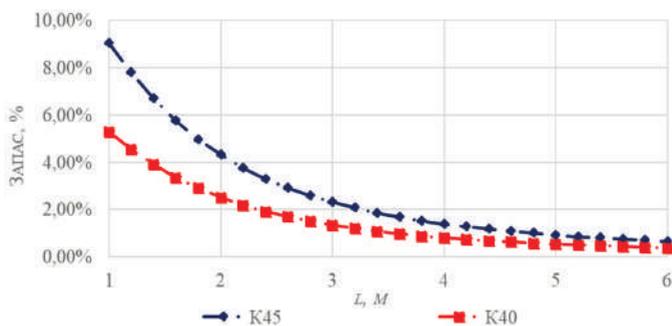


Рис. 5. График изменения запаса при разной длине *LVL*-балки

На рисунке 5 выбран шаг 0,2 м. При таком частоте можно в полной мере продемонстрировать факт уменьшения разницы между двумя балками с разными упругими характеристиками при увеличении длины элемента. На рисунке 6 обратная ситуация – при шаге 0,05 м заметен рост с увеличением высоты сечения.

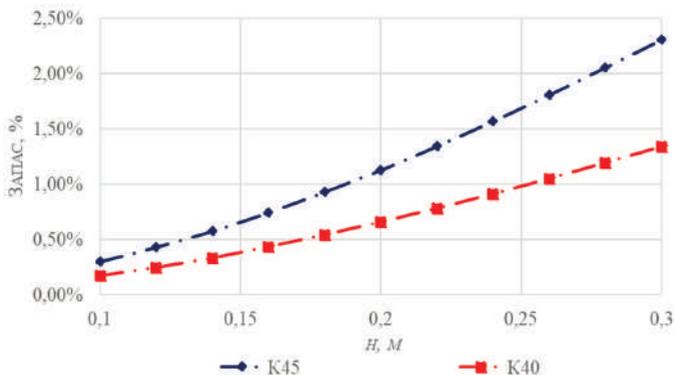


Рис. 6. График изменения запаса при разной высоте сечения LVL-балки

Таким образом, в ходе исследования были рассмотрены факторы, влияющие на поперечные деформации конструкций. Одним из основных является отношение модуля упругости вдоль волокон к модулю сдвига, которое напрямую зависит от природы материала и его свойств. Проведен сравнительный анализ с методом вычислений полных прогибов, не учитывающий это. Во многих случаях был заложен значительный запас, достигающий 10–30 %. При этом были обнаружены превышения нормативных значений, требующие пересмотра методики.

Литература

1. Maxwell J. C. On the calculation of the equilibrium and stiffness of frames. Philosophical magazine, 1864, vol. 27(182), pp. 294–299.
2. Mohr C. O. Beitrag zur Theorie des Fachwerks. Zeitschrift des Architekten- und Ingenieur-Vereins zu Hannover, 1874, vol. 20, pp. 509–526.
3. Тимошенко С. П. Механика материалов / С.П. Тимошенко, Дж. Гере – СПб. : Лань, 2002. – 672 с.
4. Филоненко-Бородич М. М. (ред.), Изюмов С. М., Олисов Б. А. Курс сопротивления материалов. Ч. 2. – 4-е изд., – М., Л. : Гостехтеориздат, 1956. – 539 с.
5. СНиП II-25-80 Деревянные конструкции. Минстрой России – М. : ГП ЦПП, 1995.
6. Гастев В. А. Краткий курс сопротивления материалов. М. : 1977. 456 с.
7. СП 64.13330.2017 Деревянные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-25-80 (с Изменениями № 1, 2, 3) – М. : Минрегион России, 2022.

8. *Hariharan I.* The Effects of Shear Deformation in Rectangular and Wide Flange Sections; Blacksburg – Virginia Polytechnic Institute and State University, 2005. – 121 p.
9. *Steinboeck A., Kugi A., Mang H. A.* Energy-consistent shear coefficients for beams with circular cross sections and radially inhomogeneous materials // International Journal of Solids and Structures. 2013. Vol. 50, No 11–12. Pp. 1859–1868.
10. *Cowper G. R.* The shear coefficient in Timoshenko's beam theory // Journal of Applied Mechanics. 1966. Vol. 33, No. 2. Pp. 335–340.
11. *Renton J. D.* Generalized Beam Theory Applied to Shear Stiffness // International Journal of Solids and Structures. 1991. Vol. 27, Issue 15. Pp. 1955–1967.
12. *Каган-Розенцвейг Л. М.* О касательных напряжениях при изгибе упругого стержня переменного сечения // Вестник гражданских инженеров. 2019. № 2(73). С. 43р47.
13. *Каган-Розенцвейг Л. М.* Уточнение методов учета сдвигов при вычислении прогибов и собственных частот упругих стержней переменного сечения// Вестник гражданских инженеров. 2019. № 3(74). С. 29–35.
14. Расчет элементов строительных *LVL*-конструкций: учеб. пособие / П. С. Коваль, Е. В. Данилов, М. Б. Москалев; СПбГАСУ. – СПб., 2023. – 198 с.
15. ТУ 53 66-052-69150009120-2013 Брус клееный из шпона ULTRALAM. Введ. 2022-10-10. Торжок: ООО «СТОД», 2022.
16. ГОСТ 33124-2021. Брус многослойный клееный из шпона. Технические условия. Введ. 2022-09-01. М. : Стандартиформ, 2015.
17. Eurocode 5. Design of timber structures. Part: General rules and rules for buildings. ENV 1995-1-1. Brussels: CEN, 1993. 133 p.
18. Structural timber design to Eurocode 5// Porteous J, Abdy Kermani. 2004. С. 555.

УДК 621.311

Любовь Граб,

магистр

(Viken Sol)

E-mail: liubovi.96hustis@gmail.com

Liubovi Grab,

Master's degree

(Viken Sol)

E-mail: liubovi.96hustis@gmail.com

ПРОДУКТИВНОСТЬ СОЛНЕЧНЫХ ПАНЕЛЕЙ В СЕВЕРНЫХ СТРАНАХ. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ И ПОТЕНЦИАЛА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В УСЛОВИЯХ НИЗКОЙ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

SOLAR PANEL PRODUCTIVITY IN NORTHERN COUNTRIES. EVALUATION OF EFFICIENCY AND POTENTIAL FOR USE UNDER LOW SOLAR ACTIVITY CONDITIONS

Данная статья посвящена исследованию эффективности использования солнечных панелей в северных странах на примере Норвегии. В статье проанализированы различные факторы, влияющие на производительность солнечных панелей в условиях низкой солнечной активности.

Кроме того, в статье рассмотрены важные аспекты выбора инверторов солнечной энергии и представлено исследование случая, проведенное в Норвегии, которое показало, что даже в условиях низкой солнечной активности солнечные панели могут быть эффективным источником энергии.

В целом, статья подчеркивает, что использование солнечной энергии растет с каждым годом во всем мире, и установка солнечных панелей в северных регионах может быть выгодным и перспективным решением в долгосрочной перспективе.

Ключевые слова: солнечная энергия, северные регионы, солнечные панели, экономические аспекты, экологические аспекты, производство электроэнергии, инверторы, инновации, климатические условия.

This article is devoted to investigating the effectiveness of using solar panels in northern countries, using Norway as an example. The article analyzes various factors that affect the performance of solar panels in conditions of low solar activity. In addition, the article examines important aspects of choosing solar energy inverters and presents a case study conducted in Norway, which showed that even in conditions of low solar activity, solar panels can be an effective source of energy. Overall, the article emphasizes that the use of solar energy is growing worldwide, and installing solar panels in northern regions can be a profitable and promising long-term solution.

Keywords: solar energy, northern regions, solar panels, economic aspects, environmental aspects, electricity generation, inverters, innovations, climatic conditions.

Актуальность

Конечная цель использования возобновляемых источников энергии, включая солнечную энергию, заключается в уменьшении зависимости от ископаемых видов топлива и сокращении выбросов углерода в атмосферу. В последние годы использование солнечной энергии стало все более популярным по всему миру. Согласно отчету Международного энергетического агентства (МЭА) к 2026 году мировая установленная мощность возобновляемых источников энергии, вырастет более чем на 60 % по сравнению с уровнем 2020 года до более чем 4800 ГВт. Это эквивалентно общей установленной мощности электростанций, работающих на основе ископаемого топлива и ядерной энергии вместе взятых [1].

Введение

Солнечная энергия имеет огромный потенциал, особенно в развивающихся странах, где еще есть необходимость в расширении доступа к электроэнергии. Многие страны по всему миру стремятся увеличить производство электроэнергии из солнечных источников, создавая соответствующую инфраструктуру и регулируя цены на энергию (рис. 1).

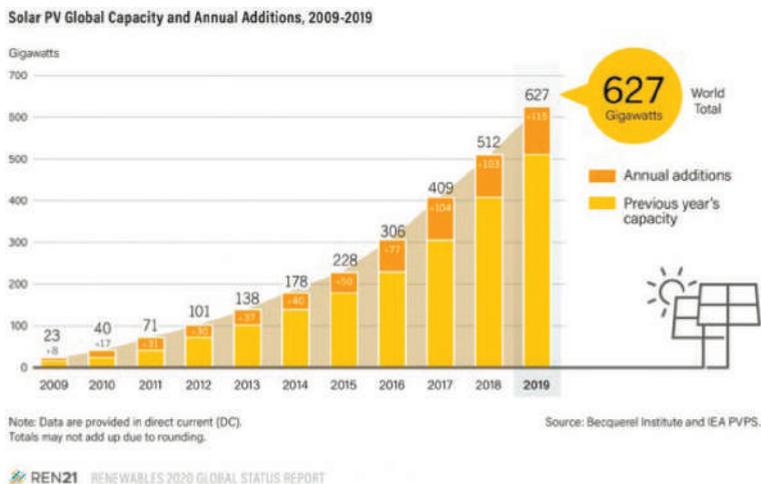


Рис. 1. Общая мощность и ежегодный прирост фотоэлектрических установок за 2009–2019 гг. [2]

Однако, по-прежнему существуют препятствия для расширения использования солнечной энергии, такие как высокая стоимость инсталляций и ограниченность доступных технологий. Тем не менее, с каждым годом технологии производства солнечных панелей становятся все более эффективными, а себестоимость снижается, что делает солнечную энергию все более привлекательным вариантом для генерации электроэнергии.

Продуктивность солнечных панелей является важным аспектом использования солнечной энергии. Это относится не только к традиционно солнечным странам, но и к северным странам, где солнечная энергия может использоваться эффективно, но с некоторыми особенностями. Северные страны, к примеру такие как Норвегия, Канада, Швеция находятся на значительном расстоянии от экватора. Это означает, что они имеют меньшее количество солнечной энергии по сравнению с традиционно солнечными странами. Кроме того, они сталкиваются с более экстремальными погодными условиями, которые могут влиять на продуктивность солнечных панелей.

Использование солнечных панелей в северных странах может иметь дополнительные экологические преимущества, так как солнечная энергия может заменить другие источники энергии, такие как ископаемые топлива, что может сократить выбросы парниковых газов и других загрязнений воздуха [3]. Солнечная энергия становится более конкурентоспособной в сравнении с другими источниками энергии, в том числе и с энергией ветра (рис. 2).

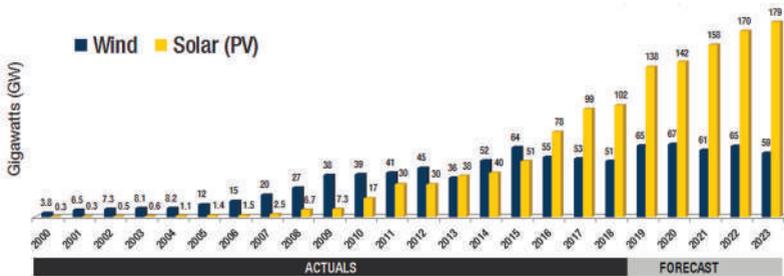


Рис. 2. Количество новых солнечных установок в год (2000–2023 гг.) [4]

Именно поэтому изучение продуктивности солнечных панелей в северных странах является особенно важным. По мере того,

как эти страны стремятся увеличить свою долю возобновляемых источников энергии, таких как солнечная энергия, они также ищут способы повышения продуктивности используемых солнечных панелей, чтобы максимально использовать потенциал солнечной энергии, который доступен им в течение года.

Продуктивность солнечных панелей

Продуктивность солнечных панелей в северных странах отличается по сравнению с южными регионами. Это обусловлено рядом факторов, которые влияют на эффективность солнечных панелей и систем солнечной энергии.

Угол наклона солнечных панелей: Использование оптимального угла наклона для солнечных панелей может увеличить их производительность в зимние месяцы и в условиях низкой солнечной радиации. В северных регионах, где угол падения солнечных лучей меняется в течение года, важно выбрать правильный угол наклона для максимальной производительности.

Температура: Высокие температуры могут снижать производительность солнечных панелей, поскольку это уменьшает их КПД. В северных регионах, где температуры могут быть ниже, производительность солнечных панелей может быть выше.

Климатические условия: Продуктивность солнечных панелей в северных регионах может варьироваться в зависимости от времени года и погодных условий. В зимние месяцы, когда дневное время короче и погода холоднее, производительность может быть ниже. Поэтому при планировании солнечных систем в северных регионах важно учитывать климатические условия и временные факторы.

Поверхность солнечных панелей: Поверхность солнечных панелей может существенно влиять на производительность. В северных регионах, где в зимние месяцы может быть много снега, важно обеспечить регулярную очистку поверхности панелей для максимальной эффективности.

Направление установки: Направление установки солнечных панелей может также влиять на их продуктивность. В северных регионах, где зимой солнце находится ниже на горизонте, важно правильно ориентировать панели для максимальной экспозиции к солнечным лучам.

Теневые зоны: Присутствие теневых зон, вызванных близлежащими зданиями или деревьями, может снижать продуктивность солнечных панелей.

Технические характеристики оборудования: Выбор качественного оборудования и правильная установка также имеют важное значение для продуктивности солнечных панелей в северных странах.

Эффективность преобразования: Эффективность преобразования солнечной энергии в электроэнергию является одним из важнейших факторов, влияющих на продуктивность солнечных панелей. Выбор более эффективных солнечных панелей может повысить их продуктивность в северных странах.

Несмотря на вышеперечисленные факторы, установка солнечных панелей в северных регионах по-прежнему является выгодной. Это связано с несколькими факторами.

Во-первых, существуют технологии, которые улучшают производительность солнечных панелей в условиях низкой интенсивности солнечного излучения. Например, современные солнечные панели обладают высокой степенью эффективности даже при слабом солнечном свете, что обеспечивает высокую производительность в северных регионах.

Во-вторых, использование солнечной энергии позволяет снизить негативное воздействие на окружающую среду и уменьшить зависимость от нестабильных источников энергии. Это позволяет сократить выбросы углекислого газа, что является одной из главных причин глобального изменения климата.

Наконец, стоимость солнечных панелей постоянно снижается, что делает их установку более доступной для пользователей в разных регионах мира. По мере развития технологий и увеличения спроса на солнечную энергию, стоимость солнечных панелей продолжит снижаться, что сделает их установку еще более выгодной в будущем.

Выбор инвертора

Одним из важных аспектов установки солнечной системы является выбор инвертора.

Инвертор — это устройство, которое преобразует постоянный ток (DC) от солнечных панелей в переменный ток (AC), который

используется для питания электроприборов в зданиях или подается на электросеть [5].

Инверторы играют важную роль в системах солнечной энергии, так как они оптимизируют производительность солнечных панелей и обеспечивают эффективное использование энергии. Например, некоторые современные инверторы обладают функцией максимальной мощности (MPPT), которая позволяет максимизировать производительность солнечных панелей в различных условиях, включая низкое освещение или тень.

Кроме того, некоторые инверторы могут иметь функции мониторинга и управления, которые позволяют отслеживать производительность системы солнечной энергии и управлять ее работой удаленно.

Солнечные панели в Норвегии

Продуктивность солнечных панелей в Норвегии является одной из самых важных тем в области использования возобновляемых источников энергии.

Одним из основных факторов, который влияет на продуктивность солнечных панелей в Норвегии, является климатические условия. В северных регионах страны зимой дни короткие и солнце низко над горизонтом, что может существенно снижать эффективность солнечных панелей. Однако летом, когда дни длинные и солнце высоко над горизонтом, солнечные панели могут работать более эффективно.

Кроме того, важную роль играют технические параметры самой солнечной панели. Для обеспечения максимальной продуктивности необходимо выбрать панель с высокой эффективностью преобразования солнечной энергии в электрическую энергию. Также важно учитывать угол наклона панели и ее ориентацию относительно солнца.

Результаты одного из исследований показали, что солнечные панели в Осло могут производить от 800 до 1100 кВтч электроэнергии в год, в зависимости от ориентации и угла наклона панелей. Авторы отмечают, что установка солнечных панелей на крыше здания может значительно снизить затраты на электроэнергию и уменьшить выбросы углекислого газа [6].

Выводы

Для повышения продуктивности солнечных панелей в Норвегии важно использовать передовые технологии. Например, использование более эффективных инверторов позволяет получать большую выходную мощность, даже при низком уровне солнечного излучения. Также важно использовать более продвинутое технологии хранения энергии, чтобы обеспечить непрерывное электроснабжение в течение всего дня.

Солнечная энергия имеет огромный потенциал, особенно в развивающихся странах, где еще есть необходимость в расширении доступа к электроэнергии. Многие страны по всему миру стремятся увеличить производство электроэнергии из солнечных источников, создавая подходящие инфраструктуру и регулируя цены на энергию. Однако, по-прежнему существуют препятствия для расширения использования солнечной энергии, такие как высокие стоимости инсталляции и ограниченность доступных технологий.

Тем не менее, с каждым годом технологии производства солнечных панелей становятся все более эффективными, а себестоимость снижается, что делает солнечную энергию все более привлекательным вариантом для генерации электроэнергии.

Важно учитывать различные факторы, влияющие на продуктивность, такие как климатические условия, технологии панелей и выбор инверторов. Тщательное исследование каждого конкретного случая может помочь определить эффективность использования солнечных панелей в конкретных условиях и принять решение о целесообразности их установки.

Литература

1. В период 2021–2026 гг. в мире будет добавлено 1100 ГВт мощностей солнечной энергетики – МЭА – <https://www.digital-energy.ru/2021/12/01/industry/v-period-2021-2026-gg-v-mire-budet-dobavleno-1100-g/>
2. Solar PV Global Capacity and Annual Additions 2009-2019 – <https://www.evwind.es/2020/07/05/in-2019-the-solar-pv-market-increased-an-estimated-12-to-around-115-gw/7556/1>
3. *Dubey J. L., Samal S. S., Jena S. K., Panda S. K.* “Potential and challenges of solar energy in northern countries,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 123, p. 109764, Apr. 2020.

4. Global Wind & Solar Installations in Gigawatts (GW) – <http://www.fi-powerweb.com/Renewable-Energy.html/>
5. Инвертор для солнечных панелей – https://ru.wikipedia.org/wiki/Инвертор_для_солнечных_панелей/
6. *Habtamu B. Madessa*–Performance Analysis of Roof-mounted Photovoltaic Systems – The Case of a Norwegian Residential Building *Energy Procedia*, Volume 83, 2015, стр. 207–215.

УДК 691:624.07

Анна Константиновна Гагарина,
студент

Иван Сергеевич Улитин,
студент

(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный
университет)

E-mail: sleepme@mail.ru,
gagarina.a.k@mail.ru,
ulitin.vanya2k17@mail.ru

Anna Konstantinovna Gagarina,
student

Ivan Sergeevich Ulitin,
student

(Saint Petersburg
State University of Architecture
and Civil Engineering)

E-mail: sleepme@mail.ru,
gagarina.a.k@mail.ru,
ulitin.vanya2k17@mail.ru

ВЛИЯНИЯ ВИБРАЦИЙ НА ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА НАГЕЛЬНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

EFFECTS OF VIBRATIONS ON THE STRENGTH PROPERTIES OF NAGEL JOINTS

Предметом исследования является напряженно-деформируемое состояние нагельных соединений деревянных конструкций из LVL с применением когтевых шайб. Исследовано влияние вибрации на прочность и деформативность нагельных соединений, разработана математическая модель соединения с нагелями и когтевыми шайбами с учетом действия вибрационной нагрузки и методика расчета нагельных соединений с когтевыми шайбами. Определена несущая способность и жесткость при воздействии вибрационной нагрузки деревянной конструкции. Дальнейшее предполагаемое направление использования результатов – применение деревянных конструкций при проектировании зданий и сооружений.

Ключевые слова: деревянные конструкции, когтевая шайба, нагельные соединения, LVL, вибрационные воздействия.

The subject of the study is the stress-strain state of the nail joints of LVL wood-
en structures with the use of claw washers. The influence of vibration on the strength
and deformability of nail joints has been investigated, a mathematical model of the
connection with nails and claw washers has been developed, taking into account
the effect of vibration load and a method for calculating nail joints with claw wash-
ers. The load-bearing capacity and rigidity under the influence of a vibration load of
a wooden structure are determined. The further intended direction of using the results
is the use of wooden structures in the design of buildings and structures.

Keywords: wooden structures, claw washer, pressure joints, LVL, vibration effects.

На рынке строительства существует спрос на деревянные
конструкции из бруса *LVL*. Его применение требует таких же

прочностных и жесткостных характеристик и для соединений. В таком случае применяются нагельные соединения с когтевыми шайбами в виду их компактного размещения с учетом требуемой надежности. Но они имеют свойство накапливать разрушения при действии вибрационных нагрузок. На данный момент есть ряд затруднений в расчетах таких конструкций при вибрационных нагрузках и совместной работе двух нагельных соединений, так как информации по расчетам в нормативной документации и в целом недостаточно. Таким образом, развитие методик расчета нагельных соединений деревянных конструкций из бруса *LVL* с когтевыми шайбами при действии вибрационных нагрузок является актуальной и современной задачей.

При вибрационной нагрузке деформации в нагельных соединениях достигают опасных пределов, после которых разрушение происходит раньше, чем при том же уровне нагружения от статического нагружения. Материалы испытываемой конструкции – клееный многослойный брус (*LVL*), нагели, а в частности – когтевые шайбы. Соединения с ними в конструкции из *LVL* подробно рассмотрены в работе Глухих В. Н., Черных А. Г., Данилова Е. В. и других авторов [1-6]. Экспериментальные данные в этих исследованиях были использованы в качестве базовой информации о когтевых шайбах и *LVL* – брус [7-12]. Переменные воздействия рассмотрены в работе Шешуковой Н. В. и Михайлова Б. К. [13]. В ней подробно рассматривается влияние циклической нагрузки на несущую способность нагельных соединений и древесины в целом. Исследование проводилось по методике, которую разработал А. С. Прокофьев [14,15]. Исследованием соединений при действии повторных нагрузок также занимался Шапошников В. Н. [16]. Существует ГОСТ Р 57160-2016 [17] на методы циклических испытаний узлов с механическими креплениями. В основном исследования рассматривают поведение соединений конструкций из цельной древесины, при этом исследований, посвященных *LVL*-конструкциям, недостаточно. Нормативные документы, регламентирующие расчет нагельных соединений с когтевыми шайбами в условиях действия вибраций, циклических и иных переменных воздействий отсутствуют. Цель работы – исследо-

вать влияние вибрации на прочность и деформативность нагельных соединений. Задачи – математическая модель, методика расчета и определение несущей способности и жесткости соединения с нагельными и когтевыми шайбами при воздействии вибрационной нагрузки. Ни один из методов испытаний не подошел в рамках выбранной темы. В первом случае применялось другое оборудование. Во втором случае была методика на испытание со знакопеременными нагрузками, что не подходило под критерии испытания данной темы, так как в работе рассматривается частный случай циклического нагружения – вибрации (нагрузка прикладывается с одним знаком). Поэтому в текущих условиях была разработана своя методика испытаний.

Для достижения требуемых задач проводились испытания. Разработана физическая модель деревянной конструкции из *LVL* с когтевыми шайбами и определена ее несущая способность и жесткость при воздействии вибрационной нагрузки. За критерии разрушения приняты смятие древесины в элементах, предельные перемещения и изгиб нагеля. Для расчетов принята гипотеза об обеспечении устойчивости конструкции при заданном соотношении геометрических характеристик и уровня нагружения. Соединение рассматривается как фрагмент конструкции. Опираясь на исследования, проведенные в работе Глухих В. Н., Черных А. Г. и Данилова Е. В. [1], было принято решение конкретизировать критерии прочности – достижение предельных перемещений в два миллиметра между элементами согласно СП 64.13330.2017 [18], так как происходит разрушение по критерию превышения предельного смещения, то есть не достигается изгиб нагеля и смятие древесины. Все характеристики образцов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики испытываемых образцов

Характеристика соединения	Номер подгруппы испытаний:		
	1	2	3
Серия 1: Для угла между направлением волокон крайних и среднего элементов $\alpha = 0^\circ$			
Уровень нагрузки	0,4P	0,5P	0,6P
Влажность <i>LVL w</i> , %	8	8	8
Диаметр когтевой шайбы $d_{к.ш.}$, мм	75	75	75
Диаметр нагеля d_n , мм	16	16	16
Толщина элементов <i>t</i> , мм	63	63	63
Серия 2: Для угла между направлением волокон крайних и среднего элементов $\alpha = 45^\circ$			
Уровень нагрузки	0,4P	0,5P	0,6P
Влажность <i>LVL w</i> , %	8	8	8
Диаметр когтевой шайбы $d_{к.ш.}$, мм	75	75	75
Диаметр нагеля d_n , мм	16	16	16
Толщина элементов <i>t</i> , мм	63	63	63
Серия 3: Для угла между направлением волокон крайних и среднего элементов $\alpha = 90^\circ$			
Уровень нагрузки	0,4P	0,5P	0,6P
Влажность <i>LVL w</i> , %	8	8	8
Диаметр когтевой шайбы $d_{к.ш.}$, мм	75	75	75
Диаметр нагеля d_n , мм	16	16	16
Толщина элементов <i>t</i> , мм	63	63	63

Влажность образцов 8 %. Диаметр нагеля 16 мм. В качестве нагеля использовался гладкий арматурный стержень А240 (СтЗсп по

ГОСТ 380-94 [19]). При изготовлении элементов конструкции применялся брус *LVL Ultralam* [20]. Толщина элементов из бруса *LVL* составила 63 мм. Диаметр когтевой шайбы – 75 мм. В качестве когтевых шайб применялись двухсторонние зубчато-кольцевые пластины *C1* диаметром 75 мм. Образцы фиксировались струбцинами. Определена разрушающая нагрузка путем разрушения образца при кратковременных пробных испытаниях. Результаты представлены в табл. 2.

Таблица 2

Величина разрушающей нагрузки

Угол приложения нагрузки	Величина разрушающей нагрузки, кН	40 % от разрушающей нагрузки, кН	50 % от разрушающей нагрузки, кН	60 % от разрушающей нагрузки, кН
0°	31,70	12,68	15,85	19,02
90°	21,15	8,46	10,58	12,69
45°	22,46	8,98	11,23	13,48

Разрушенный и испытываемый образцы представлены на рис. 1.

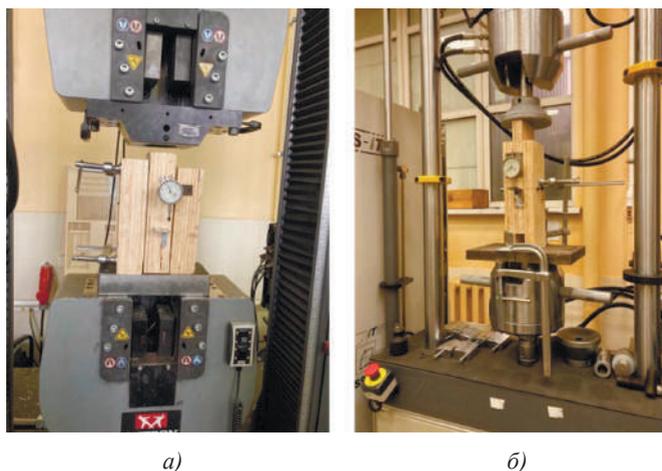


Рис. 1. Образцы: *а* – разрушенный; *б* – испытываемый

Были проведены пробные испытания, где частота в диапазоне от 5 до 50 Гц не оказала заметного влияния на деформативность и где определено оптимальное значение амплитуды (5 %).

Нагрузка принималась 40 %, 50 %, 60 % от разрушающей нагрузки и прикладывалась вдоль волокон, под углом 45 градусов и поперек волокон. Схема габаритов образцов и расположения среднелемента показана на рисунке 2.

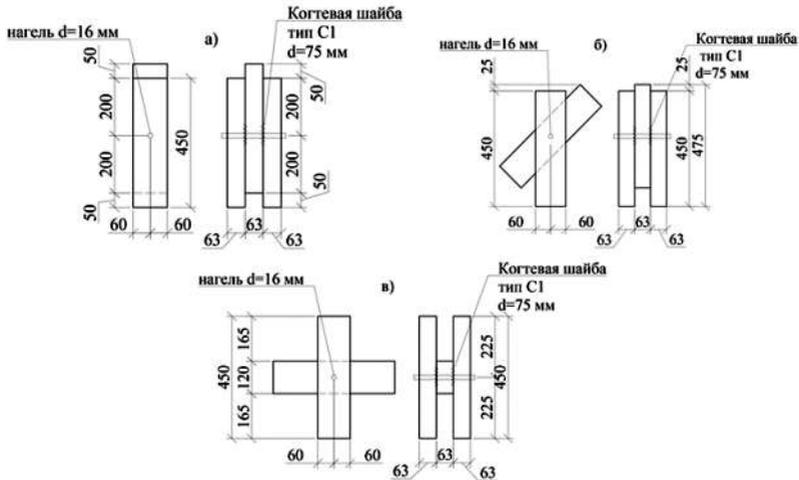


Рис. 2. Схема расположения среднего элемента относительно крайних под углом:
 $a - 0^\circ$; $b - 45^\circ$; $v - 90^\circ$

Деформации от перемещений фиксировались индикаторами часового типа ИЧ10 с ценой деления 0,01 мм.

В процессе основных испытаний нагрузка на образец поддерживалась постоянной с амплитудой 5 % – наиболее популярной амплитудой в эксплуатации конструкций, частотой 50 Гц и $N = 2 \cdot 10^6$ циклов. При достижении предела в два миллиона циклов испытания останавливались, полученные данные статистически обрабатывались, строились графики зависимости перемещений от количества циклов и далее обрабатывались для исключения случайных

значений и погрешности, которые могут быть вызваны не параллельностью опорных граней накладок. Каждая серия образцов испытывалась два раза.

В результате определения несущей способности при действии вибрационной нагрузки можно сделать вывод, что критерии разрушения не были достигнуты. Жесткость конструкции можно разделить по формуле 1:

$$k = \frac{N}{\Delta}, \quad (1)$$

где N – нагрузка (кН), Δ – перемещения (мм).

При условии предельных перемещений в 2 мм коэффициент линейной жесткости для нагрузки в 40 %, 50 %, 60 % от разрушающей нагрузки будет находиться соответственно по формулам 2–4:

$$k_{0,4} = \frac{0,4N}{2} = 0,2N \frac{\text{кН}}{\text{мм}} \quad (2)$$

$$k_{0,5} = \frac{0,5N}{2} = 0,25N \frac{\text{кН}}{\text{мм}} \quad (3)$$

$$k_{0,6} = \frac{0,6N}{2} = 0,3N \frac{\text{кН}}{\text{мм}} \quad (4)$$

На их основе данных перемещений элементов образцов были построены графики, представленные на рисунке 3. В них отражена зависимость перемещений (ось Y) от количества циклов (ось X).

На рисунке 3 наблюдается общая тенденция большого роста деформаций в самом начале испытаний. Но достигая количество циклов от 100 до 200 тысяч (в зависимости от угла и уровня приложения нагрузки) перемещения начинают увеличиваться менее интенсивно.

Под нагрузкой $0,4P_{\text{разр}}$, приложенную вдоль волокон (рисунок 3а), образец прекратил перемещения еще до наступления 500 тысяч циклов. Та же самая тенденция наблюдалась у образцов с нагрузками $0,5P_{\text{разр}}$ и $0,6P_{\text{разр}}$. У последней перемещения составили 0,26 мм.

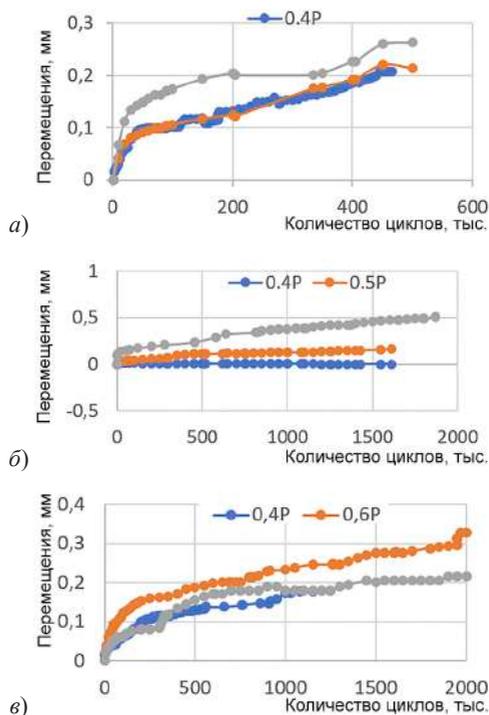


Рис. 3. График зависимости перемещений от количества циклов при угле:
 $a - 0^\circ$; $б - 45^\circ$; $в - 90^\circ$

Под углом 45 градусов (рис. 3, б) у образцов под нагрузкой $0,4P_{\text{разр}}$ практически не наблюдался рост деформаций. У нагрузок $0,5P_{\text{разр}}$ и $0,6P_{\text{разр}}$ они составили на момент окончания испытания 0,16 мм и 0,5 мм соответственно. Поперек волокон (рис. 3, в) результаты были следующие: для нагрузки $0,4P_{\text{разр}}$ перемещения на момент завершения эксперимента составили 0,17 мм, для нагрузки $0,5P_{\text{разр}}$ – 0,2 мм, а для нагрузки $0,6P_{\text{разр}}$ – 0,3 мм. У всех трех графиков была выявлена нелинейная зависимость.

При создании математической модели на основе результатов испытания требуется описать полученные данные уравнением зависимости перемещений от количества циклов методом аппроксимации по алгоритму [21] с помощью программы Microsoft Excel. После вы-

полнения автоматической аппроксимации исходных данных была подобрана логарифмическая функция, которая наиболее полно описывала физическую модель. Уравнение (5) для каждой из нагрузок (40 %, 50 %, 60 % от разрушающей) в зависимости от угла приложения нагрузки (0° , 45° и 90°) в общем виде выглядит следующим образом:

$$\Delta = a \cdot \ln(n) + b, \quad (5)$$

где Δ – перемещения (мм); a и b – коэффициенты однофакторной аппроксимации; n – количество циклов.

В результате подбора было получено несколько функций, описывающих зависимость коэффициентов от угла приложения нагрузки. Каждая функция являлась коэффициентом для переменной предыдущего шага аппроксимирующей функции. Подставив все полученные коэффициенты в общее уравнение (5), перемещения для нагельного соединения можно описать уравнением 6:

$$\begin{aligned} y = & ((-0,003\alpha^2 + 0,0257\alpha + 0,335)P^2 + \\ & + (-0,001\alpha + 0,1172)P - (0,0001\alpha^2 - 0,011\alpha - \\ & - 0,3235)) \ln(n) - ((0,015\alpha + 0,6592)P^2 - \\ & - 0,3235)) \ln(n) - ((0,015\alpha + 0,6592)P^2 - \end{aligned} \quad (6)$$

где α – угол приложения нагрузки к волокнам; P – уровень нагрузки; n – количество циклов; Δ – перемещения.

Уравнение (6) дает наибольшую сходимость с реальным поведением образца под действием вибрационной нагрузки, так как величина достоверности аппроксимации находится в диапазоне от 0,84 до 0,9. Оно применимо для прогнозирования перемещений за пределами выбранного количества циклов (более $N = 2 \cdot 106$).

Методика расчета выглядит следующим образом:

1. Подготовка к испытаниям, включающая определение влажности образцов, геометрических характеристик, характеристик соединений, уровня нагрузки и углов приложения нагрузки.

2. Проведение пробных испытаний для определения разрушающей нагрузки при изменении условий, описанных в пункте 1.

3. Проведение основных испытаний с углом приложения нагрузки не менее, чем в трех направлениях (0° , 45° , 90°), и не менее двух раз на каждую серию образцов.

4. Обработка статистических данных.
5. Построение графиков (зависимость перемещений от количества циклов).
6. Составление математической модели путем аппроксимации исходных данных.

Подводя итоги проделанных испытаний, можно сформулировать следующие выводы:

1. Была разработана математическая модель нагельного соединения с когтевыми шайбами для конструкции из *LVL* с учетом действия вибрационной нагрузки, включающая учет изменения угла наклона приложения нагрузки (0° , 45° , 90°) и уровень приложения нагрузки (40 %, 50 %, 60 % от разрушающей).
2. Разработана физическая модель и методика расчета нагельных соединений с когтевыми шайбами при постоянных характеристиках, таких как влажность *LVL* (8 %), диаметр нагеля (16 мм), диаметр когтевой шайбы (75 мм), толщина элементов конструкции (63 мм).
3. Определена несущая способность и жесткость конструкции при воздействии вибрационной нагрузки.

Литература

1. Деревянные конструкции с применением когтевых шайб и учетом начальных напряжений древесины: моногр. // В. Н. Глухих, А. Г. Черных, Е. В. Данилов; СПбГАСУ. – СПб., 2018. – 284 с.
2. Попов Е. В, Русланова А. В, Сопилов В. В, Ждралович Н., Мамедов Ш. М., Лабудин Б. В. Контактное взаимодействие когтевой шайбы с древесиной от предельного сдвига // Изв. вузов. Лесн. журн. – 2020. – № 4. – С. 178–189.
3. Римшин В. И, Лабудин Б. В, Мелехов В. И, Попов Е. В, Рощина С. И. Соединения элементов деревянных конструкций на шпонках и шайбах // Вестник МГСУ. – 2016. – № 9. – С. 35–50.
4. Черных А. Г, Данилов Е. В, Коваль П. С. Расчет жесткости соединений конструкций из *LVL* с когтевыми шайбами // Изв. вузов. Лесн. журн. – 2020. – № 4. – С. 157–167.
5. Маркович А. С. Теория расчета податливости деревянных соединений на цилиндрических нагелях // Вестник МГСУ. – 2015. – № 7. – С. 25–31.
6. Лоскутова Д. В. Экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния древесины в зоне контакта с нагелем // Вестник ТГАСУ. – 2008. – № 1. – С. 92–97.
7. Черных А. Г., Григорьев К. С., Коваль П. С., Данилов Е. В., Бакрышева В. В., Кашатов И. Т. К вопросу определения несущей способности нагель-

ных соединений в конструкциях из бруса, клееного из однонаправленного шпона // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 4. – С. 15–21.

8. Гранкин К. В, Шмидт А. Б. О методах расчета сжато-изгибаемых конструкций из клееной древесины // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ». – Т. 8, № 3.

9. Ростовщикова Е. А, Тимофеев В. Е. Исследование прочностных свойств нагельных соединений в конструкциях из клееного однонаправленного шпона (LVL) // Вопросы науки и образования. – 2019. – № 1(42). – С. 31–35.

10. Арленинов Д. К., Беккер Д. А. Влияние уровня напряжений на ползучесть древесины при изгибе // Известия ВУЗов. Лесной журнал. – 2015. – № 6(348). – С. 24–29.

11. Тимофеев В. Е. Исследование соединений в конструкциях из LVL // Научные исследования. – 2018. – № 7(26). – С. 18–24.

12. Животов Д. А. Применение бруса, клееного из однонаправленного шпона, в плоских балочных фермах: автореферат дис. ... канд. техн. наук. СПб.: СПбГАСУ, 2009. – 22 с.

13. Шешукова Н. В, Михайлов Б. К. Длительная прочность и деформативность деревянных конструкций на нагельных соединениях. – СПб. : СПбГАСУ. – 2006. – 84 с.

14. Прокофьев А. С., Кабанов В. А. Экспериментальное исследование стойкости клееных деревянных балок при циклическом температурно-влажностным воздействиям // Работоспособность композиционных строительных материалов. – Казань, 1983. – С. 50–52.

15. Прокофьев А. С., Сморгоч А. А., Кабанов В. А. Методика исследования выносливости клеевых швов деревянных балок.

16. Шапошников В. Н. Особенности работы многонагельных соединений элементов деревянных конструкций и теория их расчета при действии кратковременных, длительных и повторных нагрузках: автореферат дис. ... канд. техн. наук. – Новосибирск, 1983. – 260 с.

17. ГОСТ Р 57160-2016. Конструкции деревянные. Методы циклических испытаний узлов с механическими: – Москва : Стандартинформ, 2016. – 8 с.

18. СП 64.13330-2017. Деревянные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-25-80. (с Изменениями № 1, 2). Стройиздат – 97 с.

19. ГОСТ 380-94 – Сталь углеродистая обыкновенного качества. введ. 01.01.1998. – М.: Изд-во стандартов, 1997 г., 8 с. – (Межгосударственный стандарт).

20. СТО 36554501-021-2010. Деревянные конструкции. Многослойный клееный из шпона материал Ultralam (Ультралам). Общие технические требования. М. : 2010. – 55 с.

21. Горожанкин С. А., Шитов А. А., Савенков Н. В. Методики для аппроксимации зависимостей нескольких переменных в программной среде MS Excel и MATHCAD // Моделирование вычислительных, телекоммуникационных, управляющих и социально-экономических систем. – 2016. – № 3. – С. 35–47.

УДК 694:624.9

Доу Жуовэй,

студент

(Санкт-Петербургский государственный

архитектурно-строительный

университет)

E-mail: 1808549875@qq.com

Dou Ruowei,

student

(Saint Petersburg

State University of Architecture

and Civil Engineering)

E-mail: 1808549875@qq.com

ДРЕВЕСНО-БЕТОННЫЕ КОМПОЗИТНЫЕ КОНСТРУКЦИИ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

WOOD-CONCRETE COMPOSITE STRUCTURES IN CONSTRUCTION

Древесно-бетонная гибридная конструкция в полной мере использует свойства материала дерева и бетона и имеет хорошую перспективу применения в зеленых зданиях и других областях благодаря своим характеристикам низкого энергопотребления, простоты строительства и возобновляемых источников энергии. Ей уделяется большое внимание, и ее конструкция может быть применена для жилых этажей, мостов и усиление деревянной конструкции. В этом документе обобщены характеристики и методы соединения древесно-бетонных конструкций, чтобы обеспечить справочную информацию для последующих исследований и инженерных применений древесно-бетонных конструкций.

Ключевые слова: дерево, бетон, смешанная конструкция, способ соединения.

The wood-concrete hybrid construction makes full use of the properties of the wood and concrete material and has a good prospect of application in green buildings and other areas due to its characteristics of low energy consumption, ease of construction and renewable energy sources. Much attention is paid to it, and its design can be applied to residential floors, bridges and reinforcement of wooden structures. This document summarizes the characteristics and methods of joining wood-concrete structures to provide background information for subsequent research and engineering applications of wood-concrete structures.

Keywords: wood, concrete, mixed construction, method of connection.

Введение

Будучи простым в обработке, сейсмостойким, легким, высокопрочным и возобновляемым материалом, древесина имеет широкий спектр применений в области строительства. С повышением осведомленности людей об охране окружающей среды и развитием технологий переработки в странах, богатых лесными ресурсами, доля деревянных конструкций в недавно построенных домах постепенно

увеличивается. Разработка инженерных материалов из древесины, включая: клееный ламинат (*GLT*), ламинат из шпона (*LVL*) и поперечно-ламинированную древесину (*cross-laminated CLT*), предоставляет больше возможностей для применения древесины в области архитектурного дизайна.

Деревянные конструкционные материалы отличаются легкостью, гибкостью, податливостью и разнообразием форм соединений узлов, стабильными механическими свойствами. Сочетание дерева и бетона может компенсировать некоторые недостатки другой стороны, в то же время в полной мере используя свои преимущества (рис. 1). Бетон, например, улучшает эксплуатационные характеристики здания с точки зрения несущей способности, шума и вибрации.

Преимущества дерево-бетонных композитных конструкций:

1. Собственный вес древесно-бетонной композитной конструкции меньше собственного веса железобетонной конструкции. Ее малый вес больше подходит для быстровозводимых зданий, что позволяет снизить транспортные расходы при строительстве здания и повысить эффективность сборки.

2. Поскольку сама древесина обладает хорошими сейсмическими характеристиками, а композитная конструкция для совместной работы древесины и бетона обладает лучшими сейсмическими характеристиками.

3. В компонентах изгиба жесткость чисто деревянной балки низкая, а несущая способность невелика, и жесткость ее несущей способности может быть улучшена после введения бетонной плиты, эффективно снизить вибрацию исходного пола или настила моста.

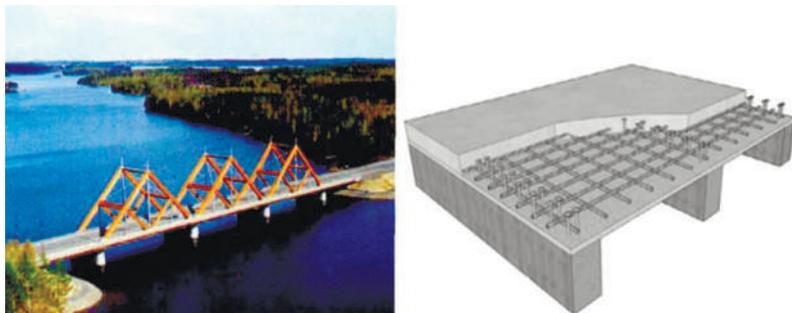


Рис. 1. Типичная древесно-бетонная композитная конструкция

Анализ формы срезного соединения и выбор древесно-бетонной конструкции

Древесно-бетонная композитная конструкция состоит из деревянных элементов, соединенных с бетонными плитами срезными соединениями. Типичная конфигурация древесно-бетонной композитной конструкции состоит из нижнего деревянного элемента (в основном подверженного растягивающим усилиям), верхнего слоя бетона и соединительной системы (в основном подверженной напряжению сдвига). Среди них древесина обладает хорошими свойствами при растяжении в направлении волокон. Способ соединения в основном делится на жесткое соединение и гибкое соединение. Гибкое соединение предназначено для соединения с бетоном путем добавления шурупов, дюбелей, посадочных брусков и других гвоздевых соединений с деревом: жесткое соединение – это форма соединения канавок и шурупов с деревом.

Соединение нагелем. Достаточно простое, усилие четкое, пластичность хорошая, но его жесткость при скольжении и несущая способность низкие (рис. 2). Распространенными причинами отказа, как правило, являются выход шурупов из строя и разрушение под давлением паза для штифта в древесине. Из-за низкой жесткости при скольжении, когда составные элементы балки соединены штифтами, они должны быть плотно расположены, чтобы обеспечить достаточную жесткость при изгибе и комбинированные характеристики. Наклон шурупов в древесину для образования диагонального резьбового соединения значительно увеличивает несущую способность и жесткость штифтовых соединений.

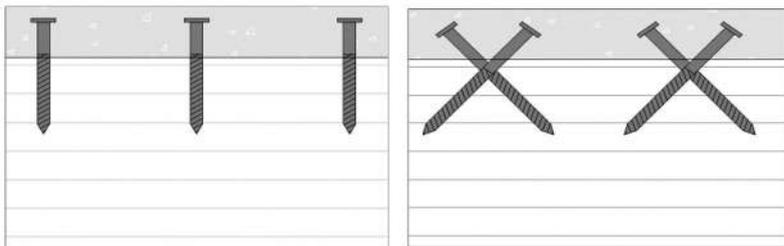


Рис. 2. Вертикальное и диагональное соединения гвоздей

Соединение врезного нагеля. Соединение паза и нагеля совместно используется открытым пазом и винтом для выдерживания усилия сдвига на стыке, а форма отверстия в основном делится на вертикальное отверстие и скошенное отверстие. Режим разрушения в основном заключается в разрушении дерева или бетона при сдвиге из-за плохой пластичности, скошенном открытом соединении шипа и гвоздя (рис. 3). В открытом соединении в основном треугольный шип и трапециевидный паз, такая жесткость соединения шипа и гвоздя немного хуже и легко проявляющееся выскальзывание бетонной врезки из деревянной выемки в элементах балки из древесно-бетонного композита. Это легко приводит к разделению деревянной балки и бетонной плиты, но его пластичность значительно улучшается.

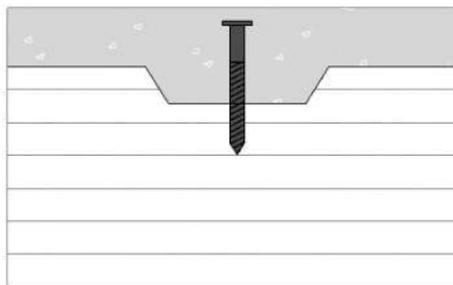


Рис. 3. Соединение паза и гвоздя

Соединение со стальной пластиной. Соединение посадочной пластины относится к прорезанию канавок в древесине, часть стальной пластины имплантируется в древесину через армирующую резину, а открытая часть стальной пластины заливается в бетонную плиту (рис. 4). Этот тип узла характеризуется высокой несущей способностью, высокой жесткостью, почти близкой к жесткому соединению, а его сопротивление сдвигу в основном зависит от характеристик клея и размера стальной пластины. При нормальных обстоятельствах пластичность хорошая, и если размер стальной пластины слишком велик, легко может произойти хрупкое разрушение древесины при сдвиге. При соединении стальных посадочных пластин посадочные пластины могут быть расположены по длине

балки, а также могут быть расположены с интервалами при условии соблюдения несущей способности.

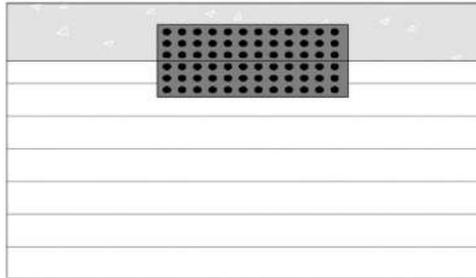


Рис. 4. Соединение имплантированной стальной пластины

Выбор способа подключения в основном рассматривается с двух точек зрения. С точки зрения строительства, операция соединения стальных стержней с гвоздями и болтами для соединения деталей относительно проста, и есть очевидные преимущества в скорости строительства. В 2014 году Skinner [1] и соавторы провели вводный тест на древесно-бетонной смеси с тонкой верхней поверхностью. В ходе теста рассматривалось влияние угла завинчивания, толщины верхней поверхности и плотности древесины на жесткость и прочность образца. Результаты испытаний показали, что угол завинчивания и толщина верхней поверхности оказывает большое влияние на жесткость соединения.

В 2019 году Цзин Чуанкуй [2] проанализировал влияние глубины и угла крепления болта и посадочной арматуры в древесину на несущую способность и жесткость образца, изучив соединение дерева с бетоном в виде болтового соединения и посадочной арматуры, и обнаружил, что несущая способность соединения посадочной планки была выше, чем у в комбинированной конструкции болтового соединения. Глубина заделки болта и посадочной арматуры в древесину была пропорциональна несущей способности на сдвиг, а механические свойства угла наклона были лучше, чем у вертикального крепления.

С точки зрения несущей способности и жесткости, щелевые и имплантированные стальные гвозди являются более надежным типом соединения.

Чтобы изучить влияние различных углов вырезов для вставки соединителя на несущую способность композитной конструкции, Djoubissic [3] в 2018 году провели испытание на выталкивание на трех типах древесно-бетонных выталкивающих образцов. Бетон и дерево были соединены стальными стержнями под разными углами и вставлены под разными углами выемки.

Результаты показывают, что отказ от использования только надрезного соединения является хрупким отказом. По сравнению с соединением только с арматурой форма выреза плюс арматура увеличит сопротивление арматуры, и эффект соединения будет лучше: сравнивая жесткость арматуры, вставленной в вырез под разными углами, обнаружено, что соединение, вставленное в вырез с углом наклона 120° , показывает более высокую жесткость, которая показана на рис. 5.

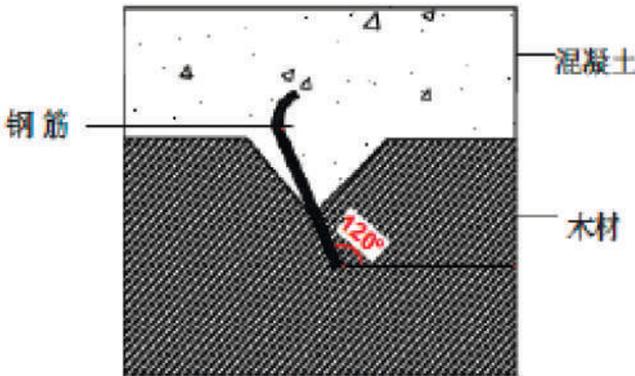


Рис. 5. Секция конструкции соединения «паз и арматурный стержень под углом 120° »

Ключевые моменты проектирования древесно-бетонных композитных компонентов

Метод проектирования древесно-бетонной композитной конструкции обычно относится к « γ -методу» в европейском стандарте EC5. Здесь γ – коэффициент, относящийся к жесткости поверхности раздела между деревом и бетоном: когда $\gamma = 1$, поверхность раздела не имеет скольжения и является полностью жесткой; когда

$\gamma = 0$, это эквивалентно отсутствию подключения к интерфейсу. Принципиальная схема напряжения в поперечном сечении древесно-бетонной смеси показана на рис. 6.

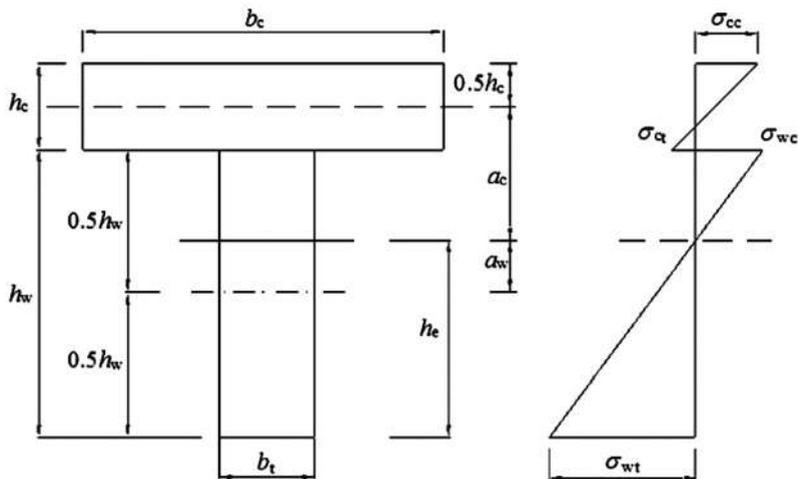


Рис. 6. Диаграмма поперечного сечения и усилия древесно-бетонной композитной конструкции

Согласно « γ -методу», эффективная жесткость композитных элементов при изгибе, осевая нагрузка и межфазное напряжение, а также прочность деревянных элементов и бетонных плит и предельная несущая способность композитных элементов могут быть определены соответственно.

Несущая способность древесно-бетонных композитных компонентов должна быть рассчитана в соответствии со следующими основными допущениями:

1. Соотношение сдвиг-скольжение на границе раздела принимается как линейная упругость, а при рассмотрении неупругой деформации, вызванной усадкой или изменениями температуры и влажности, соотношение сдвиг-скольжение на границе раздела принимается как упругопластическое;
2. Определяющей зависимостью древесины от напряжения и деформации является линейная эластичность;

3. Определяющей зависимостью между напряжением и деформацией сжатого бетона и бетона без трещин при растяжении является линейная упругость;

4. Вклад растяжимости бетона в несущую способность не учитывается.

Заключение

В этой статье кратко описываются преимущества древесно-бетонных композитных конструкций, методы соединения и конструкция компонентов. Еще многое предстоит сделать в исследовании древесно-бетонных композитных конструкций, и не только с точки зрения метода соединения, его долговременных характеристик, сейсмических характеристик, различных температур, влажности материалов и соединений гибридной конструкции.

Гибридная конструкция из дерева и бетона – это новый тип конструкции, который не только в полной мере использует превосходные характеристики прочности древесины на растяжение и бетона на сжатие, но также сочетает в себе характеристики экологически чистой и натуральной древесины, красивый внешний вид, в то время как бетон имеет высокую прочность и хорошую звукоизоляцию.

Гибридная конструкция применяется в строительстве плит перекрытия и мостов и имеет хорошие перспективы развития.

Литература

1. *Skinner J., Bregulla J., Hanis R., et al.* Screw connectors for thin topping timber-concrete composites [J]. *Materials and Structures*, 2014,47(11):1891-1899.
2. JING Chuankui. Study on mechanical properties of planting reinforcement connection of wood-concrete composite structure[D]. Dalian University of Technology, 2019.
3. *Djoubissie D. D., Messan A., Fournely E., et al.* Experimental study of the mechanical behavior of timber-concrete shear connections with threaded reinforcement bars[J]. *Engineering Structures*, 2018, 172(ОСТ.1):997-1010.

УДК 691.11

Павел Сергеевич Коваль,
доцент

Владимир Николаевич Елистратов,
доцент

Елизавета Сергеевна Ковалева,
магистрант

(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет)

Андрей Игоревич Куватов,
инженер

(ООО «Импульс»)

E-mail: pkoval@lan.spbgasu.ru,

evn.elistratov@gmail.com,

liza7379@mail.ru,

89219353503@mail.ru

Pavel Sergeevich Koval,
Associate Professor

Vladimir Nikolaevich Elistratov,
Associate Professor

Elisaveta Sergeevna Kovalyova,
Master's degree student

(Saint Petersburg State University
of Architecture and Civil Engineering)

Andrey Igorevich Kuvatov,
инженер

(LLC "Impuls")

E-mail: pkoval@lan.spbgasu.ru,

evn.elistratov@gmail.com,

liza7379@mail.ru,

89219353503@mail.ru

ВЛИЯНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ В ПРОИЗВОДСТВЕ ШПОНА НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА LVL-БРУСА

INFLUENCE OF ERRORS IN VENEER PRODUCTION ON THE PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF LVL-TIMBER

В рамках статьи обсуждаются возможные последствия погрешности в производстве бруса из клееного шпона (LVL-бруса) в виде полурадиальных слоев шпона. Рассматриваются возможные влияния на механические свойства бруса из клееного шпона, такие как прочность и устойчивость. В статье рассматриваются различные виды LVL-бруса в зависимости от направления волокон лущеного шпона и использования различных пород древесины при его изготовлении, а также потенциальные изменения их физико-механических характеристик под воздействием данной погрешности.

Ключевые слова: LVL, физико-механические свойства, погрешности в производстве, полурадиальные слои, анизотропия.

The article discusses the possible consequences of errors in the production of laminated veneer lumber (LVL-timber) in the form of semi-radial veneer layers. Possible influences on the mechanical properties of laminated veneer lumber, such as strength and stability, are considered. The article discusses various types of LVL-timber depending on the direction of the fibers of the peeled veneer and the use of various types

of wood in its manufacture, as well as potential changes in their physical and mechanical characteristics under the influence of this error.

Keywords: LVL, physical and mechanical properties, manufacturing errors, semi-radial layers, anisotropy.

Введение

LVL-брус (от *англ.* Laminated Veneer Lumber — «пиломатериал из слоеного шпона») — конструкционный материал, изготовленный по технологии склейки нескольких слоев лущеного шпона хвойных пород (сосна, ель, лиственница) толщиной порядка 3 мм. Является одним из видов клееных деревянных материалов. Волокна древесины смежных слоев располагаются преимущественно параллельно длине заготовки, что отличает *LVL* от фанеры.

Благодаря своей однородной структуре *LVL* обладает высокой прочностью при горизонтальной нагрузке. В силу чего основное применение бруса *LVL* — это несущие элементы каркаса.

Шпон — древесный материал, представляющий собой тонкие листы древесины толщиной от 0,1 до 10 мм.

По способу изготовления шпон подразделяется на следующие виды:

- лущеный шпон — шпон, получаемый лущением на специальных станках;
- строганый шпон — шпон, получаемый строганием брусков;
- пиленный шпон — шпон, получаемый пилением [1].

Изготовление лущеного шпона

Для получения *LVL*, используют круглые лесоматериалы. Бревна очищают от коры и проводят гидротермическую обработку в горячей воде приблизительно в течение суток. Эта процедура облегчает дальнейшую работу с деревом. Затем его раскраивают на чурки (длина заготовок соответствует ширине листа шпона), лущат — получают материал толщиной не более 3 мм.

Осуществляют центровку с помощью специального устройства относительно геометрического центра ствола в лущильном станке, зажимают чурак кулачками. При изготовлении лущеного шпона чураку придается вращательное движение, а ножу — поступательное движение (рис. 1).

Резание производится остро заточенным ножом при его поступательном движении. Толщина лущеного шпона определяется

толщиной срезаемого слоя за один оборот чурака и изменяется при изменении скорости подачи. Лущеный шпон выходит в виде непрерывной ленты.

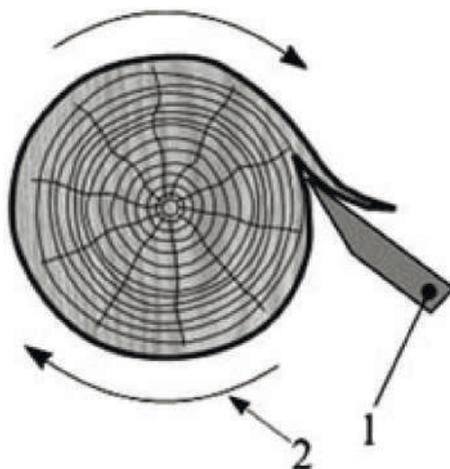


Рис. 1. Схема лущения: 1 – нож; 2 – прижимная линейка

Перемещение ножа происходит по спирали Архимеда (рис. 2) [2].

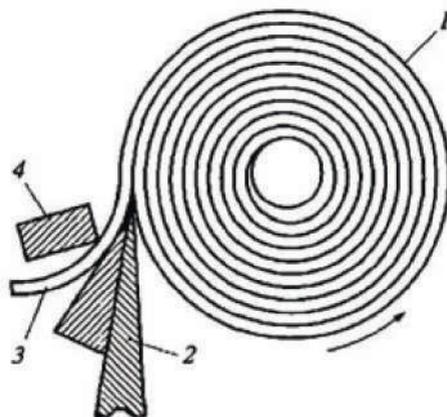


Рис. 2. Траектория движения ножа: 1 – чурак; 2 – нож; 3 – срезанный шпон; 4 – прижимная линейка

Так как перед лущением чураки обрабатывают в воде, шпон имеет повышенную влажность, поэтому после лущения производят операцию сортировки по начальной влажности, после чего рассортированные пакеты шпона поступают в сушильные камеры, настроенные на соответствующие диапазоны начальной влажности.

После сушки (конечная влажность шпона не более 8 %) шпон проходит проверку по плотности. Каждый лист шпона после сортировки попадает в карман определенной соответствующей плотности, которая будет учитываться при наборе пакета для склеивания. Выделены операции для подготовки кускового шпона. С целью получения листов шпона определенных геометрических размеров, выполняют ребросклеивание. При наборе пакета для склеивания, листы шпона располагают в зависимости от марки продукции. Некоторые виды формируют с отдельными слоями шпона, которые имеют взаимно перпендикулярное направление волокон. На слои шпона наносят фенолоформальдегидную смолу и пакет поступает в пресс. Готовый строительный материал раскраивают по размерам и маркируют. Может быть выполнена операция контроля прочности *LVL*. Схема изготовления представлена на рис. 3.

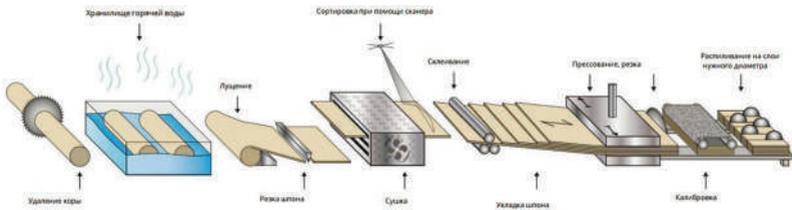


Рис. 3. Схема изготовления LVL-бруса

Погрешности при изготовлении лущеного шпона

Погрешности в производстве шпона могут оказывать влияние на физико-механические свойства *LVL*-бруса.

При изготовлении шпона в заводских условиях, чурак устанавливают на станок, исходя из геометрического центра ствола, чтобы достичь определенных параметров качества и желаемой толщины шпона. Однако, из-за неравномерности и эксцентricности ствола, смещения сердцевины в разных частях ствола, могут возникать

погрешности в производстве шпона. Недостаточное поступление влаги, направление и скорость ветра, продолжительность светового дня и другие факторы окружающей среды могут повлиять на физиологические процессы дерева и его рост. В результате производство имеет определенные погрешности.

Эталонный клееный брус из однонаправленного шпона должен состоять из параллельно расположенных слоев древесины. На производстве шпон разлущивают на станках, где центровка осуществляется по геометрическому центру ствола. Поэтому шпон, полученный из эксцентричных чураков, отличается внешне и по своим физико-механическим характеристикам (рис. 4).

Такие погрешности могут отразиться на физико-механических свойствах LVL-бруса, изготовленного из этого шпона. Например, неравномерности в структуре шпона могут привести к анизотропии в LVL-брусе, что в свою очередь может повлиять на его прочность и устойчивость в разных направлениях [2-3].

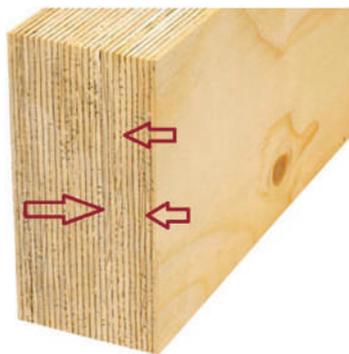


Рис. 4. LVL-брус с погрешностями в виде слоев шпона полурадиального распила

Анизотропия

Анизотропия (от др.-греч. *ἀνισος* – неравный и *τρόπος* – направление) – характеристика среды (материала), выражающаяся в зависимости ее физических свойств от направления (рис. 5).

Древесина является одним из наиболее распространенных и важных материалов, используемых в строительстве, мебельном

производстве и других отраслях. Ее анизотропные свойства могут оказывать существенное влияние на прочность, жесткость, устойчивость к изгибу и другие механические характеристики древесины. Под анизотропией древесины подразумевается неоднородность и направленность механических свойств материала в различных направлениях [4].

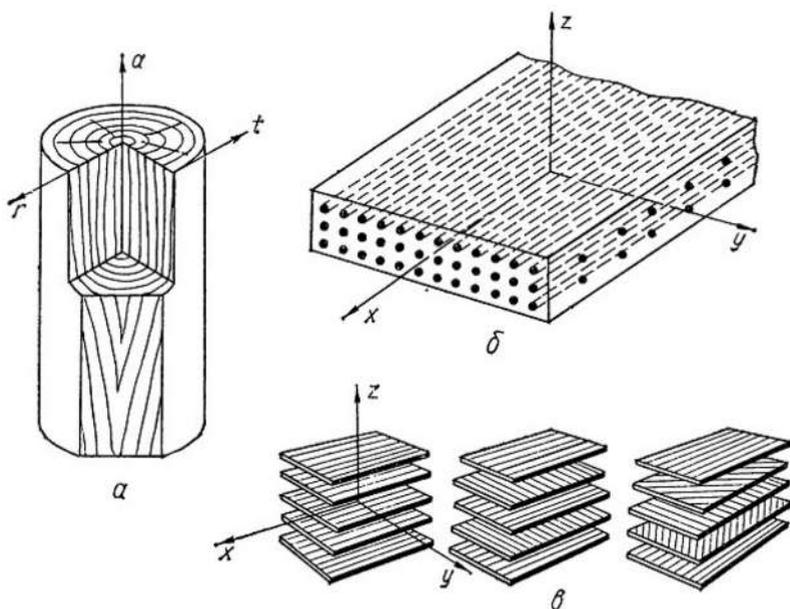


Рис. 5. Направления анизотропии механических свойств в древесине и конструкционных пластмассах: *a* – в древесине; *б* – в стеклопластиках; *в* – в древесно-слоистых материалах с различным расположением волокон в шпонах

Анизотропия древесины связана с ориентацией и структурой ее волокон. Волокна древесины, ориентированы преимущественно вдоль ствола дерева. Это создает различные механические свойства вдоль и поперек волокон. Вдоль волокон, или продольном направлении, древесина обладает высокой прочностью и жесткостью. Это связано с вытягивающими свойствами волокон, которые позволяют древесине выдерживать нагрузки вдоль своей длины. В поперечном

направлении, или направлении, перпендикулярном волокнам, древесина проявляет более низкую прочность и более высокую податливость. Это связано с ограниченными связями между волокнами в этом направлении. Однако древесина в естественном состоянии имеет неориентированную структуру, где направление волокон может значительно варьировать. В свою очередь *LVL*-брус создается путем склеивания и компрессии тонких слоев древесины (шпона). *LVL*-брус обладает более предсказуемыми и однородными механическими свойствами в сравнении с естественной древесиной. Это обеспечивается контролируемым процессом производства, который позволяет достичь более равномерной структуры и свойств во всем материале. В поперечном направлении, древесина обычно проявляет более низкую прочность и податливость из-за ограниченных связей между волокнами в этом направлении. *LVL*-брус, благодаря ориентации слоев, может иметь более равномерные поперечные свойства [5-6].

Ортотропия – частный случай анизотропии, при котором наблюдается неодинаковость физических (физико-химических) свойств среды по двум (трем) взаимно перпендикулярным направлениям.

Для инженерных целей *LVL* рассматривают как ортотропный материал, что означает, что свойства материала варьируются в зависимости от ориентации волокон.

Для *LVL* назначают три четко определенных направления материала, так как отсутствует влияние годовых колец. Они показаны на рис. 6: (1) продольное – параллельно волокнам; (2) тангенциальное – перпендикулярно волокнам и параллельно слоям шпона; и (3) радиальное – перпендикулярно волокнам и перпендикулярно слоям шпона.

Преимуществом *LVL*, изготовленного из однонаправленного лущеного шпона, является равномерное распределение дефектов в теле бруса, что делает свойства материала относительно однородными [7, 9].

В действительности физико-механические свойства каждого бруса могут отличаться в зависимости от полученных слоев на производстве. Каждый слой имеет свои физико-механические свойства в зависимости от траектории формирования шпона в чурাকে.

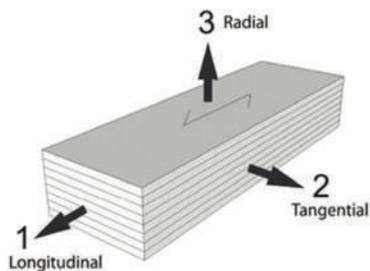


Рис. 6. Направления ортотропии LVL

Погрешности шпона, полученного из эксцентричных чураков, могут привести к уменьшению предсказуемости и стабильности свойств *LVL*-бруса [8]. Также такие слои могут вносить дополнительную неоднородность в структуру *LVL*-бруса. Это может привести к неравномерному распределению напряжений и деформаций внутри материала, особенно при механическом нагружении. В результате могут возникать потенциальные слабые места или повышенные напряжения в областях со слоями, полученными из эксцентричных чураков, что может повлиять на прочность и долговечность бруса, снизить его устойчивость.

Механические свойства бруса из клееного шпона (*LVL*)

При рассмотрении механических свойств *LVL* (бруса из клееного шпона) обычно применяются допущения теории упругости анизотропного тела. Это позволяет упростить анализ и представить *LVL* в виде сплошной среды с линейными связями между напряжениями и деформациями. Однако, действительное поведение *LVL* может быть более сложным и не всегда соответствовать полностью допущениям теории упругости [8]. Например, нелинейные эффекты, такие как нелинейная деформация или разрушение, могут проявляться при достижении предельных нагрузок или взаимодействии с другими факторами, такими как влажность, температура или скорость нагружения. Также, слои из эксцентричных чураков могут приводить к неравномерному распределению механических свойств в *LVL*-брусе. Например, прочностные характеристики и модуль упругости могут различаться в зависимости от положения таких слоев, что может создавать неоднородность в материале.

Виды бруса из клееного шпона (*LVL*)

LVL (Laminated Veneer Lumber) может иметь различные виды в зависимости от направления слоев шпона и используемых пород древесины.

Виды *LVL* в зависимости от направления слоев шпона:

1) Однонаправленный *LVL* (Parallel Strand *LVL*)

В однонаправленном *LVL* слои древесины ориентированы параллельно друг другу. Это создает материал с высокой прочностью и жесткостью вдоль направления слоев. Однонаправленный *LVL* обычно используется в конструкциях с длинными пролетами, где требуется высокая прочность и жесткость в продольном направлении.

2) Поперечно-клееный *LVL* (Cross-Laminated *LVL*)

В поперечно-клееном *LVL* слои древесины перекрещиваются под углом (обычно 90 градусов) и склеиваются вместе. Это создает материал с равномерным распределением древесных волокон в разных направлениях, обеспечивая высокую прочность и устойчивость к деформациям как в продольном, так и в поперечном направлениях. Поперечно-клееный *LVL* широко используется для создания конструктивных элементов, таких как балки, фермы, колонны и т.д.

3) Комбинированный *LVL* (Mixed-Direction *LVL*).

Комбинированный *LVL* содержит слои древесины, ориентированные как параллельно, так и поперек слоям. Это позволяет сочетать преимущества однонаправленного и поперечно-клееного *LVL*, предоставляя усиленную прочность и стабильность в разных направлениях. Комбинированный *LVL* может быть использован в различных конструкциях, где требуется компромисс между прочностью и устойчивостью в разных направлениях.

Следует отметить, что в каждом из этих видов *LVL* может находиться определенный процент полурадиальных слоев шпона, что может изменять механические свойства как в лучшую, так и в худшую сторону [10-11].

Некоторые виды пород древесины для производства *LVL*-брус:

1) Сосна

Сосна является хвойной породой древесины, которая широко используется в производстве *LVL*-бруса. Она обладает хорошей прочностью, стабильностью и долговечностью, что делает ее подходящей для различных конструкций.

2) Ель

Ель также является хвойной породой древесины, которая может использоваться в производстве *LVL*. Она отличается высокой прочностью и устойчивостью к деформациям, что позволяет создавать прочные и стабильные конструкции.

3) Береза

Береза является лиственной породой древесины, которая также может быть использована для производства *LVL*-бруса. Березовый *LVL* обладает хорошей стабильностью и эстетическим видом, и его можно использовать в различных внутренних и наружных приложениях.

4) Дуб

Дуб является прочной и твердой лиственной породой древесины, которая может быть использована для производства *LVL*. Дубовый *LVL* обладает высокой прочностью и устойчивостью к внешним воздействиям, и его часто применяют в требовательных конструкциях.

Это лишь некоторые примеры пород древесины, используемых в *LVL*. Конкретный выбор породы зависит от требований проекта, включая желаемые механические свойства, внешний вид, доступность и ценовые ограничения [10-11].

Брус из клееного шпона (*LVL*), изготовленный из лиственных и хвойных пород древесины

Характеристики *LVL* меняются в зависимости от таких факторов, как порода древесины и тип клея, способ соединения слоев и способ получения, организация слоев, давление и время прессования. При этом изменяются и значения физико-механических и технологических характеристик, определяющих работоспособность материала.

LVL из хвойных пород древесины обычно обладает более высокой прочностью на изгиб по сравнению с *LVL* из лиственных пород. Хвойные породы, такие как сосна или ель, обычно имеют более высокую плотность и прочность волокон, что способствует повышению прочности на изгиб.

LVL из хвойных пород также обычно имеет более высокую прочность на сжатие по сравнению с *LVL* из лиственных пород. Это связано с более плотной структурой древесины хвойных пород, что обеспечивает лучшую сопротивляемость сжатию.

LVL из лиственных пород древесины может иметь некоторое преимущество в прочности на растяжение. Лиственные породы, такие как береза или дуб, обычно обладают более высокой прочностью волокон, что способствует повышению прочности на растяжение.

Также *LVL* из хвойных пород обычно дороже, чем *LVL* из лиственных пород древесины.

LVL-брус, изготовленный из лиственных и хвойных пород древесины, имеет свои особенности, которые могут влиять на его свойства и применение. Производство конструкционных изделий, таких как изделия на основе шпона, путем смешивания лиственных и хвойных пород может привести к получению привлекательных изделий, которые максимально используют преимущества и устраняют недостатки двух ресурсов, т.е. более низкую стоимость за счет уменьшения используемого материала и оптимальные физико-механические характеристики.

Заключение

На физико-механические свойства *LVL*-бруса влияют множество факторов, например, направление слоев шпона или порода древесины. Исходя из этого, можно предположить, что возникновение погрешностей при производстве бруса в виде слоев, полученных из эксцентричных чураков, может значительно изменять его механические характеристики.

Однако, следует отметить, что на данном этапе исследования сложно оценить реальную значимость воздействия таких погрешностей производства на расчет, проектирование, монтаж и эксплуатацию строительных конструкций из *LVL*.

Для более точной оценки влияния слоев, полученных из эксцентричных чураков, на свойства *LVL* требуется проведение дополнительных исследований и анализов. Это может включать численные моделирования, экспериментальные испытания и сравнительный анализ с оригинальным *LVL* без погрешностей. Такие исследования помогут более точно оценить влияние погрешности на механические свойства и принять соответствующие корректирующие меры при проектировании и использовании *LVL*.

Литература

1. *Широкий Г. Т., Юхневский П. И., М. Г.* Бортницкая Строительное материаловедение, под ред. Э. И. Ботяновский, 2017.
2. *Зимин С. С.* Строительные материалы и конструкции. Каменные материалы и конструкции: учеб. Пособие / С.С. Зимин, Л. И. Чумадова – СПб. : Изд-во Политехн. Ун-та, 2013.–111 с.
3. *Токарева Т. В.* Технология производства LVL // Производство. 2009. С. 6–9.
4. *Прохоров А. М., Бонч-Бруевич А. М, Балдин А. М.* Физическая энциклопедия // под ред. Прохорова А. М. – М.: Советская энциклопедия, 1988. – С. 83.
5. *Пардаев А. С.* Расчетные схемы механической анизотропии древесины и их применение в САЕ-системах // Труды БГТУ. № 2. Лесная и деревообрабатывающая промышленность. 2011. С. 161.
6. *Бызов В. Е., Рыжов В. В.* Анизотропия древесины и ее влияние на прочность узловых соединений ферм из клееных элементов // Молодой ученый. 2020. № 52.– С. 101–103.
7. *Брытков Е. В.* Механика композиционных материалов: учебное Пособие / Е. В. Брытков, В. А. Санников; Балт. гос. техн. ун-т. – СПб., 2012. 74 с.
8. *Данилов Е. В.* Развитие методов расчета соединений деревянных конструкций из однонаправленного клееного бруса с когтевыми шайбами: Автореф. дисс. канд. техн. наук: 05.23.01 – Санкт-Петербург, 2019. 50 с.
9. *Ашкенази Е. К.* Анизотропия конструкционных материалов: Справочник / Е. К. Ашкенази, Э. В. Ганов – Л., Машиностроение: Ленингр. отд-ние, 1980.– 247 с.
10. Wainwright, Timber as a Structural Material // Structural Timber Design to Eurocode 5. 2019. URL. <https://pdfslide.us/documents/structural-timber-design-to-eurocode-5.html?page=1> (дата обращения 18.04.2023).
11. *Ashby M. F., Jones D. R.* Engineering Materials 1: An Introduction to Properties, Applications and Design. URL. [http://nozdr.ru/data/media/biblio/kolx-oz/E/EM/Ashby%20M.F.,%20Jones%20D.R.H.%20Engineering%20materials%201%20\(3ed.,%20ВН,%202005\)\(ISBN%200750663804\)\(O\)\(439s\)_EM_.pdf](http://nozdr.ru/data/media/biblio/kolx-oz/E/EM/Ashby%20M.F.,%20Jones%20D.R.H.%20Engineering%20materials%201%20(3ed.,%20ВН,%202005)(ISBN%200750663804)(O)(439s)_EM_.pdf) (дата обращения 18.04.2023).

УДК 691.11

Екатерина Александровна Фурман,
исполнительный директор
(ООО «Большепролет»)
Яна Евгеньевна Симонова,
студент
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный
университет)
E-mail: e.furman@bolsheprolet.ru,
ysimon0wa@yandex.ru

Ekaterina Aleksandrovna Furman,
Executive Director
(LLC “Bolsheprolet”)
Yana Evgenyevna Simonova,
student
(Saint Petersburg
State University of Architecture
and Civil Engineering)
E-mail: e.furman@bolsheprolet.ru,
ysimon0wa@yandex.ru

СТРОИТЕЛЬСТВО СКЛАДОВ ХРАНЕНИЯ УГЛЯ И МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ БОЛЬШЕПРОЛЕТНЫХ КЛЕЕНЫХ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

THE BUILDING OF CARBON AND MINERAL FERTILIZERS STORAGE WAREHOUSES WITH LONGSPAN LAMINATED WOOD STRUCTURES

Большепролетные конструкции из клееной древесины (БКДК) активно используются для строительства складских комплексов хранения угля, фосфорно-калийных удобрений и т. п. Применение в качестве несущих элементов каркаса именно клееных деревянных конструкций обусловлено их исключительными свойствами. Однако не стоит забывать о возможности использования и других материалов, которые могут также оказаться эффективными. С целью выбора наиболее рационального варианта строительства склада хранения угля в г. Усть-Луге проведен сравнительный анализ двух конструктивных решений: строительство из железобетонных конструкций и из БКДК. По результатам анализа установлено: второй вариант следует признать наиболее целесообразным.

Ключевые слова: сыпучие материалы, уголь, клееные деревянные конструкции, железобетонные конструкции, сравнительный анализ.

Longspan laminated wood structures are widely used when we talk about building warehouses to store coal, phosphate-potassium fertilizers etc. Especially laminated wood structures are being used to construct a load-bearing frame because of a big amount of their advantages. However we can also use another materials and it may be more effective. The comparative analysis was carried out to determine the most rational variant how to build the coal storage warehouse in Ust-Luga. There was a comparison of different structural concepts: building with the usage of reinforced con-

crete and longspan laminated wood structures. The analysis showed that the second is the most suitable variant.

Keywords: bulk materials, coal, laminated wood structures, reinforced concrete structures, comparative analysis.

Известно, что клееная древесина является материалом, широко применяемым при строительстве складских комплексов, в т. ч. для хранения угля, рудных материалов, фосфорно-калийных удобрений, калиевых солей, противогололедных химреагентов и т. п. Древесина и клееные материалы на ее основе обладают целым рядом исключительных свойств: это легкий в обработке материал, обладающий малым удельным весом, что уменьшает расходы при транспортировке и монтаже. Деревянные конструкции изготавливают из местных материалов, т. е. с использованием природных ресурсов, и отходов других отраслей, что также обуславливает их невысокую стоимость. [1, с. 11] Для зданий из древесины ниже и эксплуатационные расходы – материал практически не подвержен коррозии, именно поэтому большепролетные клееные деревянные конструкции (БКДК) активно используются при возведении зданий и сооружений в условиях агрессивных сред. Продолжая размышления об экономической составляющей, следует отметить, что возведение зданий с применением клееных деревянных конструкций сокращает сроки строительства на 20–30 %, трудоемкость – на 45–50 %, и также расход металла уменьшается в 2–3 раза по сравнению с альтернативным строительством из сборного железобетона. [2, с. 6]

Как отмечается в [3], ценные свойства древесины определяют области ее использования. Благодаря невысокой плотности древесины при сравнительно большой прочности и жесткости (вдоль волокон) целесообразно применять ее в конструкциях покрытий общественных, промышленных и сельскохозяйственных зданий, тогда наиболее полно будут использованы лучшие конструкционные свойства этого материала и возможности конструктивной защиты от гниения.

Склеивание раскрыло огромные резервы формообразования конструкций как по очертанию, так и по геометрическим характеристикам поперечных сечений. Возросли возможности использования ресурса прочности природного материала, а следовательно,

и размеры перекрываемых свободных пролетов. Все это, естественно, требует изменения воззрений на принципы конструирования и расчета КДК. Применение несущих и ограждающих конструкций с использованием клееной древесины и новых листовых материалов на ее основе, а также пластмасс, является одним из путей экономии цемента и металлов, необходимых для конструкций в тех сооружениях, где они незаменимы. И наоборот, имеются области строительства, где наиболее эффективными являются конструкции из дерева и пластмасс, например, в радиопрозрачных зданиях, в химически агрессивных средах и т. д. Как указано в [4], научно обоснованная техническая направленность строительства должна базироваться на сочетании конструкций из различных материалов в соответствии с рациональным использованием положительных свойств каждого из них.

Суть исследования состоит в выборе наилучшего конструктивного решения для строительства склада хранения сыпучего угля в г. Усть-Луге Ленинградской области, исходя из таких параметров как агрегатное состояние и объем складироваемых материалов, способы хранения, загрузки и выгрузки, а также конфигурация в плане.

Для требуемых параметров наиболее подходящим конструктивным решением является строительство из БКДК с одним свободным пролетом 40–60 м между опорами, треугольных или стрельчатого очертания в поперечнике и длиной 400–600 м на плоских горизонтальных участках. К конструктивным достоинствам КДК как материала для возведения складов сыпучих материалов можно отнести высокую огнестойкость, долговечность в условиях агрессивных вредных выделений и высокую скорость строительства. Однако имеются у таких конструкций и недостатки, а именно поверхностная повреждаемость и повышенные требования к устранению очагов увлажнения.

Мировой опыт показывает, что под вышеуказанные значения параметров подходят конструктивные решения арочного типа из:

- металлических (стальных) конструкций сплошного/сквозного сечения;
- железобетонных конструкций сплошного/сквозного сечения;
- клееных деревянных конструкций сплошного сечения.

Ввиду потенциального наличия разных вариантов решения складов на базе СПбГАСУ было проведено сравнительное аналитическое исследование, в котором рассматривалось два варианта строительства склада: из железобетона и из клееных деревянных конструкций, с целью сопоставить характеристики этих двух материалов и оценить целесообразность выбора КДК для данного случая.

Методом исследования являлся сравнительный анализ стоимостных и технических показателей двух вышеупомянутых вариантов решения каркасов большепролетных складов сыпучих материалов. Сравнение приведено в таблице.

**Сравнительный анализ стоимостных и технических показателей
двух вариантов решения каркасов большепролетных складов
сыпучих материалов**

№ п/п	Наименование показателя	ЖБК	КДК
1	Средний расход стали, т/м ²	0,02-0,015	0,003-0,006
2	Средний расход пиломатериалов, м ³ /м ² (площади пола)	-	0,12-0,19
3	Средний предел огнестойкости (без огнезащиты), ч	1,3-1,7	1,8-2,1
4	Стоимость огнезащиты (при пределе огнестойкости – 2,0 час), у. е.	2,0-3,5	1,0
5	Монтажный вес конструкции (на 1 кв. м площади пола), кг	350-450	65-95
6	Стоимость 1 кв. м площади пола, тыс. руб.	12-15	6-10
7	Срок службы в агрессивных средах, лет	2-3	более 60

Исследование показало, что применение железобетонных конструкций арочного типа, несмотря на их высокую огнестойкость, в сравнении с применением клееных деревянных конструкций того же типа, можно признать нецелесообразным в силу большого

монтажного веса и повышенной стоимости на 1 кв. м. склада. Также следует отметить, что при больших пролетах железобетон становится выгодным материалом только при применении его в пространственных тонкостенных оболочках, использование которых имеет свою сложную специфику. Более целесообразным для строительства склада хранения угля следует признать применение БКДК. Отечественный и зарубежный опыт использования таких конструкций в складах сыпучих материалов (в т. ч. в химически агрессивных средах минеральных удобрений) также доказывает их высокую эффективность.

Литература

1. Возведение зданий из деревянных конструкций: учеб. пособие / Д. А. Животов, В. В. Латуга, Л. Г. Ворона-Сливинская; СПбГАСУ. – СПб., 2020 г. – 160 с.
2. Арочные и рамные конструкции из цельной и клееной древесины: учебное пособие / П. А. Дмитриев, В. И. Жаданов; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург : ОГУ, 2014. – 170 с.
3. Деревянное домостроение. Архитектура. Конструкции. Расчет: учеб. пособие / А. Г. Черных и др.; под общ. ред. д-ра техн. наук, профессора, академика РАЕН А. Г. Черных; СПбГАСУ. – СПб., 2011 г. – 312 с.
4. Серов Е. Н., Санников Ю. Д., Серов А. Е. Проектирование деревянных конструкций. Учебное пособие. 2011 г. – 536 с.

УДК 692.48

Алла Николаевна Торопцева,
студент
Максим Юрьевич Томченко,
студент
Никита Константинович Посторонко,
студент
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный
университет)
E-mail: allatoropceva13@gmail.com,
ak1234567234@gmail.com,
nikita.postoronko@yandex.ru

Alla Nikolaevna Toropseva,
student
Maksim Yuryevich Tomchenko,
student
Nikita Konstantinovich Postoronko,
student
(Saint Petersburg
State University of Architecture
and Civil Engineering)
E-mail: allatoropceva13@gmail.com,
ak1234567234@gmail.com,
nikita.postoronko@yandex.ru

АНАЛИЗ НДС СОСТАВНОЙ ДВУТАВРОВОЙ БАЛКИ

VAT ANALYSIS OF COMPOSITE I-BEAM

В данной работе произведен расчет двутавровой составной балки со стенкой из ОСП и поясами из LVL бруса в программном комплексе SCAD. Учтено влияние расположения стыка ОСП по длине в стенке балки. Выявлены зоны максимальных напряжений и характер разрушения балки. Указаны места концентрации напряжений. Расчетная схема – однопролетная шарнирно-опертая балка. Создание моделей балок производилось при помощи пластинчатых четырехузловых конечных элементов типа КЭ-44 с постоянными (одинаковыми) во всех направлениях параметрами упругости. К верхнему поясу каждой модели прикладывалась равномерно распределенная нагрузка на двух площадках.

Ключевые слова: составная балка, балка с ОСП-стенкой, деревянная балка, деревянные конструкции, LVL брус.

In this work, an I-beam composite beam with a wall made of OSB and belts made of LVL timber in the SCAD software package was calculated. The influence of the location of the OSB joint along the length in the beam wall is taken into account. The zones of maximum stresses and the nature of the beam destruction are revealed. The places of stress concentration are indicated. The design scheme is a single-span articulated beam. The creation of beam models was carried out using four-node plate finite elements of the KE-44 type with constant (identical) elasticity parameters in all directions. An evenly distributed load was applied to the upper belt of each model on two platforms.

Keywords: composite beam, beam with OSB-wall, wooden beam, wooden structures, LVL beam.

Введение

Во многих странах мира имеет большое распространение каркасное строительство. Элементы для таких домов производятся заранее на заводе или же могут быть произведены на строительной площадке, не задействуя мокрых процессов. Использование составных конструкций позволяет снизить материалоемкость сооружения. К таким конструкциям относятся двутавровые балки со стенкой из ОСП и *LVL*-поясами.

Проводимые исследования за рубежом [1-7] и в России [8-10] направлены на изучение составных балок со стенкой из ОСП путем экспериментальных исследований и моделирования в программных комплексах. На качество и несущую способность влияет множество факторов:

- отсутствие требований к качеству клеевого соединения стенки с полкой;
- отсутствие стандартной схемы сборки балок, учитывающей оптимальное расположение стыка плит ОСП по длине конструкции;
- методика расчета не учитывает свойства определенных конструкций;
- клеевое соединение считается монолитным, при расчете не используется учет податливости.

В данной работе произведен расчет двутавровой балки с поясами из *LVL* и стенкой из ОСП с помощью программного комплекса *SCAD*. В модели учтено разное расположение стыка по длине и его влияние на несущую способность конструкции

Цель работы: определения НДС составной двутавровой балки со стенкой из ОСП, определение влияния расположения стыка в ОСП по длине.

Моделирование работы балки на изгиб

В программном комплексе *SCAD* были созданы конечно-элементные модели балок с различным расположением стыка ОСП в стенке по длине для оценки НДС.

Все модели балок имеют одинаковые пролеты – 3 м, высоту балки – 290 мм, толщину стенки – 0,8 мм, а также сечение поясов из *LVL* 40(*h*)×63 мм. Расчетная схема – однопролетная шарнирно-опертая балка.

Расположение стыка в балках находилось:

- по середине (около 1500 мм);
- в месте приложения нагрузки (около 900 мм);
- смещенный к краю балки (около 300 мм).

Создание моделей балок производилось при помощи пластинчатых четырехузловых конечных элементов типа КЭ-44 с постоянными (одинаковыми) во всех направлениях параметрами упругости. Стенка принята из ОСП с модулем упругости $E = 3800$ МПа и коэффициентом Пуассона $\nu = 0,3$. Верхний и нижний пояса балки приняты из *LVL* с модулем упругости $E = 14\ 000$ МПа и коэффициентом Пуассона $\nu = 0,45$.

К верхнему поясу каждой модели прикладывалась равномерно распределенная нагрузка на двух площадках (площадь каждой 24 см²).

Значения перемещений по оси *Z* представлены в табл. 1. Предельные вертикальные прогибы в соответствии с СП 20.13330.2016 Нагрузки и воздействия составляют $1/150$ для балки пролетом 3 м $f_u < 3000/150=20$ мм.

Таблица 1

Значения перемещений в середине пролета

Нагрузка, кН	Перемещения, мм Балка 1 (стык 900 мм)	Перемещения, мм Балка 2 (стык 1500 мм)	Перемещения, мм Балка 3 (стык 300 мм)	Перемещения, мм Балка 4 (без стыка)
3	0,99	0,97	0,99	1,97
6	1,98	1,94	1,98	3,8
9	2,97	2,91	2,98	5,99
12	3,96	3,88	3,97	8,6
15	4,95	4,86	4,96	11,56
18	5,94	5,83	5,9	13,14
21	6,93	6,8	6,94	14,99
24	7,92	7,77	7,93	14,99
27	8,91	8,74	8,93	21,55

Проверка прочности стенки по нормальным напряжениям

$$\sigma < R_p^{ОСП} = 9,4 \text{ МПа}$$

Проверка прочности стенки на срез (вблизи опоры)

$$\tau < R_{ср}^{ОСП} = 6,8 \text{ МПа}$$

Проверка прочности сжатого пояса:

$$\sigma < R_c = 13 \text{ МПа}$$

Проверка прочности растянутого пояса:

$$\sigma < R_p = 7 \text{ МПа}$$

За несущую способность приняты значения нагрузки до перехода значений за допустимые.

Результаты расчета для балки 1, с расположением стыка на расстоянии 900 мм от опоры на рис. 1– 3.

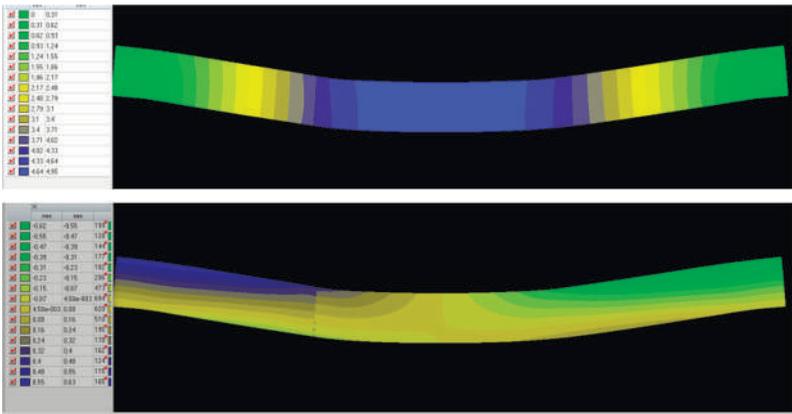


Рис. 1. Балка 1. Суммарное перемещение и перемещение по X при нагрузке 15 кН

Таблица 2

Значения максимальных напряжений до исчерпания несущей способности

	Балка 1 (стык 900 мм)	Балка 2 (стык 1500 мм)	Балка 3 (стык 300 мм)	Балка 4 (без стыка)
Наибольшее напряжение	–	–	–	–7 471,98 в месте опирания (18 кН)
Прочность стенки по нормальным напряжениям	–6 493,54 кН/м ² в приопорной зоне стенки (24 кН)	–5 973,25 кН/м ² в приопорной зоне стенки (27 кН)	6 284,86 кН/м ² в зоне стыка (21 кН)	6 467,42 кН/м ² в приопорной зоне стенки (21 кН)
Проверка прочности сжатого пояса	–11 065,17 кН/м ² в середине пролета (18 кН)	–8 992,25 кН/м ² в середине пролета (15 кН)	–12 959,66 кН/м ² в середине пролета (18 кН)	14 427,48 кН/м ² в месте приложения нагрузки (27 кН)
Проверка прочности растянутого пояса	–6 632,68 кН/м ² в месте опирания (15 кН)	–8 025,52 кН/м ² в месте опирания (18 кН)	–5 813,04 кН/м ² в месте опирания (12 кН)	7 430,55 кН/м ² в нижнем поясе в месте приложения нагрузки (18 кН)
Вывод	Несущая способность 15 кН	Несущая способность 15 кН	Несущая способность 12 кН	Несущая способность 18 кН

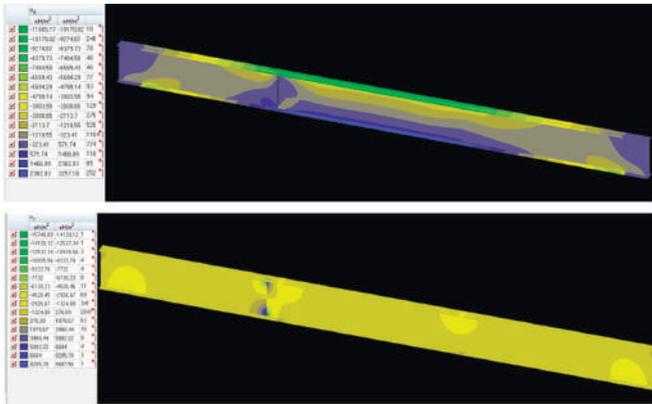


Рис. 2. Балка 1. Нормальные напряжения по осям X и Y (σ_x, σ_y)



Рис. 3. Балка 1. Касательные напряжения τ_{xy}

Результаты расчета для балки 2, с расположением стыка на расстоянии 1500 мм от опоры (по середине пролета) на рис. 4–6.

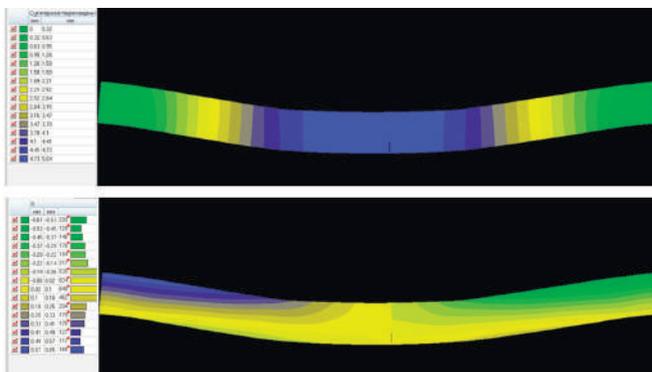


Рис. 4. Балка 2. Суммарное перемещение и перемещение по X при нагрузке 15 кН

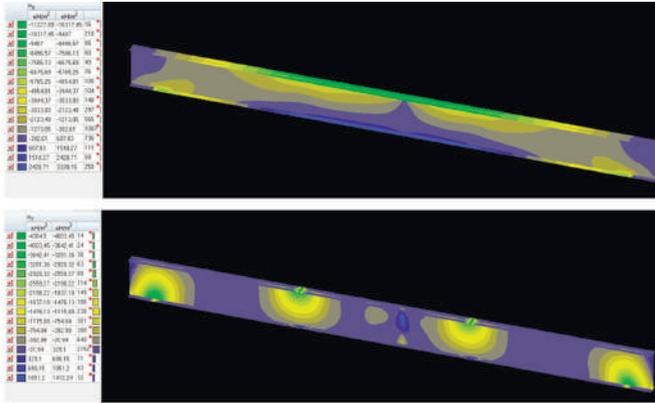


Рис. 5. Балка 2. Нормальные напряжения по осям X и Y (σ_x, σ_y)



Рис. 6. Балка 2. Касательные напряжения τ_{xy}

Результаты расчета для балки 3, с расположением стыка на расстоянии 300 мм от опоры на рис. 7–9, балки 4 на рис. 10–12.

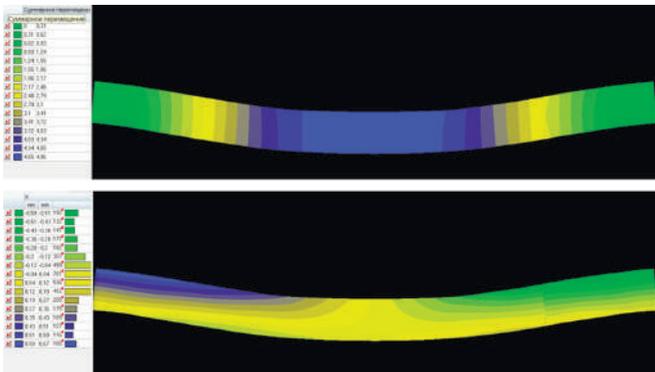


Рис. 7. Балка 3. Суммарное перемещение и перемещение по X при нагрузке 15 кН

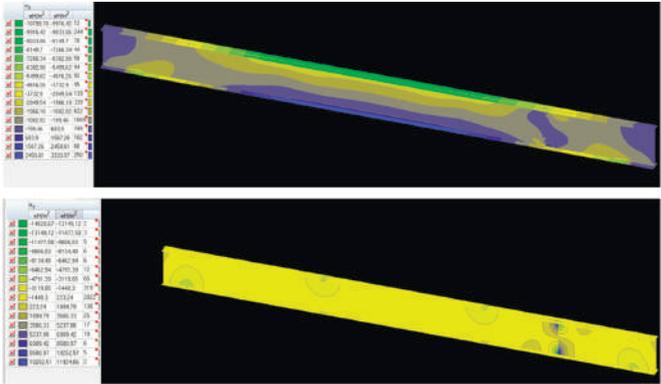


Рис. 8. Балка 3. Нормальные напряжения по осям X и Y (σ_x , σ_y)



Рис. 9. Балка 3. Касательные напряжения τ_{xy}

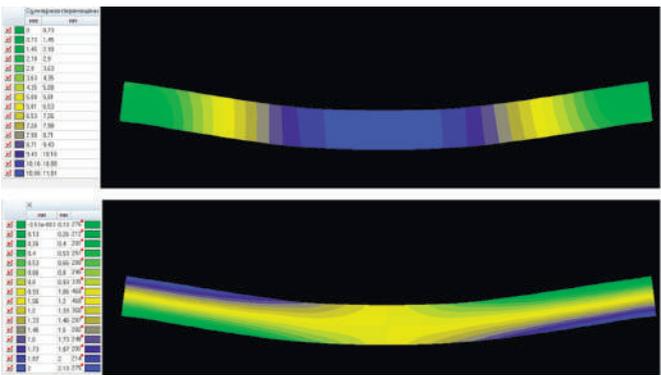


Рис. 10. Балка 4. Суммарное перемещение и перемещение по X при нагрузке 15 кН

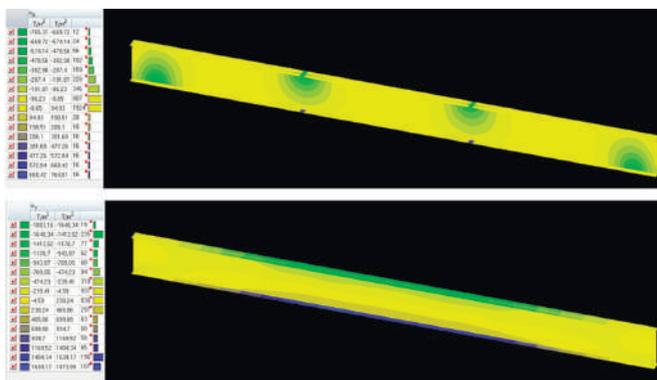


Рис. 11. Балка 4. Нормальные напряжения по осям X и Y (σ_x, σ_y)



Рис. 12. Балка 4. Касательные напряжения τ_{xy}

Выводы

Стык ОСП по длине стенки вызывает локальные концентрации напряжений, что снижает несущую способность всей балки. Касательные напряжения в приопорной зоне возрастают и концентрируются в зоне стыка, что приводит к разрушению балки по шву. Происходит сдвиг стенки относительно поясов. Так же наблюдается значительная концентрация нормальных напряжений по оси Y в зоне стыков, что приводит к смятию ОСП стенки. В местах приложения нагрузки и приопорных зонах следует устанавливать ребра жесткости. Также в данной модели не учтена возможная податливость соединения стенки и поясов, в которых будет наблюдаться сдвиг, при некачественном клеевом соединении.

Несущая способность балки без стыка была больше, чем у балок со стыком по длине стенки. Наименьшей несущей способностью (12 кН) обладала балка со стыком, расположенным в приопорной

зоне. При расположении стыка по середине пролета или в зоне приложения нагрузок несущая способность не изменялась.

Возможные способы разрушения двутавровой балки с ОСП-стенкой и поясами из *LVL*:

1. разрыв верхнего пояса от действия нормальных напряжений,
2. сдвиг ОСП- стенок от действия касательных напряжений,
3. местное смятие ОСП-стенки от действия нормальных напряжений.

Литература

1. *Zhu E. C., Guan Z.W., Rodd P. D., Pope D. J.* Finite element modelling of OSB webbed timber I-beams with interactions between openings // *Advances in Engineering Software* 36, 2005.
2. *M. Shahnewaz, M. Shahidul Islam, Thomas Tannert, M. Shahria Alam.* Flange-notched wood I-joists reinforced with OSB collars // *Experimental investigation and sensitivity analysis.* *Structures* 19, 2019.
3. *Guo Chen, Jing Wu, Hao Jiang, Tong Zhou, Xiang Li, Yunfei Yu.* Evaluation of OSB webbed laminated bamboo lumber box-shaped joists with a circular web hole // *Journal of Building Engineering* 29.
4. *M. Shahnewaz, M. Shahidul Islam, Thomas Tannert, M. Shahria Alam.* Reinforced wood I-joists with web opening: experimental and analytical investigations // *World conference on Timber Engineering*, 2016.
5. *M. Shahnewaz, M. Shahidul Islam, Thomas Tannert, M. Shahria Alam.* Timber i-joists with web openings: reinforcement, capacity prediction and sensitivity analysis // *Resilient infrastructure*, 2016.
6. *Chang Liu, Guo Chen, Lingyu Li, Yu Qin, Jiayi Wang, Minghan Xu.* Experimental Investigation on OSB Webbed Laminated Bamboo Lumber Box Shaped Joists // *MATEC Web of Conferences* URL: <https://doi.org/10.1051/matec-conf/201927501003275> (дата обращения: 15.02.23).
7. *Tang Z., Shan B., W.G Li, Peng Q., Xiao Y.* Structural behavior of glulam I-joists // *Construction and Building Materials.* Volume 224, 2019. 292–305 p.
8. *Синцов А. В., Синцов В. П.* Прочность и деформативность составной деревянной балки со стенкой из ориентированной стружечной плиты // *Строительство и техногенная безопасность*, 2014. 152–158 с.
9. *Синцов А. В.* Составные деревянные балки для строительства зданий по каркасной технологии // *Строительство и техногенная безопасность* № 8(60), 2017. 55–60 с.
10. *Саиян С. Г., Паушкин А. Г.* Численное параметрическое исследование напряженно-деформированного состояния двутавровых балок с различными типами гофрированных стенок // *Вестник МГСУ*, 2021. 676–687 с.

УДК 69

Александр Григорьевич Черных,
д-р техн. наук, профессор
Дмитрий Игоревич Корольков,
аспирант
Абдессалам Букелиа,
студент
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный
университет)
E-mail: korol9520@yandex.ru

Alexander Grigoryevich Chernykh,
Dr. Sci. Tech., Professor
Dmitriy Igorevich Korolkov,
postgraduate student
Abdessalam Boukelia,
student
(Saint Petersburg
State University of Architecture
and Civil Engineering)
E-mail: korol9520@yandex.ru

ОБЗОР И АНАЛИЗ ЗАРУБЕЖНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО МОДЕЛИРОВАНИЮ УСТАЛОСТНОГО ПОВРЕЖДЕНИЯ КЛЕЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА ОСНОВЕ КИНЕТИЧЕСКОГО ПОДХОДА

REVIEW AND ANALYSIS OF FOREIGN STUDIES ON MODELING FATIGUE DAMAGE OF GLUED STRUCTURES BASED ON THE KINETIC APPROACH

В данной статье была проанализирована модель, основанная на кинетике реакции, специально для анализа результатов испытаний на циклическую усталость и облегчения сравнения различных клеев для древесины. Для получения реалистичного изображения явлений малоциклового усталости используется вероятностная модель для оценки предела выносливости и ресурса выработавшихся образцов (образцов, не разрушившихся во время испытаний). Также представлено сравнение характеристик трех различных клеев для древесины при циклической усталостной нагрузке, чтобы определить, какой клей и соответствующие свойства клея кажутся оптимальными для выдерживания усталостных нагрузок.

Ключевые слова: энергия активации, клееные конструкции, циклическое нагружение, накопление повреждение, предел выносливости.

In this article, a model based on reaction kinetics has been analyzed specifically to analyze the results of cyclic fatigue tests and facilitate the comparison of different wood adhesives. To obtain a realistic image of the phenomena of low-cycle fatigue, a probabilistic model is used to estimate the endurance limit and resource of worn out samples (samples that did not collapse during testing). A comparison of the performance of three different wood adhesives under cyclic fatigue loading is also presented to determine which adhesive and the corresponding adhesive properties appear to be optimal for withstanding fatigue loads.

Keywords: activation energy, glued structures, cyclic loading, damage accumulation, endurance limit.

Накопление циклических нагрузок в течение длительных периодов времени может привести к повреждению конструкции при уровнях напряжений ниже расчетной прочности конструкции. Изучение влияния различных типов клея на усталостные характеристики склеенной древесины является важной областью, которая давно исследуется [1, 2].

В недавних исследованиях [3] было показано, что клеи с разными модулями упругости приводят к различным усталостным характеристикам, которые не были очевидны в условиях квазистатической нагрузки. Хрупкие адгезивные системы (меламин-мочевиноформальдегид (MUF), рыбий и костный клей), по-видимому, хорошо работают при высокой интенсивности и малоциклового усталости (LCF), в то время как более пластичная адгезивная система (1С-PUR) лучше работает при низкой интенсивности, многоцикловая усталость (HCF). Возможно, пластичный 1С-PUR рассеивает большее количество энергии деформации в виде тепла, которое, следовательно, недоступно для накопления повреждений [4].

Несмотря на то, что в зависимости от химической природы клеевых систем наблюдаются различные явления адгезии, в целом остается верным тот факт, что испытанные на хрупкость клеи обладают более плотной взаимосвязанной полимерной сеткой, отвечающей за высокий модуль упругости и обеспечивающей также в основном больше точек соединения с древесиной, что приводит к лучшей адгезии и более высокому проценту разрушения древесины [3]. Однако остается неясным, как содержание влаги в древесине, тип нагрузки и тип клея влияют на форму кривой числа циклов напряжения (кривая $S-N$), особенно для многоциклового усталости. Влияние повышенной влажности на склеенные деревянные соединения внахлестку, подвергающиеся квазистатической нагрузке, уже хорошо изучено [5].

Для всех типов клеев обычно наблюдается снижение прочности на сдвиг с увеличением влажности древесины. При циклической усталостной нагрузке на простой древесине [6] была отмечена лишь умеренная чувствительность усталостной прочности к содержанию влаги. Из-за сложности получения данных об усталости для очень большого количества циклов модели усталости используются для экстраполяции данных за пределы диапазона испытаний, предполагающего поведение данного материала. Большинство моделей, используемых для получения кривых напряжения-цикла

(кривых $S-N$) из экспериментальных данных, в некоторой степени основаны на эмпирических предположениях [7]. Анализ результатов усталостной усталости является сложной задачей из-за разброса (для одинаковых уровней нагрузки обычно вариация на 2 порядка больше) и малого количества образцов.

Krausz и Eyring описали долгосрочные эффекты в материалах на основе подхода кинетики реакции [8]. Принцип этого подхода заключается в том, что в твердом теле молекулы занимают положения равновесия и колеблются около минимума потенциала свободной энергии. При отсутствии механического напряжения движения твердого тела или его частей не происходит, так как в среднем происходит столько же прыжков вправо или влево от энергетического барьера (рис. 1, *A*). При смещении молекул из положений равновесия приложенным напряжением (рис. 1, *B*) потенциальная энергия увеличивается.

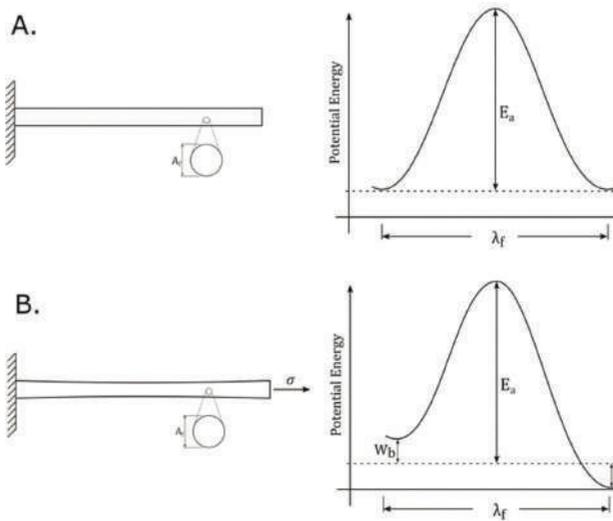


Рис. 1. *A* – для материала без внешнего напряжения барьер потенциальной энергии симметричен, что означает, что тенденция единицы потока A_f преодолеть барьер E_a одинакова в любом направлении. *B* – как только этот материал подвергается воздействию напряжения σ , потенциальный энергетический барьер искажается внешней работой W_b и W_f и тенденция единицы потока к перескоку через λ_f в направлении приложенного напряжения становится больше, чем в случае противоположного направления

Это означает, что поверхность потенциальной энергии изменяется, делая реакцию более вероятной, уменьшая высоту барьера с W_f в прямом направлении и увеличивая высоту барьера с W_b в обратном направлении. Где $W = W_b + W_f = \sigma \cdot A_f \cdot \lambda_f$ представляет собой работу внешних ограничений. На рис. 1 показано влияние растягивающего напряжения σ на потенциальную энергию единицы потока A_f на простом примере испытания на растяжение. Следует отметить, что единицей потока могут быть молекулы, группы молекул или нити, фибриллы и т. п.

Caulfield D. F. применил этот подход к древесине [9], предполагая, что единственный энергетический барьер получает уравнение:

$$N = \frac{h \cdot \gamma_b}{k_b \cdot T \cdot \lambda_f} \exp\left(\frac{E_a}{R \cdot T} - \frac{\lambda_f \cdot A_f}{2 \cdot k_b \cdot T} \sigma\right) \quad (1)$$

где k_b – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура, h – постоянная Планка, E_a – энергия активации, λ_f – скачок сегмента потока, A_f – поперечное сечение сегмента потока, R – газовая постоянная и приложенное напряжение σ . Эта модель предполагает, что при постоянном напряжении во времени материал будет ползти до тех пор, пока не будет достигнута локальная деформация деформации (γ_b), после чего образец разрушится. van der Put использовал аналогичный подход, расширив теорию, используя несколько наборов энергетических барьеров, показав применимость для описания явлений ползучести и повреждения [10, 11]. Для высоких уровней напряжения, как в случае усталостной нагрузки и роста трещины, уравнение разрушения связи можно упростить и записать следующим образом:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = (C + B \cdot \varepsilon) \left(\frac{\sigma - \sigma_0}{\sigma_u}\right)^n \quad (2)$$

где ε – деформация, связанная с линейным течением (C) и пластическим течением ($B \cdot \varepsilon =$ развитие повреждения), t – время. Параметры B и C представляют собой константы скорости реакции, описывающие, сколько единиц потока перепрыгивают через энергетический барьер, заданный уравнением:

$$C, B = \frac{k_b \cdot T}{h} \exp\left(\frac{-E_a}{R \cdot T}\right) \quad (3)$$

где E_a – энергия активации для различных констант скорости реакции, а n – рабочий член энергии активации, который описывает, насколько энергетический барьер смещается под действием механического напряжения: $n = (\sigma_f \lambda_f) / (N_m k_b T)$; σ_f – часть среднего напряжения на единицы потока, λ_f – скачок сегмента потока при активации, а N_m – количество единиц потока на единицу площади, см. также [8], $\sigma - \sigma_0$ – эффективное напряжение на элементах потока, σ_0 – предел выносливости (также называемый пороговым уровнем напряжения), ниже которого не происходит повреждения, σ_u – предел прочности.

Независимым образом [12] разработали эмпирическую модель, предполагающую, что распространение повреждения является функцией приложенного напряжения и текущего повреждения. Эта модель переменной состояния показана в следующем уравнении:

$$\frac{d\alpha}{dt} = F(\sigma(t), \alpha) \quad (4)$$

где α индекс поврежденности ($\alpha = 0$ в неповрежденном состоянии, $\alpha = 1$ при отказе), $\sigma(t)$ приложенное напряжение в момент времени t и α – текущий ущерб. Приведенное выше уравнение может быть затем записано в виде расширения степенного ряда, которое затем может быть выражено в виде следующей модели [12]:

$$\frac{d\alpha}{dt} = F_1 \cdot (\sigma - \sigma_0)^{F_2} + F_3 \cdot \alpha \quad (5)$$

При этом F_1, F_2, F_3, F_4 – параметры, не имеющие физического смысла, а σ_0 – предел выносливости. Первое слагаемое в правом размере описывает, что повреждения накапливаются при нагрузке выше предела выносливости, однако у этой модели была нежелательная особенность, из-за параметра F_3 во втором слагаемом в правой части она всегда будет приводить до отказа. Позже эта модель была доработана и улучшена [13]:

$$\frac{d\alpha}{dt} = F_1 \cdot (\sigma - \sigma_0 \times \sigma_u)^{F_2} + F_3 \cdot (\sigma - \sigma_0 \cdot \sigma_u)^{F_4} \cdot \alpha \quad (6)$$

Представляется, что форма уравнения (6) эквивалентна уравнению (2), когда пластическая деформация рассматривается как образование повреждений:

$$\frac{d\alpha}{dt} = C \cdot (\sigma - \sigma_0 \cdot \sigma_u)^{n_1} + B \cdot (\sigma - \sigma_0 \cdot \sigma_u)^{n_2} \cdot \alpha \quad (7)$$

где n_1 и n_2 – разные члены работы энергии активации, соответствующие разным процессам [11]. Таким образом, уравнение Foschi-Yao, можно объяснить физическими параметрами уравнения (2). Уравнение (7) затем можно проинтегрировать, чтобы получить количество циклов до разрушения при заданном напряжении, предполагая эквивалентность циклов время-нагрузка ($N_i \approx \sum \sigma \cdot t_i$):

$$N(\sigma) = \frac{1}{B \cdot (\sigma - \sigma_0 \cdot \sigma_u)^{n_2}} \cdot \ln \left[\frac{B + C \cdot (\sigma - \sigma_0 \cdot \sigma_u)^{n_2 - n_1}}{\alpha_C \cdot B + C \cdot (\sigma - \sigma_0 \cdot \sigma_u)^{n_2 - n_1}} \right] \quad (8)$$

Значение α_C , которое представляет накопленное повреждение на этапе загрузки в (эквивалентном) испытании на ползучесть, может быть приблизительно выражено:

$$\alpha_C = \left(\frac{\sigma - \sigma_0}{1 - \sigma_0} \right)^{n_1 + 1} \quad (9)$$

Значение C можно приблизительно определить по формуле:

$$C = \frac{k(n_1 + 1)}{[\sigma_u(1 - \sigma_0)]^{(n_1 + 1)}} \quad (10)$$

где k - скорость загрузки.

Foschi и Yao предположили, что четыре параметра (B , C , n_2 , n_1) уравнения (8) являются положительными, независимыми случайными величинами с логарифмически нормальным распределением. Оценка параметра полезна для упрощения модели, поскольку позволяет судить о том, какой процесс повреждения является преобладающим.

Для определенного использования в испытаниях на циклическую усталость средняя скорость нагружения k постоянно колеблется со средним значением, близким к нулю. По этой причине полу-

чается, что коэффициент C в уравнении (10) очень мал, и им можно пренебречь. Учитывая это, уравнение (8) можно упростить до:

$$N(\sigma) = \frac{1}{B \cdot (\sigma - \sigma_0 \cdot \sigma_u)^{n_2}} \cdot \ln \left[\left(\frac{1 - \sigma_0 \times \sigma_u}{\sigma - \sigma_0 \times \sigma_u} \right)^{n_1 + 1} \right] \quad (11)$$

Эта модель фактически является комбинацией двух членов: первый член $\frac{1}{B \cdot (\sigma - \sigma_0 \times \sigma_u)^{n_2}}$ имеет ту же форму, что и модель

Мэдисона [14], умноженный на второй член $\ln \left[\left(\frac{1 - \sigma_0 \times \sigma_u}{\sigma - \sigma_0 \times \sigma_u} \right)^{n_1 + 1} \right]$,

учитывающий нелинейное накопление повреждений вблизи предела прочности. Для каждого члена параметры n_2 и n_1 должны быть скорректированы с учетом относительного влияния обоих процес-

сов. Однако математически выражение $(n_1 + 1) \cdot \ln \left[\left(\frac{1 - \sigma_0 \cdot \sigma_u}{\sigma - \sigma_0 \cdot \sigma_u} \right) \right]$

эквивалентно $\ln \left[\left(\frac{1 - \sigma_0 \cdot \sigma_u}{\sigma - \sigma_0 \cdot \sigma_u} \right)^{n_1 + 1} \right]$ Поскольку любое строго положи-

тельное число может быть получено путем умножения двух чисел, для моделирования влияния параметра B и n_1 необходим только один параметр, такой как $\Phi = (n_1 + 1) / B$. Поэтому, если эти параметры получены в процессе итераций, невозможно напрямую объяснить относительную важность обоих терминов, поскольку существует бесконечность значений B и n_1 , что приводит к одному и тому же Φ . По этой причине окончательное уравнение было упрощено и содержало только три параметра (Φ , λ и σ_0).

$$N(\sigma) = \Phi [\sigma - \sigma_0 \cdot \sigma_u]^{-\lambda} \cdot \ln \left[\left(\frac{1 - \sigma_0 \cdot \sigma_u}{\sigma - \sigma_0 \cdot \sigma_u} \right) \right] \quad (12)$$

Как показано на рисунке 2, каждый параметр оказывает явное влияние на форму кривой $S-N$. Параметры Φ , влияющие на сдвиг кривой $S-N$ вдоль оси циклов без изменения наклона кривой,

параметры λ , влияющие на наклон кривой $S-N$, и параметр σ_0 , представляющий асимптотическое поведение кривой $S-N$ для $N \rightarrow \text{Inf}$, например предел выносливости.

Использование модели van der Put для получения значения коэффициента дает следующую оценку:

$$\Phi = \frac{n_1 + 1}{B} = \left(\frac{\sigma_{f,1} \cdot \lambda_{f,1} \cdot h}{N_{m,1} \cdot k_b^2 \cdot T^2} + \frac{h}{k_b \cdot T} \right) \exp\left(\frac{E_a}{R \cdot T}\right) \quad (13)$$

$$\Lambda = n_2 = \frac{\sigma_{f,2} \cdot \lambda_{f,2}}{N_{m,2} \cdot k_b \cdot T} \quad (14)$$

из этих уравнений коэффициенты $\sigma_{f,1}$, $\lambda_{f,1}$, $N_{m,1}$, E_a , $\sigma_{f,2}$, $\lambda_{f,2}$, $N_{m,2}$ неизвестны и должны быть определены путем итераций. Как объяснялось ранее, математически невозможно различить влияние работы n_1 и энергии активации B , по той же причине невозможно напрямую различить влияние различных коэффициентов, перечисленных выше. Однако уравнение (12) можно использовать в качестве аналогии, чтобы дать представление о явлениях усталости. Например, с повышением температуры параметр Φ и Λ будет уменьшаться, а это означает, что кривая $S-N$ будет смещаться влево, а кривая станет более крутой. С точки зрения кинетики реакции это означает, что с повышением температуры вероятность того, что молекула сместит свой энергетический уровень, увеличивается, что увеличивает скорость накопления повреждений и, следовательно, снижает срок службы образца.

Влияние температуры на время до разрушения клеевых образцов было ясно показано в [15], где линия времени до разрушения сместилась вправо при повышенных температурах. Кроме того, как и следовало ожидать, наличие более высокой энергии активации или более высокой удельной прочности потока увеличит срок службы образца. Однако признано, что для древесины, хотя энергия активации обычно связана со смещением связи (в отличие от разрыва первичной связи), определение энергии активации всегда будет приводить к «среднему» значению, поскольку большое разнообразие молекул (целлюлоза, гемицеллюлоза и лигнин).

В уравнении (12) параметры Φ , λ и σ_0 должны соответствовать данным. Параметры модели 2 можно получить путем минимизации функции:

$$\sum_{i=1}^n \left(\log(N(\sigma_i)) - \log(N_i) \right)^2 \quad (15)$$

где n – количество испытанных образцов, N_i и i – количество циклов и соответственно уровень нагрузки до разрыва рассматриваемого образца. Использование уравнения (15) для получения параметров модели всегда будет приводить к нулевому пределу выносливости (иногда также называемому пределом выносливости). Это означает, что любая нагрузка, какой бы малой она ни была, в конечном итоге приведет к разрушению образца. Существование предела выносливости хорошо известно для металла, однако остается неясным, существует ли такой предел для дерева [16]. Некоторые авторы оценили предел выносливости для определенного типа нагрузки и типа образца, например [17] оценили предел выносливости примерно в 35–50 % от максимального напряжения изгиба для дерева и древесных композитов, [11] оценили предел выносливости составляет около 35 % от максимальной нагрузки, тогда как [18] предсказал предел выносливости в 60 % от максимального уровня нагрузки для сжимающей нагрузки, перпендикулярной волокнам японского кипариса. Но, в конечном счете, все указанные выше предельные значения выносливости являются результатом экстраполяции математической модели за пределы диапазона экспериментальных данных и поэтому должны рассматриваться только как оценочные. Тем не менее кажется, что допущение предела выносливости для древесины и древесных композитов является приемлемой рабочей гипотезой [7].

Для моделей усталости, основанных на Foschi и Yao, предел выносливости понимается как параметр модели или как внешняя константа, которую следует выбирать по заданному эталону. Как объяснялось ранее, если в качестве параметра задан предел выносливости, его значение будет сведено к минимуму до нуля. Это также имеет место в теории поврежденного вязкоупругого материала [16, 19], которая предсказывает, что такой материал, как древесина, выйдет из строя независимо от предела выносливости. В конечном счете, оценка предела выносливости с помощью механических/

эмпирических моделей за пределами диапазона испытаний без четких ожиданий поведения древесины при таких нагрузках будет неточной. В связи с этим интересным подходом является использование вероятностной модели усталости [20]. Эта модель основана на модифицированном распределении Вейбулла с тремя параметрами, в котором кумулятивное распределение усталостной долговечности при заданном диапазоне напряжений и кумулятивное распределение диапазона напряжений при заданном сроке службы не являются независимыми и должны удовлетворять условию совместимости. Выполнение этих условий совместимости позволяет установить функциональное уравнение $F(N, \Delta\sigma)$ в форме модели Вейбулла, как показано в уравнениях (16) и (17):

$$F(N, \Delta\sigma) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{(\log N - N_0)(\log \Delta\sigma - \sigma_0) - \lambda}{\delta} \right)^\beta \right] \quad (16)$$

$$(\log N - N_0)(\log \Delta\sigma - \sigma_0) \geq \lambda \quad (17)$$

где N_0 – пороговый предел цикла, σ_0 – предел выносливости; λ , δ , β – параметры положения, масштаба и формы Вейбулла соответственно. Использование уравнения (14) для итерации данных позволяет получить оценку предела выносливости. Затем это оценочное значение можно использовать как константу σ_0 в уравнении (12).

Используя эти параметры, получают оценочные значения отказов. Затем параметры модели переоцениваются с использованием данных, связанных с реальными отказами, плюс ожидаемые, связанные с выходами из строя. Затем два последних шага повторяются до тех пор, пока не произойдет сходимости процесса, что означает, что преобразованные времена жизни биений относятся к тому же распределению, что и выборки, связанные с отказами.

В заключении отметим, что, используя данную модель усталости, можно оценить количество циклов, в течение которых образец может разрушиться. При проведении дальнейших экспериментальных исследований данную модель представляется возможным распространить для оценки усталостной прочности и на другие типы конструкции, сделанных из материалов на основе древесины.

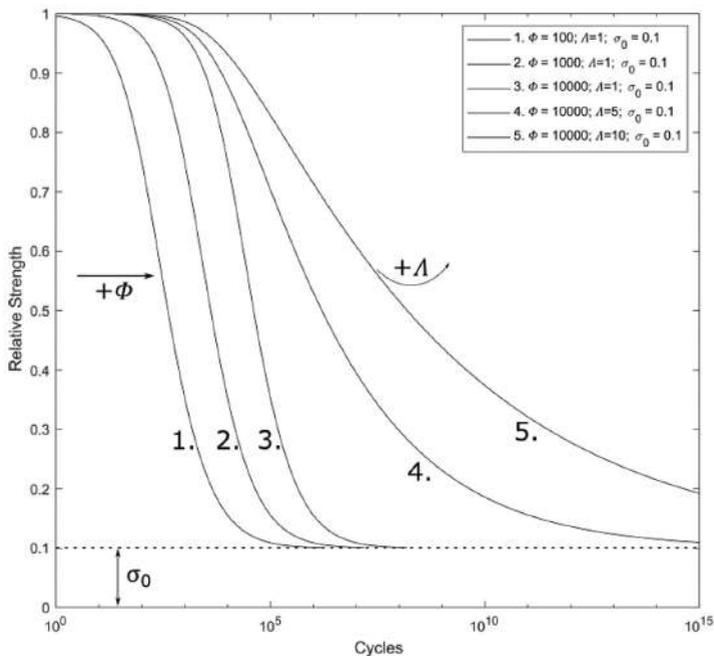


Рис. 2. Влияние трех параметров уравнения (12) на форму кривой $S-N$. При увеличении значения C кривая $S-N$ смещается вправо по оси циклов, сохраняя при этом тот же наклон. При увеличении значения D наклон уменьшается. Предел выносливости σ_0 представляет собой асимптоту для $N \rightarrow \infty$

Литература

1. Tsai K. T., Ansell M. P. The fatigue properties of wood in flexure. *Journal of Materials Science* 25(2). 1990. p. 865–878.
2. Stoeckel F., Konnerth J., Gindl-Altmutter W. Mechanical properties of adhesives for bonding wood – A review. *International Journal of Adhesion and Adhesives* (45). 2013. p. 32–41.
3. Bachtiar E. V., Clerc G., Brunner A. J., Kaliske M., Niemz P. Static and dynamic tensile shear test of glued lap wooden joint with four different types of adhesives. *Holzforschung* 71(5). 2017. p. 391–396.
4. Künniger T., Clerc G., Josset S., Niemz P., Pichelin F., van de Kuilen J. W. G. Influence of humidity and frequency on the energy dissipation in wood adhesives. *International Journal of Adhesion and Adhesives* (92). 2019. p. 99–104.

5. Kläusler O., Clauß S., Lübke L., Trachsel J., Niemz P. Influence of moisture on stress–strain behaviour of adhesives used for structural bonding of wood. *International Journal of Adhesion and Adhesives* (44). 2013. p. 57–65.
6. Lewis W. C. Fatigue resistance of quarter-scale bridge stringers in flexure and shear. US Forest Product Laboratory, Madison, WI, USA Report No: 2236. 1962.
7. Smith I., Landis E., Gong M. Fracture and fatigue in wood. Wiley, Chichester. 2003.
8. Krausz A. S., Eyring H. Deformation kinetics. John Wiley & Sons. 1975.
9. Caulfield D. F. A chemical kinetics approach to the duration-of-load problem in wood. *Wood and Fiber Science* 17(4). 1985. p. 504–521.
10. Van der Put, T.A.C.M. Reaction kinetics of bond exchange of deformation and damage processes in wood. International Council for Building Research Studies and Documentation Working Commission W18 – Timber Structures CIB-/W18/19-9-1 Meeting 19 Florence, Italy. 1986.
11. Van der Put, T. A. C. M. Deformation and damage process in wood. Ph.D., TU Delft, The Netherlands. 1989. pp. 163.
12. Barrett J. D., Foschi R. O. Duration of load and probability of failure in wood. Part I. Modelling creep rupture. *Canadian Journal of Civil Engineering* 5(4). 1978. p. 505–514.
13. Foschi R. O., Yao Z. C. Another Look at three duration of load models. International Council for Building Research Studies and Documentation Working Commission W18 – Timber Structures CIB-W18/19-9-1 Meeting 19 Florence, Italy. 1986.
14. Wood L. W. Behavior of wood under continued loading. *Engineering News-Record* 139(24). 1947. p. 108–111.
15. Knorz M., Schmid P., van de Kuilen J. W., Klaus R. (2018) Time to Failure Testing in Shear of Wood–Adhesive Bonds under Elevated Temperatures. *Forest Products Journal* 68(4). 2018. p. 383–389.
16. Nielsen L. F. Lifetime and residual strength of wood subjected to static and variable load. Part I: Introduction and analysis. *Holz als Roh- und Werkstoff* 58(1-2). 2000a. p. 81–90.
17. Kyanka G. H. Fatigue properties of wood and wood composites. *International Journal of Fracture* 16(6). 1980. p. 609–616.
18. Ogawa K., Shimizu K., Yamasaki M., Sasaki Y. Fatigue behavior of Japanese cypress (*Chamaecyparis obtusa*) under repeated compression loading tests perpendicular to the grain. *Holzforschung* 71(6). 2017. p. 499–504.
19. Nielsen L. F. Lifetime and residual strength of wood subjected to static and variable load. Part II: Applications and design. *Holz als Roh- und Werkstoff* 58(3). 2000b. p. 141–152.
20. Castillo E., Fernández-Canteli A. A. Unified Statistical Methodology for Modeling Fatigue Damage. Springer Netherlands, Dordrecht. 2009.

УДК 378.0

Сергей Петрович Трофимов,
канд. техн. наук, доцент
(Белорусский государственный
технологический университет)
E-mail: tsp46@mail.ru

Sergey Petrovich Trofimov,
PhD in Sci. Tech., Associate Professor
(Belarusian State
Technological University)
E-mail: tsp46@mail.ru

О РАБОТЕ УНИВЕРСИТЕТА В СФЕРЕ ПРОИЗВОДСТВА СТОЛЯРНЫХ ИЗДЕЛИЙ И ПРИМЕНЕНИЯ ДРЕВЕСИНЫ В ДОМОСТРОЕНИИ

ABOUT THE UNIVERSITY'S WORK IN THE FIELD OF JOINERY PRODUCTION AND THE USE OF WOOD IN HOUSE CONSTRUCTION

В статье приводится информация о подготовке бакалавров области производства строительных изделий и деревянного домостроения. В качестве примеров работ выполненных в БГТУ, связанных с использованием древесины в строительных конструкциях, изделиях и домостроении можно назвать организацию ксилотеки образцов различных древесных пород, обследование старых заброшенных строений и получение образцов ретродревесины на севере Поонежья Архангельской области. Оценка компетенций инженерных кадров предприятий и проектных организаций Беларуси позволяет сделать выводы о дефиците специалистов надлежащей квалификации и о необходимости активизации деятельности учебных заведений в решении этого вопроса.

Ключевые слова: подготовка кадров, деревянное домостроение, инженерные кадры, БГТУ.

The article provides information on the preparation of bachelors in the field of production of building products and wooden house construction. As examples of works performed at BSTU related to the use of wood in building structures, products and housing construction, we can name the organization of a xylotheca of samples of various wood species, the survey of old abandoned buildings and the receipt of samples of retro-wood in the north of the Poonezhye of the Arkhangelsk region. The assessment of the competencies of engineering cadres of enterprises and design organizations in Belarus allows us to draw conclusions about the lack of specialists of appropriate qualifications and the need to activate the activity of educational institutions in solving this issue.

Keywords: personnel training, wooden house construction, engineering personnel, BSTU.

Белорусский государственный технологический университет (БГТУ) берет свое начало от Лесного института открытого в 1930 году, в последствии имели место его переименования, значительное расширение сферы деятельности и перечня специальностей подготовки инженерных кадров.

В области решения образовательных, научных и инженерных задач обеспечения производства столярно-строительных изделий и применения древесины в домостроении работает факультет Лесной инженерии, материаловедения и дизайна (ЛИД), деятельность которого связана с заготовкой древесного сырья, деревообработкой и применением соответствующих технических средств. Помимо учебных лабораторий на факультете имеется специальная научно-исследовательская – огнезащиты строительных конструкций и материалов.

Одной из специальностей подготовки кадров в рассматриваемой сфере деятельности на факультете ЛИД является 1-46 01 02 «Технология деревообрабатывающих производств» со специализациями учебных планов после перехода на четырехлетний срок обучения: 1-46 01 02 01 «Технология деревообрабатывающих производств», 1-46 01 02 02 «Технология и дизайн мебели».

При подготовке инженера (бакалавра) к работе в области производства столярно-строительных изделий и деревянного домостроения учебным планом специализации 1-46 01 02 01 предусмотрено изучение следующих дисциплин: Материаловедение; Древесиноведение с основами лесного товароведения; Теоретическая механика; Механика материалов; Технология защитно-декоративных покрытий древесины и материалов; Гидротермическая обработка и защита древесины; Конструирование изделий из древесины; Технология клееных материалов и плит; Технология строительных изделий из древесины.

Ранее, до 2007 года, учебным планом пятилетнего срока обучения по специальности 1-46 01 02 «Технология деревообрабатывающих производств», наряду с двумя вышеуказанными, была предусмотрена также специализация 1-46 01 02 03 «Технология деревянных строительных изделий и конструкций» с наличием следующих отраслевых дисциплин: Основы строительного дела; Архитектура и интерьер жилых и общественных зданий; Основы тепловой изоляции

зданий; Технология деревообработки; Технология изделий из древесины; Конструкции столярно-строительных изделий; Производство деревянных строительных изделий. В настоящее время подготовка инженеров с пятилетним сроком обучения и по этой специальности в БГТУ уже, к сожалению, отсутствует.

Преподаватели БГТУ, являющиеся членами технических комитетов ТКС 13 «Светопрозрачные ограждения в различных конструктивных исполнениях, двери, ворота и приборы к ним» и ТКС 16 «Деревянные конструкции и изделия» по стандартизации в строительстве РУП «Стройтехнорм» Министерства архитектуры и строительства Республики Беларусь, участвуют в разработке национальных технических нормативных правовых актов (СТБ, ТКП, СН и СП) и рассмотрении ГОСТов на предмет принятия последних на нашей территории в качестве межгосударственных.

Примером белорусских нормативных документов, разработанных с участием БГТУ, в качестве основного исполнителя, являются стандарт Беларуси СТБ 1312 и технический кодекс установившейся практики ТКП 510 [1 и 2], которые определяют требования к конструкции и технологии изготовления столярно-строительных изделий. Указанные ТКС поддерживают контакты по профилю своей деятельности с техническими комитетами России и с Межрегиональным институтом окна в Санкт-Петербурге.

Преподаватели проходят периодически повышение квалификации в процессе стажировок в университетах Беларуси и за рубежом, при посещении крупнейших отраслевых выставок («FensterFrontale» и «Ligna» в Германии, «Лесдревмаш» в России и др.), а также научно-исследовательских учреждений и предприятий.

Университет осуществляет подготовку и издание учебной и научно-технической литературы для студентов и специалистов в рассматриваемой сфере деятельности, например – конструирование столярно-строительных изделий [3]. Некоторые разработки, выполненные в БГТУ, запатентованы, например, строительные панели из древесных материалов [5].

На лабораторных занятиях студенты получают практические навыки измерений, определения физико-механических показателей, определения технологических режимов исследования древесных,

отделочных, клеевых материалов и образцов элементов столярных изделий. В период производственных практик, в курсовом и дипломном проектировании присутствует тематика технологии, конструирования, экологии и дизайна оконных и дверных блоков, иногда деревянного домостроения.

На протяжении многих лет в БГТУ действует диссертационный совет, в котором осуществлялась защита диссертаций по двум специальностям лесопромышленного комплекса соискателями Беларуси и гражданами зарубежных стран.

В качестве примеров работ выполненных в БГТУ, которые связаны с древесинведением, использованием древесины в строительных конструкциях, изделиях и домостроении можно назвать организацию ксилотеки образцов различных древесных пород (рис. 1), обследование старых заброшенных строений и получение образцов ретродревесины на севере Поонежья Архангельской области (рис. 2–3).



Рис. 1. Ксилотека образцов древесины различных пород, БГТУ (Минск)

В далекие времена дома строили древесины естественной сушки и длительной выдержки, при этом материал не деформировался, а позже стабилизация свойств его продолжалась. На рис. 2 приведены примеры старых заброшенных домостроений, потенциально источников заготовки ретродревесины при их демонтаже.

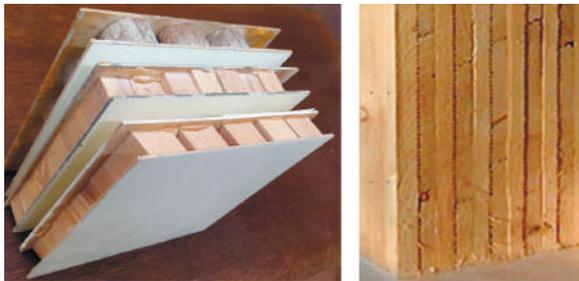


Рис. 2. Старые крестьянские заброшенные дома XIX века – источники ретродревесины



Рис. 3. Осмотр старых домостроений и заготовка образцов ретродревесины

Ретродревесина после фитосанитарной и механической обработки (при наличии необходимости ее проведения) может быть использована в стеновых панелях, стенах, перегородках, в отделке интерьера и других элементах домостроения, некоторые примеры приведены на рис. 4.



а)

б)

Рис. 4. Примеры возможного использования ретродревесины в стеновых панелях: а – трехслойных с торцовым [5] наполнителем; б – многослойных с досчатым наполнением средних слоев

С использованием метода конечных элементов и экспериментальной проверкой его результатов проведено исследование (рис. 5 и 6) напряжений в конструкции и формоустойчивости неоднородных массивов древесины с учетом цилиндрической анизотропии их элементов при сушке и разбухании [1, 6].

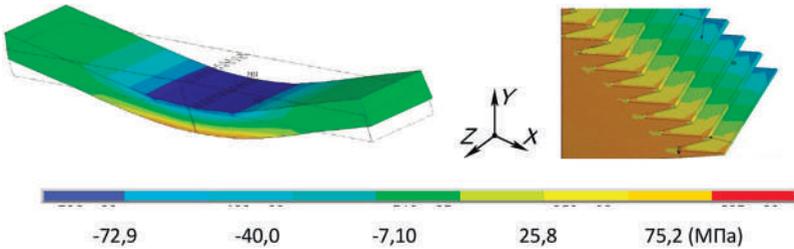


Рис. 5. Распределение X -составляющей напряжений, возникающих в конструкции под действием приложенных изгибающих сил (нормальные напряжения растяжения и сжатия)

Рисунок 5 иллюстрирует результат моделирования работы на изгиб бруска с зубчатым клеевым соединением по длине. Получено решение расчетной модели и исследован отклик модели на заданные условия нагружения. На основе результатов моделирования зубчатого соединения при испытаниях на статический изгиб, можно делать выводы, касающиеся механизма разрушения и прочности самого соединения.

Рисунок 6 характеризует влияние расположения годичных слоев в ламелях клееного щита на величину перемещений его элементов в направлении оси Y . На основе результатов компьютерного моделирования можно делать выводы о формоустойчивости щита с учетом ориентации годичных слоев древесины и ширины ламелей.

Оценка компетенций инженерных кадров некоторых предприятий и проектных организаций Беларуси позволяет сделать выводы о дефиците специалистов надлежащей квалификации и о необходимости активизации деятельности учебных заведений в решении этого вопроса. Примером для нас являются некоторые высшие учебные заведения Польши, Германии, Швейцарии и России, их связи с производством и научно-исследовательскими институтами.

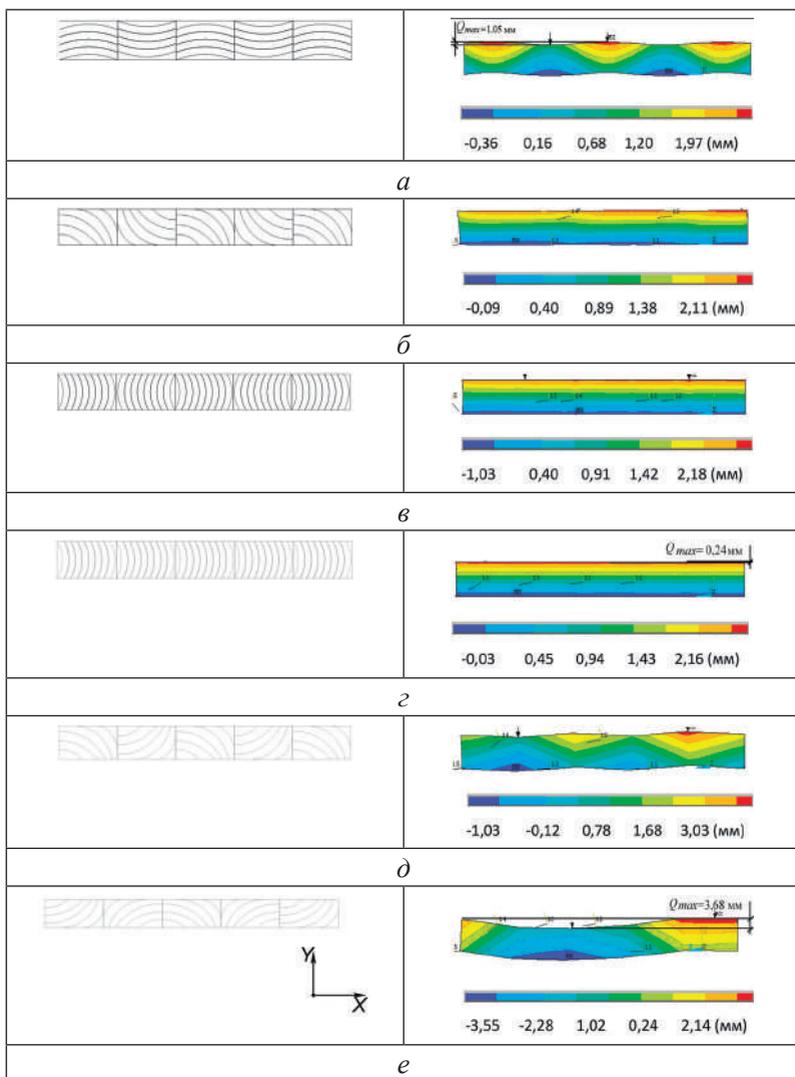


Рис. 6. Влияние расположения годичных слоев в смежных ламелях на величину перемещений элементов щита в направлении оси Y : *a* – расположение согласованное тангенциальное; *б* – согласованное полурадиальное; *в* – согласованное радиальное; *г* – однонаправленное радиальное; *д* – елочкой; *e* – несогласованное

Актуальным для совершенствования работы технических университетов является:

Создание в учебных заведениях специализированных лабораторий для осуществления образовательного процесса и научных исследований с решением практических прикладных задач в деревообработке.

Координация и взаимодействие отраслевых университетов Союзного государства в подготовке кадров и техническом нормировании.

Стажировки и повышение квалификации преподавателей.

Участие в международных научно-технических конференциях и отраслевых выставках.

Литература

1. *Трофимов С. П.* Конструирование и производство столярно-строительных изделий / С. П. Трофимов, А. С. Пардаев. – Минск : БГТУ, 2011. – 521 с.

2. *Трофимов С. П.* Конструкционные материалы рамных элементов оконных блоков и критерии их выбора / С. П. Трофимов. – Труды XI Междунар. евразийского симпозиума «Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века» Екатеринбург, 20–23 сентября 2016 г. – С. 145–151.

3. СТБ 1912–2008 «Элементы остекления балконов и лоджий. Технические условия». РУП «Стройтехнорм». 2008. – 30 с.

4. ТКП 45-7.02-148–2009 «Производство столярных изделий при объеме переработки пиломатериалов до 10 тыс. м³ в год. Нормы технологического проектирования предприятия». – Минск : МАиС РБ, 2010. – 55 с.

5. Щитовое изделие: пат. на полезную модель 5046 Респ. Беларусь, МПК(2006) E04C 2/10 B27M3/08 / Н. С. Кузьмич, С. П. Трофимов; заявитель Белорус. гос. технол. ун-т. – ВУ № 5046 U 2009.02.28; заявл. 17.04.08; опубл. // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2009. – № 1(66).

6. *Пардаев А. С.* Обеспечение формоустойчивости неоднородных массивов древесины с учетом цилиндрической анизотропии их элементов при сушке и разбухании / А. С. Пардаев: автореф. дисс. канд. техн. наук. – Минск : БГТУ, 2008. – 22 с.

УДК 691.116

Цзян Бо,

магистрант

(Санкт-Петербургский государственный

архитектурно-строительный

университет)

E-mail: 1328341114@qq.com

Jiang Bo,

Master's degree student

(Saint Petersburg

State University of Architecture

and Civil Engineering)

E-mail: 1328341114@qq.com

КЛЕЕННЫЕ КОНСТРУКЦИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ КОМБИНИРОВАННОЙ ДРЕВЕСИНЫ

GLUED STRUCTURES WITH THE USE OF COMBINED WOOD

Бамбук является одним из немногих возобновляемых ресурсов в мире и представляет собой подходящий материал для строительной индустрии. В статье кратко изложен ход исследований по клееному бамбуку в Китае и представлен глубокий анализ текущего состояния исследований современных бамбуковых конструкций на основе клееного бамбука. Результаты показывают, что в клееных бамбуковых материалах, используемых в настоящее время в бамбуковых конструкциях, есть много недостатков, что ключевые физико-механические свойства клееных бамбуковых конструкций, такие как огнестойкость и сейсмостойкость, требуют дальнейшего углубленного исследования, и что отсутствие кодов проектирования бамбуковых конструкций является основной причиной, ограничивающей развитие новых клееных бамбуковых конструкций.

Ключевые слова: бамбуковые конструкции, сырой бамбук, бамбуковая древесина, клееный бамбук, механические свойства.

Bamboo is one of the few renewable resources in the world and is a suitable material for the construction industry. The article summarizes the progress of research on glued bamboo in China and provides an in-depth analysis of the current state of research on modern bamboo structures based on glued bamboo. The results show that there are many disadvantages in the glued bamboo materials currently used in bamboo structures, that the key physical and mechanical properties of glued bamboo structures, such as fire resistance and earthquake resistance, require further in-depth research, and that the lack of design codes for bamboo structures is the main reason limiting the development of new glued bamboo structures.

Keywords: bamboo structures, raw bamboo, bamboo wood, glued bamboo, mechanical properties.

Китай очень богат бамбуковыми ресурсами, бамбуковые лесные ресурсы занимают 1/5~1/4 часть мира, и это облесение может быть срезано несколько раз, повторное использование, высокая экономическая эффективность. Бамбук не только быстро растет и может улучшить природную среду в процессе роста, но также имеет низкое энергопотребление в процессе обработки и может быть естественным образом разложен после утилизации, что делает его естественным зеленым строительным материалом [1]. Исследования свойств материалов показали, что бамбук обладает превосходными механическими свойствами, Высокая прочность бамбука на растяжение и сжатие, Его удельная прочность и удельная жесткость близки или даже выше, чем у стали. Оптимизированный или реконструированный из волокон клееный бамбуковый брус с улучшенными общими свойствами, Идеально подходит в качестве композита из натурального волокна для использования в строительстве.

В ранние времена использование колонных конструкций в строительстве ограничивалось круглыми бамбуковыми конструкциями [2], но они были склонны к раскалыванию и потере несущей способности под нагрузкой. Таким образом, круглая бамбуковая конструкция постепенно заменяется деревянной конструкцией, каменной кладкой, железобетонной конструкцией и стальной конструкцией. В последние годы бамбуковые конструкции быстро развиваются, а клееные бамбуковые материалы преодолели геометрические ограничения круглого бамбука, позволяя гибко выбирать формы элементов и размеры поперечного сечения для использования в строительных конструкциях.

Современное состояние развития и применения бамбуковых конструкций

Бамбук обладает хорошей инженерной приспособляемостью. Сырой бамбук может быть использован для опалубочных работ, строительных лесов и других ограждающих работ; высококачественный бамбук может быть использован для арматурных работ и комбинированных конструкций после обработки клеем.

Круглая бамбуковая конструкция. В традиционной круглой бамбуковой конструкции в качестве элементов конструкции используются бамбуковые жерди, дополненные другими строительными материалами, и эти элементы соединяются между собой с помощью таких соединений, как связки, сквозные узлы, болтовые соединения,

соединения стальных листов и втулочные соединения [4]. Однако из-за того, что при проектировании и строительстве оригинальных бамбуковых домов в основном полагаются на опыт, а также из-за геометрических характеристик круглого бамбука, узлы оригинальных бамбуковых конструкций имеют низкую прочность и низкую надежность. Несмотря на то, что новая форма узла может в определенной степени улучшить несущую способность оригинальной бамбуковой конструкции, чрезмерно простая структура оригинальной бамбуковой конструкции с трудом отвечает современным требованиям и эстетическим требованиям людей.

Композитная конструкция из бамбука и бетона. Самой ранней комбинированной конструкцией из бамбука и бетона, которая использовалась, была конструкция из бамбукового железобетона, появившаяся в начале 20-го века. Цель состоит в том, чтобы использовать бамбуковые сухожилия вместо стальных прутьев в бетонных элементах, что позволяет не только в полной мере использовать природные ресурсы, но и достичь цели экономии стали. Однако из-за того, что ранние бамбуковые сухожилия не подвергались водонепроницаемой и антикоррозионной обработке, сухая усадка бамбуковых сухожилий была серьезной, вязкость бамбука и бетона была относительно низкой, а прочность и долговечность комбинированной конструкции не были идеальными. [3]

Композитные элементы из бамбука и дерева. Композитные балки из бамбука и древесины обычно располагают бамбук на стороне растяжения, чтобы улучшить изгиб и несущую способность комбинированной балки. Экспериментальные исследования Ленга Юбинга [5] и других показали, что замена инженерной древесины клееным бамбуком в зоне натяжения может значительно повысить несущую способность комбинированной балки.

Композитная конструкция из стали и бамбука. Бамбук и сталь обладают хорошим комбинационным эффектом, поэтому целостность комбинированной структуры сталь-бамбук лучше. Поскольку бамбук обладает высоким соотношением прочности к весу, прочность композитной конструкции существенно не снижается при уменьшении веса композитной конструкции.

Механические свойства бамбука

Научно-исследовательский институт бамбука Нанкинского института лесной промышленности [6] провел экспериментальную

работу по изучению структуры, физических и механических свойств различных бамбуковых материалов, чтобы получить прочность бамбука, дерева и стали (табл. 1).

Таблица 1

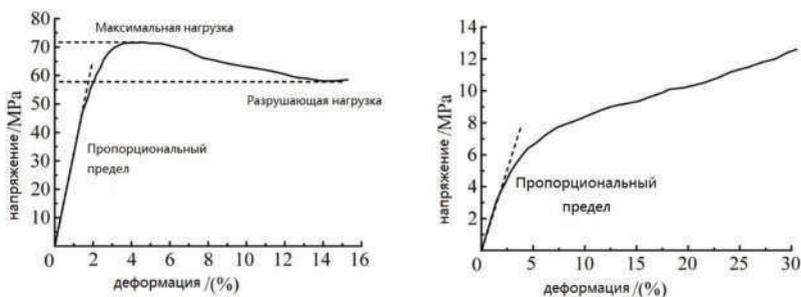
Сравнение прочности бамбука, дерева и стали

Виды		Прочность на растяжение kg/cm ²		Прочность на сжатие kg/cm ²	
		Прочность	среднее	Прочность	среднее
Бамбук	бамбук мосо	1948.2	2082.2	640	487.2
	Листоколосник бамбуковый	2833.5		540.6	
	Филлостахис глаука	1821.8		359.6	
	Дендрокаламус	1951.2		411.3	
Дерево	Ель	772	1073.3	406	444
	Корейская сосна	981		328	
	Дуб острейший	1432		577	
	Сассафрас цуму	1108		465	
Сталь	Мягкая сталь	3780-4250	5170-5563	-	-
	Полумягкая сталь	4400-5000		-	
	Полутвердая сталь	5200-6000		-	
	Твердая сталь	Выше 7300		-	

Как видно из таблицы 1, прочность бамбука на растяжение примерно в два раза выше, чем у древесины, а прочность на сжатие примерно на 10 % выше, чем у древесины. Кроме того, Прочность на разрыв стали в 2,5–3,0 раза выше, чем у бамбука, но из-за высокого удельного веса стали прочность на растяжение на единицу веса бамбука примерно в 3–4 раза выше, чем у стали, если рассчитывать на основе удельного веса. Несмотря на существенную разницу в области применения этих двух материалов в технике, бамбук является жизнеспособным конструкционным несущим материалом

Рен Хайцин и соавт. [7] проанализировали процесс динамического разрушения сопротивления бамбука сжатию, Установлена кривая зависимости напряжения сжатия от деформации, состоящая вдоль волокон и поперек волокон (см. рис.).

Результаты показывают, что существует хорошая корреляция между свойствами бамбука при сжатии, динамическим процессом разрушения и макроскопической морфологией разрушения образца, что обеспечивает теоретическую основу для проведения дальнейших исследований.



Кривая зависимости сопротивления бамбука сжатию от напряжения и деформации

Сяо Янь и др. [8] В результате экспериментальных исследований механических свойств клееного бамбука были получены такие показатели производительности, как модуль упругости, прочность на сжатие, прочность на изгиб и прочность на сдвиг (табл. 2), доказывающие, что бамбуковый материал может соответствовать требованиям к механическим свойствам строительных конструкций.

Таблица 2

**Показатели механических свойств
основного волокна клееного бамбука**

Тип эксперимента	Механические свойства	количество	средняя величина (N/mm ²)
при растяжении	прочность	16	83
	модуль упругости	16	10344
при сжатии	прочность (С клееной поверхностью холодного прессования)	26	35
	прочность (Отсутствие клееных поверхностей холодного прессования)	26	51
при изгибе	прочность	32	99
	модуль упругости	32	9400
при срезе	прочность	25	16

Заключение

Новая система бамбуковых конструкций на основе клееного бамбука имеет широкие перспективы развития в Китае, особенно в сельском строительстве, а также в индустрии культурного строительства. В целом, инженерное применение клееного бамбука все еще находится на стадии исследования, и для его улучшения в будущем необходимо провести большую исследовательскую работу.

1. По сравнению со сталью и бетонными материалами, бамбук более экологичен, но текущие производственные затраты все еще относительно высоки, комплексные экономические выгоды не очевидны, и необходимо дальнейшее совершенствование производственных процессов для повышения эффективности производства, чтобы снизить затраты на производство материала и тем самым повысить его конкурентоспособность в области инженерных сооружений.

2. В Китае не существует промышленного стандарта для производства клееного бамбука, а обработка материала и проверка продукции в основном полагаются на опыт, что приводит к большому разбросу параметров работы клееного бамбука и низкой надежности материала, что в конечном итоге приводит к воспроизводимости исследования

3. Большинство современных исследований клееного бамбука сосредоточено на свойствах древесины и прочности компонентов, но как повысить долговечность бамбука все еще остается важным вопросом.

Литература

1. *Сяо Янь, Шань Бо*. Современные бамбуковые конструкции [М]. Пекин: Издательство строительной индустрии Китая, 2013,8(1). с. 1-4.

2. *Сяо Янь, Ли Цзя*. Состояние и перспективы исследований современных бамбуковых конструкций [J]. Промышленная архитектура, 2015, 45(4). с. 1-6.

3. *Ху Сонглинь*. Предварительное исследование бамбуковых железобетонных плит [J]. Журнал Харбинского технологического института, 1956(10). с. 3-24.

4. *Чэнь Х., Хи Q. F., К. А. Haggies*. прогресс в исследовании механических свойств бамбука и его применение в гражданском строительстве[J]. Structural Engineer, 2015, 31(6). с. 208-217.

5. *Лэн Юбин, Сюй Цинфэн, Ван Минцянь*. Экспериментальное исследование сопротивления изгибу клееных бамбуковых и деревянных балок [J]. Журнал строительной конструкции, 2019, 40(7). с. 89-99.

6. Исследовательский кабинет бамбука, Нанкинский институт лесного хозяйства и промышленности. Выращивание бамбуковых лесов [М]. Пекин : Китайская сельскохозяйственная пресса, 1974. с. 225–226.

7. *Жэнь Хайцин, Чжан Дунциэн, Пан Яньхун.* Анализ процесса динамического разрушения прочности бамбука на сжатие [J]. Журнал Нанкинского лесотехнического университета (естественно-научное издание), 2007, 31(2). с. 47–50.

8. *Сяо Янь, Ян Жуйчжэнь, Шань Бо и др.* Экспериментальное исследование механических свойств клееного бамбука для получения структуры [J]. Журнал строительной конструкции, 2012, 33(11). с. 150–157.

УДК 691:624.04

Люй Цзехао,

студент

(Санкт-Петербургский государственный

архитектурно-строительный

университет)

E-mail: 13253892616@163.com

Lyu Zehao,

student

(Saint Petersburg

State University of Architecture

and Civil Engineering)

E-mail: 13253892616@163.com

ОБЗОР ПРИМЕНЕНИЯ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

OVERVIEW OF THE USE OF WOODEN STRUCTURES

Проанализированы структурный состав, силовые характеристики, сфера применения, подходящие для общих структурных систем большепролетных клееных деревянных конструкций, включая большепролетные клееные структуры, такие как структура деревянной фермы, структура деревянной сетки, деревянная арочная структура и деревянная натяжная струнная структура. В рамках четырех практических инженерных проектов, включая клееную структуру здания терминала международного аэропорта Циндао Цзяодун, крышу коридора и клееную структуру большепролетной клееной конструкции, а также сравнивались показатели механических характеристик и показатели расхода древесины различных структурных схем. Конструкция большепролетных клееных конструкций нуждается в дальнейшем совершенствовании, таких как конститутивная модель древесины, узловой анализ, влияние ползучести и влажности и анализ общей устойчивости.

Ключевые слова: структура клееного бруса, деревянная стропильная конструкция, деревянная сетчатая конструкция, деревянная оболочка, деревянная арочная конструкция.

The structural composition, power characteristics, and scope of application suitable for general structural systems of large-span glued wooden structures, including large-span glued structures such as wooden truss structure, wooden mesh structure, wooden arch structure and wooden tension string structure are analyzed. Within the framework of four practical engineering projects, including the glued structure of the terminal building of Qingdao Jiaodong International Airport, the corridor roof and the glued structure of a large-span glued structure, as well as mechanical characteristics and wood consumption indicators of various structural schemes were compared. The construction of large-span glued structures needs further improvement, such as a constitutive model of wood, nodal analysis, the effect of creep and humidity, and an analysis of overall stability.

Keywords: glued timber structure, wooden truss structure, wooden mesh structure, wooden mesh shell structure, wooden arch structure.

Клееные деревянные конструкции (КДК) – это инженерный древесный продукт, изготовленный из склеивания древесных ламелей вдоль направления волокон древесины. Обычно, изготовленный из четырех или более слоев древесины, склеенных вместе. Может быть обработан в различные формы, такие как элементы переменного сечения, дуговые или свободные кривые элементы и т. д.

Поскольку при производстве клееных конструкций вырезаются пороки древесины, то распределение дефектов клееного бруса более равномерно, поэтому его прочность значительно улучшается по сравнению с прочностью пиломатериалов. Это способствует расширению области использования и повышению коэффициента использования древесных ресурсов.

Клееные конструкции впервые возникли в Европе, используются уже более 100 лет, широко используется и в Северной Америке для большепролетных зданий [1-3]. Было много практических инженерных случаев, таких как Стадион Такома Доум, США, диаметр 162 м, самая высокая часть купола 45,7 м; Японский народный спортивный центр города Кокуни, с максимальным пролетом 56 м; Олимпийская арена Хамар (Норвегия), с максимальным пролетом 70 м; Олимпийский конькобежный стадион в Ричмонде (Канада), максимальный пролет 100 м. В последние годы клееные структуры быстро развивались во всем мире из-за погодных факторов.

Согласно исследованиям, углеродный след деревянных каркасных зданий вдвое меньше, чем у других материалов, что может прекрасно решить климатическую проблему.

Большепролетную деревянную конструкцию можно условно разделить на: деревянную стропильную конструкцию, деревянную сетчатую конструкцию, деревянную арочную конструкцию и деревянную натяжную струнную структуру.

Деревянная стропильная конструкция представляет собой решетчатую систему, состоящую из деревянных элементов, узлы в основном шарнирные, под действием внешней силы деревянные элементы в ферме в основном несут осевую силу (см. рис.).

По материалу, используемому в нижней хорде, деревянную ферму можно разделить на чистую деревянную ферму и сталелесовую ферму.

Сталь и деревянная ферма обычно используется в конструкциях крыши с большим пролетом. Обычно нижняя хорда заменяется круглой сталью или секционной сталью, потому что растяжение древесины является хрупким разрушением, а прочность и модуль упругости стали намного выше, чем у дерева. Использование стали деревянной фермы позволяет улучшить жесткость фермы, уменьшить деформацию и добиться большего пролета.

Деревянную ферму можно разделить на пространственную деревянную ферму и плоскую деревянную ферму по пространственному расположению компонентов. По своей форме делится на треугольный, прямоугольный, трапециевидный и полигональный типы, конкретная форма определяется по конструкции крыши, пролету, форме и другим факторам.



Деревянная стропильная крыша

Деревянная сетчатая конструкция, как и стальная сетчатая конструкция, представляет собой пространственную сетчатую стержневую систему, состоящую из нескольких деревянных столбов, объединенных в соответствии с определенными правилами.

В соединении стальные соединители обычно используются для соединения деревянных стержней, а общие методы соединения включают болтовые соединения и соединения арматурной втулки.

Деревянная сетчатая конструкция имеет характеристики большой пространственной жесткости и однородных спецификаций компонентов и в основном используется в общественных зданиях. Элементы деревянной сетчатой конструкции в основном подвергаются осевой силе, а свойства материала проявляются в полной мере.

Деревянная сетчатая конструкция оболочки относится к системе пространственной структуры, образованной правильным расположением деревянных компонентов вдоль сферической поверхности или цилиндра, ее силовые характеристики аналогичны характеристикам тонкой структуры оболочки, и большая часть нагрузки несет осевая сила элемента оболочки сетки [1].

Деревянный стержень может быть прямым или изогнутым, чтобы приблизиться к эффекту сферической или цилиндрической поверхности. Сферическая сетчатая оболочка имеет красивую форму, разумную силу и большой пролет, что очень подходит для больших общественных зданий, таких как спортивные площадки, и является идеальной формой большого пролета космической деревянной конструкции [4].

Деревянная арочная конструкция представляет собой своего рода изогнутую плоскую конструкцию, которая в основном несет осевое давление и поддерживает равновесие за счет тяги на обоих концах, что является относительно экономичной структурной системой для достижения большого пролета.

Деревянная арочная конструкция может придать полную силу свойствам материала. Наличие горизонтальной тяги эффективно снижает изгибающий момент компонента, благодаря чему деревянная арка может придать полноценную игру производительности древесины под давлением. В то же время вертикальная составляющая давления в поперечном сечении компонента уравнивает общую силу сдвига конструкции, так что внутреннее напряжение сдвига конструкции уменьшается, а распределение напряжений равномерно, поэтому деревянная арочная конструкция также является идеальной формой для большепролетной деревянной конструкции.

КДК является идеальным материалом для изготовления деревянных арочных конструкций, который может достичь большого

поперечного сечения, необходимого для большепролетных деревянных арок, и в то же время КДК может быть изготовлена в виде криволинейных конструкций.

Деревянная натяжная конструкция состоит из жестких деревянных элементов с высокой жесткостью, гибких стальных тросов и стальных или деревянных стоек.

Деревянная натяжная струнная балка является более распространенной деревянной натяжной конструкцией, которая в основном состоит из трех частей, а именно жесткой деревянной балки, гибкого кабеля и стойки.

Жесткие деревянные балки также могут быть деревянными арками или фермами, а стойки могут быть изготовлены из стали или деревянных столбов. Гибкий трос, как правило, представляет собой стальной трос, и стальной трос в структуре натяжной струны участвует в работе, так что жесткость деревянного натяжного струнного элемента больше, чем жесткость простого жесткого элемента, и в то же время регулируется внутреннее распределение силы деревянного компонента.

Деревянная натяжная струнная конструкция представляет собой самобалансирующуюся систему напряжений, которая требует, чтобы стальные струны были надежно закреплены на концах деревянных стержней [5-6].

В процессе разработки современной большепролетной деревянной конструкции, с целью достижения большего пролета и получения более широкого спектра применения, наблюдается тенденция технического облика, с точки зрения процедуры соединения технологии деревянного строительства.

Включая композит материалов, композит конструкций и композит конструкций.

Прежде всего, традиционная древесина из-за своих собственных дефектов и ограничений, нуждается в улучшении свойств для формирования композитной древесины, но также должна сочетаться с другими материалами, чтобы достигать синергии их соответствующих преимуществ.

Во-вторых, традиционное большепролетное деревянное строение имеет относительно единую структурную форму, которая

сложно удовлетворить структурные и пространственные требования современного большого пространства, поэтому необходимо искать эталонную и комбинированную разработку разнообразных конструктивных методов.

Во-третьих, из-за композита материалов и конструкций связь между материалами стала более сложной, и для того, чтобы добиться прочности конструкции и красоты узлов одновременно, в структуре используются разнообразные материалы и методы композита.

С точки зрения материалов, появление и развитие инженерной древесины, представленной ламинированной древесиной, заложило основу для развития современных большепролетных конструкций и заставило древесины полностью пересечь границы традиционной технологии.

Клееная древесина имеет множество преимуществ с точки зрения свойств материала [7]:

- во-первых, поскольку он полностью высушен во время обработки, он может обеспечить стабильность размера и формы компонентов после строительства;
- во-вторых, плита отбраковывает дефект и становится промышленным продуктом после искусственной и разумной конфигурации, что позволяет эффективно избежать неконтролируемого индивидуального отклонения натуральной древесины, и обладает относительно равномерной конструкционной прочностью;
- в-третьих, размер и форма ламинированной древесины больше не ограничены природой, а конструкционные пиломатериалы с большими сечениями и различными формами могут быть изготовлены в соответствии с потребностями проектирования.

Различные материалы применяются для формирования большепролетной деревянной конструкции. Наиболее распространенным композитным методом является композит из деревянной конструкции, стальной конструкции и железобетонной конструкции. Его структурное разделение компетенций обычно таково:

- деревянная структура, как основная структура и основная форма выражения, определяет общую структурную форму и пространственные модельные характеристики здания;
- стальная конструкция перемежается с деревянной конструкцией как вспомогательная конструкция для обеспечения

устойчивости основной конструкции, и в то же время применяется к сложным механическим требованиям стыка в конструкции соединения;

- железобетонные конструкции часто используют в качестве фундамента и стены здания, избегая прямого контакта между деревянной конструкцией и грунтом и повышая устойчивость здания в целом.

Например, стадион Идзумо в Японии [8] является типичным примером такого композитного сооружения. Здание в основном представляет собой деревянную конструкцию, сочетающую полимерную пленку, сталь, железобетонную конструкцию для формирования композитной конструкции.

Одним из самых сложных и важных аспектов проектирования современных большепролетных деревянных зданий является проектирование узловой конструкции. В зданиях с большепролетными конструкциями из-за относительно большого пролета конструкции и масштаба компонентов традиционная структурная форма сочетает стальные соединители деревянные компоненты.

Наиболее часто в современных большепролетных деревянных конструкциях используются металлические узлы. Привычным способом является вставка стальных пластин и деревянных компонентов на стык клееного дерева и фиксация, стальные пластины соединяются болтами и другими стальными компонентами. Эти методы соединений стальных конструкций позволяют эффективно решать структурные проблемы стыков и привносить новые прорывы в моделирование деревянных конструкций. Принцип соединения заключается в использовании стальных компонентов и цементирующих агентов для совместной работы. Например, стыки фермы крыши японской гимназии горожан Кококу [5] представляют собой композитные стыки.

Современные большепролетные деревянные здания, с хорошей экологией, уникальной формой и изысканной технологией, будут играть все более важную роль в современных общественных зданиях [6]. Понимание тенденции технического композита большепролетной деревянной структуры может позволить нам лучше изучить направление ее развития.

Литература

1. Гун Сяонань. Обобщенная теория композитного фундамента и инженерное применение. Китайский журнал геотехнической инженерии, 2007,29(1):1-13.
2. Гун Сяонань. Условия формирования композитных фундаментов вертикальных арматур. Лечение фундамента, 1995, 6(3): 48.
3. Техническая спецификация композитного фундамента: GB/T 50783—2012 [S] Пекин : Китайская плановая пресса, 2012 г.
4. Хэ Чэнь. Исследование современной крупнопролетной деревянной конструкции с помощью композитной технологии. Лесная промышленность, 2011, 38(6): 49–53.
5. Хэ Миньцзюань, Донг Ханьлинь, Ли Чжэн. Состояние исследований и ключевые проблемы структуры пространства древесины. Строй, 2016, 46(12): 103–109, 96.
6. У Сяобинь, Чэнь Хуань, Инь Цзе и др. Исследование применения структуры клееной арки Чжана в машиностроении. Строй, 2020, 50(19): 30–34, 50.
7. MCCONNELL E, MCPOLIN D, TAYLOR S. Постнатяжение клееного бруса стальными сухожилиями [J]. Строительство и строительные материалы, 2014, 73:426-433.
8. Тойо Ито, Окун Шухайб, И Хиса Джэ]. [Н Архитектура: 1997(9):147-160 9.Свен Тельандерссон, Ханс Й. Ларсен. Лесотехника [М]. ВИЛЕЙ, 2003 г.
9. Люс Славед. Чжоу Симинь, Чэнь Хаймин, перевод Му Цзянь [М], Кинжал Цзин: China Electric Power Press, 2007 г.

УДК 694.1

Сюй Кайсюань,

студент

(Санкт-Петербургский государственный

архитектурно-строительный

университет)

E-mail: 1336526953@qq.com

Xu Kaixuan,

student

(Saint Petersburg

State University of Architecture

and Civil Engineering)

E-mail: 1336526953@qq.com

ИССЛЕДОВАНИЕ АРМИРОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КДК

STUDY OF REINFORCEMENT OF CDK ELEMENTS

Клееные деревянные конструкции эстетически привлекательны, энергоэффективны и экологичны, и широко используются в современном деревянном строительстве. Древесина является анизотропным природным материалом с низкой прочностью на сдвиг и растяжение в гладком зерне. Клееная деревянная древесина улучшает использование древесины, эффективно предотвращает дефекты древесины и придает компонентам высокую прочность и долговечность. Как основной несущий элемент в деревянных конструкциях, несущие свойства клееной древесины имеют решающее значение для безопасности всей конструкции. В данной статье описаны несколько типов повреждений конструкций из клееной древесины и предложены методы ремонта или улучшения характеристик конструкций из клееной древесины, которые могут послужить ориентиром для аналогичных исследований по укреплению конструкций из клееной древесины.

Ключевые слова: клееные деревянные конструкции, формы повреждений, методы усиления, армированные волокном пластики/полимеры.

Glued wooden structures are aesthetically attractive, energy efficient and environmentally friendly, and are widely used in modern wooden construction. Wood is an anisotropic natural material with low shear and tensile strength in smooth grain. Glued wooden wood improves the use of wood, effectively prevents wood defects and gives the components high strength and durability. As the main load-bearing element in wooden structures, the load-bearing properties of glued wood are crucial for the safety of the entire structure. This article describes several types of damage to glued wood structures and suggests methods for repairing or improving the characteristics of glued wood structures, which can serve as a guideline for similar studies on strengthening glued wood structures.

Keywords: glued wooden structures, forms of damage, reinforcement methods, fiber-reinforced plastics/polymers.

Формы деструкции клееных деревянных конструкций

В конструкциях из клееной древесины, на которые влияют различные факторы, такие как изменение влажности и изменение

климата, когда древесина остается во влажной среде в течение длительного периода времени, в ней могут развиваться грибки, что может привести и к гниению, и конструкция может пострадать от снижения несущей способности и чрезмерной деформации. Механические и биологические повреждения также могут привести к снижению несущей способности конструкции. При превышении определенной силы напряжения это может привести к различным видам повреждений, таким как трещины, изгиб, сжатие, растяжение или сдвиг.

Повреждения при растрескивании. Клееные деревянные конструкции подвержены влиянию окружающей среды. Изменения внешней температуры и влажности в процессе обработки и использования древесины могут вызвать различное содержание влаги или уровень сушки в различных частях древесины, что приводит к непоследовательной усадке внутри и снаружи древесных волокон, что приводит к усадке или расширению в поперечном сечении. Неравномерное распределение содержания воды в поперечном сечении или стесненная деформация могут привести к изменению внутренних напряжений, что приводит к образованию трещин. В процессе эксплуатации конструкции из клееной многослойной древесины подвергаются длительным нагрузкам, которые, наряду со старением древесины, снижают их свойства на растяжение, сжатие, изгиб и сдвиг, что приводит к образованию трещин под действием внешних сил. Количество и распределение трещин зависит от нескольких факторов, таких как древесина, дефекты, условия нагрузки, форма балки и качество клееных элементов.

Повреждение при изгибе. Древесное волокно отрывается и повреждается при изгибе, а изгиб приводит к распределению напряжения продольного растяжения и сжатия по поперечному сечению. Растягивающее напряжение приводит к повреждению хрупкости. Продольное сжимающее напряжение вызывает упругую и пластическую деформацию. Из-за естественных дефектов прочность на растяжение может быть снижена по сравнению с прочностью на сжатие. Таким образом, повреждение при изгибе в основном вызвано хрупким повреждением деревянной балки в зоне растяжения. Повреждение при изгибе классифицируется как критическое повреждение, которое может привести к повреждению всего конструктивного элемента.

Повреждение при сжатии. Повреждения при продольных сжимающих напряжениях возникают в основном в деревянных фермах, балках или колоннах. Повреждение при сжимающих напряжениях также можно назвать вязким повреждением в результате пластической деформации и происходит в основном в креплениях или в высоконагруженных точках нагрузки. В этом случае пластические деформации могут привести к эксцентриситету и перераспределению нагрузки во всей конструкции, что может привести к перенапряжению элементов конструкции и повлиять на общую устойчивость конструкции.

Повреждение при растяжении. Когда растягивающие напряжения превышают способность к растяжению, происходит хрупкое повреждение древесины. При растяжении в нижней части деревянных балок повреждение чаще всего происходит при растягивающих напряжениях перпендикулярно волокнам из-за низкой прочности на растяжение перпендикулярно волокнам древесины (которая практически равна нулю из-за естественных дефектов). Поэтому изделия из древесины в основном оптимизируются для увеличения прочности на растяжение перпендикулярно направлению волокон.

Повреждение от сдвига. В большинстве случаев изгибающие напряжения и предельные прогибы определяют конструкцию элемента. Как правило, напряжение сдвига в балке достигает своего максимального значения вблизи опоры. Кроме того, балки с торцевыми срезами и балки с отверстиями могут привести к концентрации напряжений сдвига [1]. В повреждениях, вызванных сдвиговыми напряжениями, преобладает скольжение волокон, и они рассматриваются как хрупкие повреждения. Большинство трещин закрыты, и поэтому трудно определить, находятся ли они на конце балки.

Способы усиления и ремонта клееных деревянных конструкций

Ремонт усадочных трещин. Как правило, ремонт трещин проводится в сочетании с другими мерами по усилению. Для конструкций из клееной древесины обычно требуется ремонт усадочных трещин в зонах высоких сдвиговых и растягивающих напряжений, перпендикулярных волокнам древесины. При ширине трещин менее 10 мм ремонт может быть выполнен путем впрыскивания связующего ве-

щества [2]. С помощью пилы, рубанка или шлифовальной машины трещины разрезают, чтобы создать чистую щель. Перед заполнением щели очищаются, а также подготавливаются отверстия для заполнения и вентиляции. В качестве клеящего вещества обычно используется тиксотропная эпоксидная смола.

Замена поврежденных элементов. Основными компонентами древесины являются целлюлоза, полисахариды гемицеллюлозы, лигнин и т.д. Когда древесина гниет, она легче повреждается грибами и насекомыми, в результате чего древесина становится пористой и рыхлой, что делает ее менее прочной. Это повреждение обычно происходит локально в балках, в конце, где древесина находится в непосредственном контакте с несущей стеной. В этом случае остальная часть балки обычно находится в хорошем состоянии. Другие виды случайных повреждений, например, повреждение огнем, могут привести к уменьшению поперечного сечения элемента, что приводит к недостатку прочности и жесткости. Сгнившие и поврежденные элементы должны быть заменены, а сами элементы отремонтированы для восстановления несущей способности элементов. Метод ремонта заключается в замене поврежденного участка новой деревянной конструкцией, которая крепится к исходной балке с помощью вставки с деревянными гвоздями или клея.

Использование армированного волокнами композита *FRP*. Композиты *FRP* (*fiber reinforced plastics/polymer*) – это высокоэффективные материалы, образованные путем смешивания волокнистых материалов с матричным материалом (смолой) в определенном соотношении. В проектах по усилению конструкций полимеры, армированные волокнами (*FRP*) [3], используются для соединения с древесиной в оригинальных балках из клееного бруса. Композиты *FRP* обладают такими преимуществами, как легкий вес, хорошие несущие свойства и простота конструкции, и в основном используются для усиления деревянных балок и колонн.

Ремонт армированной стали. Для повышения прочности на изгиб и жесткости балок из клееной древесины добавляются соответствующие усиливающие элементы. Усиливающие элементы могут быть в виде стержней, пластин, саморезов или других конструкций, которые крепятся к балке с помощью механических креплений или

клея. Эти усиливающие элементы в основном изготавливаются из стали и могут быть размещены внутри или снаружи балки.

Армирующие элементы часто используются для усиления клееных деревянных материалов. Поскольку деревянные балки обычно разрушаются при растяжении хрупким образом, размещение арматуры на растягивающей стороне балки очень эффективно для увеличения прочности на изгиб. При увеличении доли растягивающей арматуры нейтральная ось балки перемещается к нижней части балки. В результате сжимающая деформация в древесине увеличивается по сравнению с растягивающей деформацией, и может произойти сжимающая деформация, прежде чем древесина окончательно разрушится при растяжении.

Klieger и др [4] исследовали влияние распределения арматуры между поверхностями растяжения и сжатия на прочность и жесткость при изгибе при усилении балок из клееной древесины. Для достижения максимальной прочности 75 % арматуры должно быть размещено внизу, а 25 % вверху. Для достижения максимальной пластичности вся арматура должна располагаться внизу. Максимальная жесткость достигается, когда арматура равномерно распределена между верхней и нижней поверхностями.

Повреждения от разрушения при растяжении волокон перпендикулярно балкам из клееной древесины могут возникать в вырезанных балках, вокруг отверстий и в изогнутых или наклонно изогнутых балках. В этих случаях для усиления конструкции из клееной многослойной древесины можно использовать внутреннее или внешнее армирование. Виды внутреннего усиления включают саморезы, стальные стержни с резьбой и т. д. Внешнее усиление достигается путем механического соединения или склеивания с фанерой или *FRP*-панелями.

Akbiyik и др [5] исследовали усиление на сдвиг горизонтально разделенных конструкций ферм из клееной древесины с использованием болтов с шестигранной головкой, болтов с квадратной головкой и фанеры. Болты были клеены эпоксидной смолой в вертикальные отверстия, просверленные сверху. Винты с квадратной головкой устанавливались под углом 45° по вертикали, а фанера прикручивалась к боковым сторонам балок. Все виды ремонта оказа-

лись эффективными, при этом среднее увеличение остаточного напряжения сдвига составило 62 %.

Заключение

В данной статье рассматриваются возможные формы повреждения конструкций из клееной древесины и широко используемые меры по их усилению. Основные выводы следующие:

Под воздействием окружающей среды, например, изменения температуры и влажности воздуха, клееные деревянные конструкции могут растрескиваться в различной степени, что приводит к снижению всех несущих способностей и увеличению деформации. В большинстве поврежденных элементов древесины трещины будут развиваться в направлении волокон, что в конечном итоге приведет к различным видам повреждений, таким как изгиб, сжатие, растяжение или сдвиг.

В этой статье подробно рассматриваются методы армирования конструкций из клееной древесины, но все они имеют ограничения. Существует множество видов армирования конструкций из клееной древесины. При нормальных обстоятельствах различные схемы используются в сочетании друг с другом, и они используются целенаправленно в соответствии с конкретным случаем.

Литература

1. Цзо Хунлян, Лу Цзяньсинь, Сюй Сяньи и др. Влияние мер усиления пальцевого соединения нижней доски на характеристики изгиба клееной деревянной балки [J]. Журнал Северо-Восточного лесного университета, 2018, 46(10): 67–70.
2. Чжан Дачжао. Исследование характеристик колонн и балок из углепластика, армированных деревянной тканью [D]. Шанхай: Университет Тунцзи, 2003 г.
3. Ян Хуэйфэн, Лю Вэйцин. Исследование изгибающих свойств клееных деревянных балок, армированных стеклопластиком [J]. Журнал строительной структуры, 2007, (01): 64-71.
4. Klinger R., Jonasson M., Crocetti R. Strengthening timber with CFRP or steel plates engthening timber with CFRP or st[C]// Proceedings of World Conference on Timber Engineering, Miyazaki, Japan: 2008 г.
5. Akbiyik A., Lamanna A. J., Hale W. M. Feasibility investigation of the shear repair of timber stringers with horizontal splits [J]. Construction Building Materials, 2007,21(5):991-1000.

УДК 624.044.2

Андрей Эдуардович Софронов,
студент
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный
университет)
E-mail: a.sofronov2017@gmail.com

Andrey Eduardovich Sofronov,
student
(Saint Petersburg
State University of Architecture
and Civil Engineering)
E-mail: a.sofronov2017@gmail.com

АНАЛИЗ ОБОЛОЧЕЧНЫХ СТЕРЖНЕВЫХ СИСТЕМ

ANALYSIS OF SHELL ROD SYSTEMS

В данной статье рассматриваются анализ напряженных состояний оболочечных стержневых системах в различных геометрических условиях, такие как квадратное и прямоугольное расположение. Несмотря на одинаковые сечения стержней, вылет стрелы и проемы, разница планов влияет на общее изменение напряженного состояние оболочки. Для получения точных результатов было проведено несколько сравнительных расчетов для оболочек на разных планах (прямоугольные, квадратные), с разными геометрическими параметрами (длина пролеты, высота подъема стрелы). Оболочки имеют диафрагмы жесткости по контуру, для более правильного задания расчетной схемы, зададим шарнирные опоры по периметру.

Ключевые слова: деревянные конструкции, параболоид, напряженно-деформированное состояние, сравнение конструкций.

This article discusses the analysis of stress states of shell rod systems in various geometric conditions, such as square and rectangular arrangement. Despite the same cross-sections of rods, boom reach and openings, the difference in plans affects the overall change in the stressed state of the shell. To obtain accurate results, several comparative calculations were carried out for shells on different plans (rectangular, square), with different geometric parameters (span length, boom height). The shells have stiffening diaphragms along the contour, for a more correct assignment of the design scheme, we will set the hinge supports along the perimeter.

Keywords: wooden structures, paraboloid, stress-strain state, comparison of structures.

Необходимо отметить, что клееные деревянные конструкции требуют к себе более бережного отношения, чем традиционные конструкции из железобетона и стали, и на сегодняшний день они еще не стали типовыми конструкциями массового изготовления [1, 2].

В статически неопределимых конструкциях, у которых распределение усилий обусловлено характером изменения жесткости,

помимо процесса внутренних итераций, требуемого для уточнения жесткостей, необходим сочетающийся с ним процесс внешних итераций, уточняющий по данным жесткостям закон распределения усилий. Сочетание процессов внутренних и внешних итераций в решении задачи о напряженном и деформированном состоянии статически неопределимых нелинейно- и неравновесно-деформируемых систем с помощью последовательных приближений заключается в следующем

1) в обычной упруго-линейной постановке известными приемами строительной механики решается заданная статически неопределимая система и устанавливаются эпюры внутренних усилий (нулевое приближение);

2) назначаются сечения, в которых по данным об усилиях с помощью внутреннего процесса итераций уточняются расчетные жесткости;

3) по новому закону распределения жесткостей повторяется статический расчет системы с учетом переменности вдоль пролетов расчетных жесткостей. Этим уточняются эпюры распределения усилий вдоль осей системы (первое приближение);

4) по усилиям первого приближения вновь уточняются расчетные жесткости, а по ним находятся эпюры усилий во втором приближении и т.д. до стабильной сходимости с заданной степенью точности [3, 4].

Для задания оболочек в расчетном комплексе были использованы формулы прямоугольного параболоида

$$z = \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} \quad (1)$$

$$Z = ax^2 + by^2, \quad (2)$$

где z – высота поверхности в каждой точке, x и y — координаты точки на плоскости, a и b – параметры, определяющие форму параболоида.

Чтобы определить наиболее рациональное расположения отверстий в гиперболических оболочках, был проведен сравнительный анализ напряженного состояния оболочек положительной и отрицательной гауссовых кривизны при помощи расчетного комплекса ЛИРА САПР. Для получения точных результатов было проведено

несколько сравнительных расчетов для оболочек на разных планах (прямоугольные, квадратные), с разными геометрическими параметрами (длина пролеты, высота подъема стрелы). Поскольку оболочки имеют диафрагмы жесткости по контуру, для более правильного задания расчетной схемы, зададим шарнирные опоры по периметру. К оболочкам была приложена равномерная нагрузка, эквивалентная собственному весу.

Расчет проводился для геометрических характеристик такие как размеры оболочки в различных планах, для наглядности приведен сравнительный анализ двух оболочек на квадратном плане и прямоугольном (рис. 1, 2), чьи геометрические характеристики приведены в таблице.

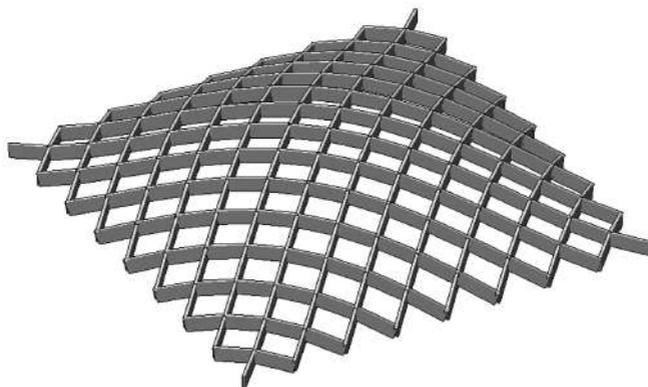


Рис. 1. Схема оболочки квадратного плана

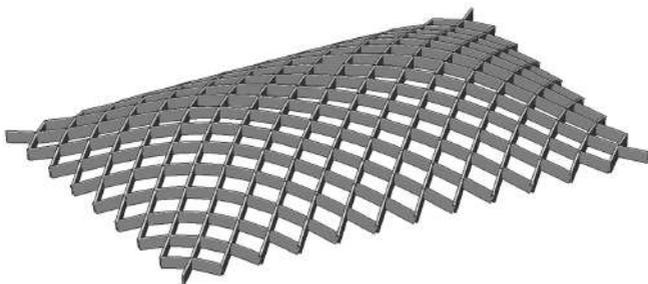


Рис. 2. Схема оболочки прямоугольного плана

Геометрические характеристики оболочек

Параметры	Оболочка прямоугольного плана	Оболочка квадратного плана
Геометрия плана (м)	48×72	48×48
Стрела подъема f_1 (м)	8	8
Функция плоскости оболочки [3]	$z = \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2}$	$Z = ax^2 + by^2$
Размеры сечений стержней	160×30	160×30

По результатам линейного расчета оболочек, характеристики которых указаны в таблице 1, методом МКЭ в ЛИРА САПР получены следующие результаты (рис. 3, 4):

1) Для оболочки квадратного плана

a) Собственный вес ДК/DL_DS
Мозаика N
Единицы измерения - т

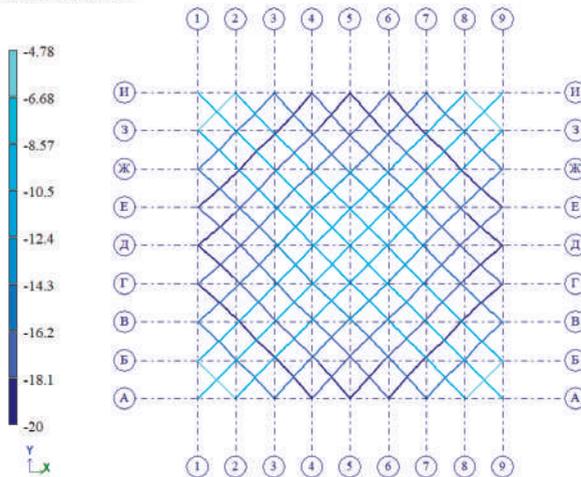


Рис. 3, начало. Поля усилий в оболочке квадратного параболоида:
a – поля усилий N_x

б) Собственный вес ДК/ДЛ_DS
 Мозаика Qy
 Единицы измерения - т

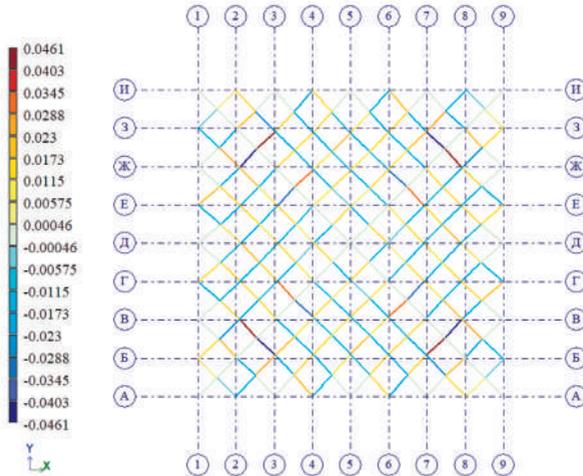


Рис. 3, окончание. Поля усилий в оболочке квадратного параболоида:
 \bar{b} – поля усилий N_y

По всей поверхности оболочки возникают отрицательные усилия, следовательно, оболочка испытывает сжатие по всех направлениях. В центральной зоне оболочки располагаются усредненные значения сжимающих усилий. В угловых опущенных зонах возникают главные растягивающие напряжения в элементах оболочки.

2) Для оболочки прямоугольного плана

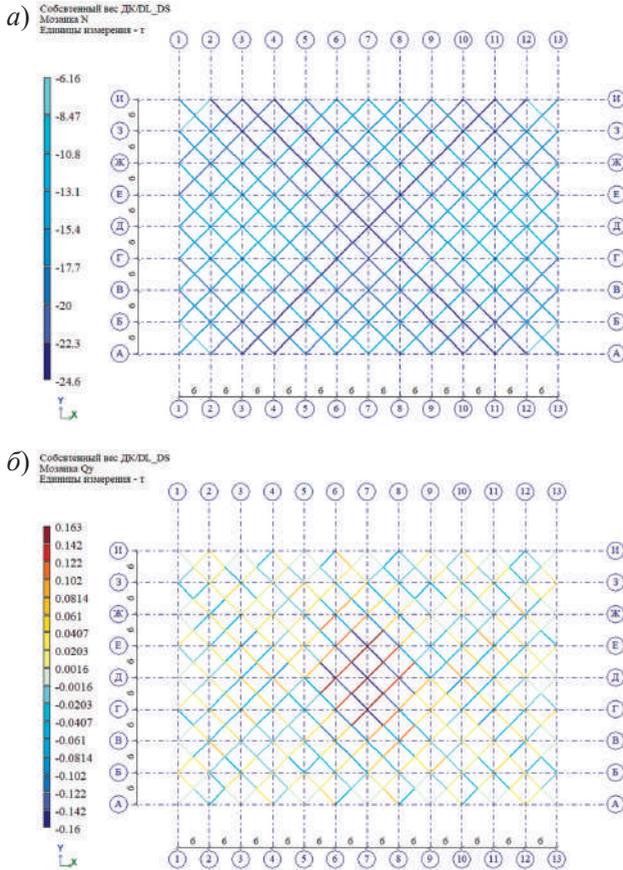


Рис. 4. Поля усилий в оболочке прямоугольного параболоида:
 a – поля усилий N_x ; b – поля усилий N_y

По всей поверхности оболочки возникают отрицательные усилия, следовательно, оболочка испытывает сжатие по всей оболочке в двух направлениях. В центральной зоне оболочки располагаются усредненные значения растягивающих усилий. В угловых опущенных зонах возникают главные сжимающие напряжения в элементах оболочки.

Исходя из результатов анализа видно, что положения усилий в стрелках абсолютно разная. Квадратная форма оболочки имеет сжатую зону по центру, а растянутую по углам. Прямоугольная форма оболочки имеет растянутую зону по центру, сжатую по углам.

Таким образом можно предположить, несмотря на одинаковые сечения стержней, вылет стрелы и проемы, разница планов влияет на общее изменение напряженного состояние оболочки.

Литература

1. *Зубарев Г. Н., Бойтемиров Ф. А., Головина В. М., Ковликов В. И., Улицкая Э. М.* Конструкции из дерева и пластмасс. // М. : Изд. Центр «Академия», 2003. – 304 с.
2. *Калугин А. В.* Клеевые деревянные конструкции в современном строительстве// Промышленное и гражданское строительство. – 2011 г. – № 7(2). – С. 32–37.
3. *Бондаренко В. М.* Некоторые вопросы нелинейной теории железобетона Харьков / Бондаренко В. М. Изд. ХГУ, 1968. – 323 с.
4. *Бондаренко В. М., Бондаренко С. В.* Инженерные методы нелинейной теории железобетона. / Бондаренко В. М. М. :Стройиздат, 1982 г. – 287 с.

УДК 691

Василий Юрьевич Чернов,
канд. техн. наук, доцент
Евгений Сергеевич Шарапов,
профессор
Елена Михайловна Мальцева,
студент
(Поволжский государственный
технологический университет)
E-mail: chernovvy@volgatech.net,
sharapoves@volgatech.net,
malzeva@volgatech.net

Vasilii Yuryevich Chernov,
PhD in Sci. Tech., Associate Professor
Evgenii Sergeevich Sharapov,
Professor
Elena Mikhaylovna Malzeva,
student
(Volga State
Technological University)
E-mail: chernovvy@volgatech.net,
sharapoves@volgatech.net,
malzeva@volgatech.net

АКТУАЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ СТАНДАРТИЗАЦИИ ТЕРМОДРЕВБЕТОНА И ИЗДЕЛИЙ ИЗ НЕГО

CURRENT TASKS OF STANDARDIZATION OF THERMOWOOD CONCRETE AND PRODUCTS FROM IT

Рассмотрены вопросы разработки инновационного строительного материала из термодревесно-цементной композиции, а также основные вопросы его стандартизации. Предложены направления по сертификации нового строительного материала.

Ключевые слова: строительные материалы, термодревбетон, ТДБ, добровольная сертификация, декларирование, качественные характеристики.

The issues of development of innovative construction material made of thermally modified timber and cement and also the main issues of its standardization are given in this article. There are also some ways of the new construction material certification.

Keywords: construction materials, thermal concrete, TDB, voluntary certification, declaration, quality characteristics.

Одним из важнейших локомотивов развития экономики России является строительная отрасль. Поэтому в настоящее время на уровне государства уделяется большое внимание развитию эффективных технологий в различных направлениях науки и техники в том числе и в строительстве, и в производстве современных востребованных материалов. При этом разработки и исследования современных эффективных строительных материалов является одной из приоритетных задач. Однако это сложный процесс, требующий времени

и средств, государственной поддержки. В настоящее время на правительственном уровне решаются вопросы связанные с необходимостью модернизации всей отрасли строительства. На основе чего была разработана и утверждена стратегия развития промышленности строительных материалов и индустрии домостроения до 2030 года. Это было связано с отраслевыми проблемами, копившимися годами, а именно с недостаточностью применения инновационных решений в промышленном получении строительных материалов, а также в использование устаревших энергозатратных технологических производственных процессов.

В рамках данной стратегии особое внимание уделяется вопросам модернизация действующих компаний из области строительства, реализация пилотных проектов по производству и внедрению современных эффективных строительных материалов и технологий, которые позволят поднять отрасль на новый, более качественный уровень. Также отмечена возможность использования отходов промышленных предприятий в производстве строительных материалов [1].

В настоящее время в Поволжском государственном технологическом университете, командой, под руководством канд. техн. наук, доцента Чернова Василия Юрьевича, а также при поддержке Российского научного фонда № 22-79-00098 [2] выполняются разработки и исследования инновационного композитного материала на основе термически модифицированного органического заполнителя с использованием гидравлических вяжущих, который получил название термодревбетон. Материал базируется на оригинальной научной идее, которая заключается в применении измельченной до определенных размеров и формы термически модифицированной древесины (ТМД).

Именно использование ТМД позволяет:

- 1) уменьшить содержание растворенных экстрактивных веществ и различных кислот;
- 2) повысить пористость и снизить плотность древесины. В связи с этим улучшаются тепло- и звукоизоляционные свойства изделия;
- 3) существенно уменьшить степень гигроскопичности и, как следствие, стабилизировать формы и размеры;

4) решить проблему образования грибных поражений, что актуально и для материалов с небольшой плотностью даже с применением гидравлических вяжущих;

5) увеличить срок эксплуатации, а также повысить безопасность использования и экологическую чистоту материала.

Однако, для достижения высоких показателей термодревбетона, необходимо провести ряд научно-исследовательских работ по определению основных свойств разрабатываемого материала, а также установить влияние рецептурных факторов и способов получения изделия. Также для создания производства готовых изделий и конструкций на линии конвейерного типа, необходимо: выполнить опытно-конструкторские работы, отладить технологический процесс производства [3]. Технологические свойства инновационного материала отличаются от стандартных характеристик бетонов. Исходя из этого, для достижения качественных показателей необходимо создание новых технологических процессов, а также дополнительной нормативно-технической базы.

В России, в соответствии с законодательством, все строительные изделия должны соответствовать нормам, указанным в стандартах. Однако, в отношении строительных и отделочных материалов не установлена обязательная сертификация [4]. Поэтому данная сертификация носит добровольный характер. Осуществляется данная форма соответствия по инициативе заявителя. Показатели качества конкретных изделий берут по положениям международных стандартов или по документам, устанавливающим технические требования при производстве.

Проводить процедуру сертификации может только аккредитованная испытательная лаборатория (ИЛ). Лаборатория несет ответственность за все подписанные сертификаты. В них указывается вся степень соответствия требованиям, указанным в нормативно-технической документации. В требования входят состав изделия, его физико-химические показатели качества, эксплуатация и утилизация.

Рассмотрим сертификацию термодревбетона, на примере ближайшего аналога – арболита.

Согласно ГОСТ 19222-2019 «Арболит и изделия из него. Общие технические условия» [5] изделие проверяют по следующим

показателям: вид вяжущего вещества; отверждение; геометрические размеры; прочность на осевое растяжение, сжатие, растяжение при изгибе; морозостойкость; плотность; паропроницаемость; теплопроводность; водопоглощение и влажность.

Так как арболит часто используют в качестве теплоизоляционного материала, аккредитованная испытательная лаборатория также проверяет следующие показатели: горючесть, воспламеняемость, токсичность и дымообразование.

Однако, есть большая вероятность, что форма сертификации для строительных изделий изменится. Согласно опубликованному в 2017 году проекту Технического регламента «О безопасности строительных материалов и изделий» [6], арболит будет подлежать обязательному подтверждению соответствия в форме декларирования.

Рассмотрим плюсы и минусы такого перехода форм соответствия. Плюсом для потребителя является гарантия соответствия изделия всем требованиям и нормам безопасности. Так как декларация соответствия гарантирует безопасное использование строительного изделия по его целевому назначению [7]. Для производителя, переход с добровольной на обязательную сертификацию может вызвать ряд проблем. Проблемы связаны с большими затратами на услуги органа по сертификации, сложность нахождения и расположения аккредитованной испытательной лаборатории, большой перечень проверяемых показателей материала, а также сложность выбора схем сертификации (некоторые схемы обязуют сертификации системы менеджмента качества предприятия).

В ходе декларирования арболита по данному проекту, в перечень проверяемых показателей входят: прочность на сжатие, прочность на растяжение осевое, прочность на растяжение при изгибе, прочность на растяжение при раскалывании, прочность при срезе, модуль упругости, относительная деформация ползучести при сжатии и растяжении, показатель однородности размеров пор, тепловыделение, теплопроводность, теплоемкость, электрическое сопротивление, морозостойкость, истираемость, термостойкость, огнестойкость, огнеупорность, кавитационная стойкость, усадка, набухание, предельная сжимаемость, предельная растяжимость, характеристика ползучести, влажность по массе, водопоглощение

по массе; , проницаемость различными жидкостями и газами, водонепроницаемость, полный объем пор по объему, объем открытых капиллярных пор по объему, объем открытых некапиллярных пор по объему, объем условно закрытых пор по объему, показатель микрпористости.

Исходя из схожести технологических процессов производства арболита и термодревбетона, можно с уверенностью сказать, что инновационный материал будет подлежать добровольной сертификации.

Одобрение проекта Технического регламента «О безопасности строительных материалов и изделий» позволит выйти производителям на новый уровень качества строительной продукции. Однако, этим компаниям нужно быть готовым к трудозатратности процесса сертификации.

Литература

1. *Кудрявцева В. А.* Инновационные направления в сфере производства строительных материалов // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2012. № 2(3). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/innovatsionnye-napravleniya-v-sfere-proizvodstva-stroitelnyh-materialov> (дата обращения: 09.04.2023).

2. Разработка теоретических основ и технических решений получения новых эффективных композиционных материалов на основе термически модифицированного органического заполнителя и гидравлических вяжущих веществ URL: <https://rscf.ru/project/22-79-00098> (дата обращения: 5.04.2023).

3. *Чернов В. Ю., Чернов Ю. В., Носова А. Н., Мальцева Е. М., Федюков В. И.* Нормативно-технические вопросы обеспечения качества термически модифицированной древесной продукции // Качество и жизнь 2023 № 1(27) URL: <https://www.qj-journal.ru/ru/content/kachestvo-i-zhizn-no-137-2023> (дата обращения: 09.04.2023).

4. Сертификация строительной продукции URL: <https://www.novotest.ru/produksiya/sertifikatsiya-stroitelnoy-produktsii/> (дата обращения: 5.04.2023).

5. ГОСТ 19222-2019 «Арболит и изделия из него общие технические условия»: национальный стандарт Российской Федерации: дата введения 2020 – 01 – 01 / Федеральное агентство по техническому регулированию. – Изд. официальное. – Москва : Стандартинформ, 2019. – 34 с.

6. Закон Российской Федерации «проект Технический регламент «О безопасности строительных материалов и изделий» № 192544-5 // Собрание законодательства Российской Федерации.

7. Сертификация продукции: обязательная и добровольная, схемы URL: <https://www.gd.ru/articles/8595-sertifikatsiya-produktsii> (дата обращения: 09.04.2023).

Содержание

<i>Черных А. Г., Корольков Д. И., Букелиа А.</i> Обзор и анализ зарубежных моделей накопления повреждений деревянных конструкций	5
<i>Шмидт А. Б., Груничев Д. В., Груничев В. С.</i> Применение шпильки с метрической резьбой по всей длине в качестве нагеля в нагельных соединениях деревянных конструкций.	18
<i>Кирик Е. С., Гравит М. В., Цепова А. С., Каримова Е. И., Хлебникова К. А.</i> Применение математического моделирования при проверке безопасных условий эвакуации и воздействия ОФП на деревянные конструкции.	28
<i>Мартынов В. А.</i> Исследование возможности применения термически поврежденной древесины в клееных деревянных конструкциях. . .	39
<i>Чибрикин Д. А.</i> Экспериментальные исследования образцов древесины, модифицированной полимерными композициями с наноструктурным наполнителем	48
<i>Кокина М. А., Мотыка Я. И., Кутыева Д. Ю., Цуканов А. В.</i> Испытания физико-механических характеристик фибролита	52
<i>Черных А. Г., Сюй Цзяньгуан</i> Исследование НДС при сдвиге перекрестных слоев CLT-панелей.	60
<i>Тихомиров Д. В.</i> Расчет перекрытия из ДПК, опирающегося по четырем сторонам, с применением теории изгиба пластин	68
<i>Ноздрачева В. А., Трунина Ю. В.</i> Анализ методик расчета здания из CLT по нормам разных стран в Dlubal RFEM.	81
<i>Попова Д. В.</i> Исследование оболочечных конструкций из CLT	93
<i>Казакевич Т. Н., Черных А. Г.</i> Анализ геометрических размеров шиповых соединений, используемых в КДК	104

<i>Данилов Е. В., Росляков М. С.</i> Исследования длительной прочности и деформативности соединений с когтевыми шайбами в конструкциях из LVL	113
<i>Кочнев А. Е., Никандров Л. Д.</i> Исследование длительной прочности нагельных соединений в конструкциях из LVL	122
<i>Кушнир А. Э., Гагарина А. К.</i> Исследование влияния циклических нагрузжений LVL с применением когтевых шайб	133
<i>Мосалев Т. В., Добрянский К. М.</i> К расчету однопролетных балок из LVL и клееной древесины с условно жесткими опорами.	143
<i>Низамова М. Н.</i> Влияние циклического увлажнения на прочность бруса многослойного клееного из шпона	150
<i>Котова Е. В.</i> Исследование работы деревянной конструкции из LVL	158
<i>Коваль П. С., Трунина Ю. В.</i> О влиянии деформаций сдвига на прогиб балок из древесины и материалов на ее основе	165
<i>Граб Л.</i> Продуктивность солнечных панелей в северных странах. Оценка эффективности и потенциала использования в условиях низкой солнечной активности	175
<i>Гагарина А. К., Улитин И. С.</i> Влияния вибраций на прочностные свойства нагельных соединений	183
<i>Доу Жуовэй</i> Древесно-бетонные композитные конструкции в строительстве	194
<i>Коваль П. С., Елистратов В. Н., Ковалева Е. С., Куватов А. И.</i> Влияние погрешностей в производстве шпона на физико-механические свойства LVL-бруса	202
<i>Фурман Е. А., Симонова Я. Е.</i> Строительство складов хранения угля и минеральных удобрений с применением большепролетных клееных деревянных конструкций	214

<i>Торопцева А. Н., Томченко М. Ю., Посторонко Н. К.</i> Анализ НДС составной двутавровой балки	219
<i>Черных А. Г., Корольков Д. И., Букелиа А.</i> Обзор и анализ зарубежных исследований по моделированию усталостного повреждения клееных конструкций на основе кинетического подхода	229
<i>Трофимов С. П.</i> О работе университета в сфере производства столярных изделий и применения древесины в домостроении . . .	241
<i>Цзян Бо</i> Клееные конструкции с применением комбинированной древесины.	249
<i>Люй Цзехао</i> Обзор применения деревянных конструкций	256
<i>Сюй Кайсюань</i> Исследование армирования элементов КДК	264
<i>Софронов А. Э.</i> Анализ оболочечных стержневых систем	270
<i>Чернов В. Ю., Шаратов Е. С., Мальцева Е. М.</i> Актуальные задачи стандартизации термодревбетона и изделий из него	277

Научное издание

**ИННОВАЦИИ В ДЕРЕВЯННОМ
СТРОИТЕЛЬСТВЕ**

Материалы 12-й Международной
научно-технической конференции

20–21 апреля 2023 года

Компьютерная верстка *О. Н. Комиссаровой*

Подписано к печати 14.09.2023. Формат 60×84 $\frac{1}{16}$. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 16,6. Тираж 100 экз. Заказ 122. «С» 73.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет.
190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4.

Отпечатано на МФУ. 198095, Санкт-Петербург, ул. Розенштейна, д. 32, лит. А.

ДЛЯ ЗАПИСЕЙ