УДК 624.011

© Чан Куок Фонг, аспирант
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Россия)
E-mail: Tranqp125@gmail.com

DOI 10.23968/1999-5571-2021-18-1-60-69

© Tran Quoc Phong, post-graduate student
(Saint Petersburg State University
of Architecture and Civil Engineering,
St. Petersburg, Russia)
E-mail: Tranqp125@gmail.com

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СОЕДИНЕНИЙ «СТАЛЬ–ДЕРЕВО» КОНСТРУКЦИЙ ИЗ LVL ПРИ РАСТЯЖЕНИИ

DETERMINATION OF THE LOAD-BEARING CAPACITY OF «STEEL–WOOD» CONNECTIONS OF LVL STRUCTURES UNDER TENSION

Рассмотрен расчет несущей способности соединений при растяжении с применением цилиндрических нагелей в фермах и рамах деревянных конструкциях из LVL. Дано описание расчетных схем для определения несущей способности соединений с различным расположением и размерами стальных пластин в соединении. Исследуется влияние расстановки стальных пластин на распределение усилий в поперечном сечении образцов. На основе результатов аналитических и экспериментальных исследований рассматривается несущая способность нагелей при изгибе, а также механизм разрушения деревянных конструкций на скалывание. Проведен сравнительный анализ эффективности разных схем нагельных соединений с тремя стальными пластинами при растяжении.

Ключевые слова: нагель, механизм разрушения, Еврокод 5, методика расчета, нагельные соединения, стальные пластины, LVL, несущая способность.

The article presents the results of calculation of the load-bearing capacity of connections of LVL structures under tension using cylindrical dowels in trusses and frames. The description of calculation schemes for determining the load-bearing capacity of connections with different location and sizes of steel plates in the connection is given. The influence of steel plate placement on the distribution of forces in the cross-section of samples is investigated. Based on the results of analytical and experimental studies, the load-bearing capacity of dowels during bending is considered, as well as the mechanism of wooden structures' fracture during chipping. A comparative analysis of the effectiveness of different schemes of dowel connections with three steel plates under tension is carried out.

Keywords: dowel, failure mechanism, Eurocode 5, calculation method, dowel joints, steel plates, LVL, load-bearing capacity.

Введение

Здания и сооружения воспринимают различные внешние воздействия, что требует создания несущих элементов с различными функциями и конструктивными схемами. Рамы и фермы из LVL представляют собой конструкции, способные работать в условиях сложного напряженно-деформируемого состояния. Использование самонарезающих нагелей в соединениях таких конструкций с применением стальных пластин (соединения «сталь–дерево») стало популярным в практике строительства. Основанием для выбора этих соединений инженерами при проектировании деревянных конструкций является

удобство монтажа конструкций и высокая несущая способность.

Соединения элементов конструкций из древесины, клееной из однонаправленного шпона, выполненные с использованием самонарезающих нагелей, по виду зависимости упругой деформации от прилагаемой нагрузки в диапазоне расчетной несущей способности относятся к соединениям II группы предельных состояний. Такие соединения характеризуются нелинейной зависимостью упругой деформации от нагрузки [1]. При разрушении соединений нагружением их за верхней границей области упругих деформаций (F_{1-2}) нелинейные деформации развива-

ются и непрерывно растут при постоянной величине нагрузки.

В предыдущих исследованиях рассматриваются разные теории и механизмы разрушения этого типа соединений. Например, теория Johansen [2], режим пластического разрушения соединения в методах Pedersen, A. Hanhijärvi, A. Kevärinmäki, Sawata et al. [3, 4, 12], модели хрупкого разрушения соединений в исследованиях Quenneville, Zarnani [5], Cabrero, Yurrita [6], Kevärinmäki [7]. Свойства элементов в таких соединениях (деревянные конструкции, самонарезающие нагели, стальные пластины) исследовались на практике, например, эксперименты с брусом, клееным из шпона (LVL), в [8, 9], эксперименты с различным поведением нагелей при изгибе и срезе в [10, 11].

В данной работе исследуются соединения деревянных конструкций из LVL типа I (ГОСТ 33124–2014) торговой марки Ultralam с различными схемами расстановки стальных пластин и использованием цилиндрических нагелей (приняты на первом этапе исследований) в зависимости от расположения и размера стальных пластин, количества рядов нагелей и размера пазов в деревянных конструкциях. Для определения и учета развития деформаций в каждой части соединения при растяжении использовались тензорезисторные датчики и показания с электронного дисплея испытательной машины.

Цель исследования: оценка несущей способности соединений «сталь–дерево» при растяжении.

Задачами исследования являются проведение теоретических расчетов и сравнение с результатами экспериментальных исследований прочности соединений с применением цилиндрических нагелей.

На первом этапе несущая способность соединений конструкций из LVL с использованием нагелей определялась расчетным путем по Еврокоду 5¹, шведской методике расчета² и по российскому СП 64.13330.2017³.

На втором этапе исследований проводилось сопоставление расчетных значений несущей способности соединений с экспериментальными данными для разных схем расстановки нагелей в деревянных конструкциях из LVL.

Предложено решение для нагельных соединений «сталь–дерево» с разными по длине металлическими пластинами, для того чтобы перераспределить напряжения на рабочую поверхность в гнезде нагеля и увеличить несущую способность соединения.

Результаты испытаний [12] показывают, что несущая способность соединений деревянных конструкций при растяжении зависит от следующих факторов:

- скалывание в крайних и средних элементах деревянных конструкций;
- механизм работы нагеля при изгибе и срезе (угол α при изгибе);
- напряжения сдвига в стальных пластинах в зависимости от толщины и размеров пластин.

Анализ механизма работы одного нагеля в плоскости среза, при условии одновременной пластичности деревянного элемента конструкции и нагеля при соединении со стальными пластинами, показан в табл. 1 [12], а его несущая способность в зависимости от толщины деревянной детали — на рис. 1.

Расчет несущей способности нагельных соединений по СП 64.13330.2017

Несущая способность соединений на цилиндрических нагелях согласно СП 64.13330.2017 определяется с учетом требований п. 8.13–8.16, п. 8.18 данных СП.

Расчетная несущая способность на один шов сплачивания:

$$T = \begin{cases} 0,75cdk_{\alpha} \\ 1,2adk_{\alpha} \\ (2,2d^2 + 0,025a^2)\sqrt{k_{\alpha}} \leq 3,1d^2 \end{cases}; \quad (1)$$

$$T_{СП} = n_{нагелей} \frac{m_T m_B m_A m_{с.с} m_{дл} \min(T)}{\gamma_m}, \quad (2)$$

где T — расчетная несущая способность соединения, кН; c — толщина среднего элемента, см; d — диаметр нагеля, см; k_{α} — коэффициент, учитывающий угол приложения нагрузки; a — толщина крайнего элемента, см; $n_{нагелей}$ — количество

¹ EN 1995-1-1 (2004): Eurocode 5: Design of Timber Structures — Part 1-1: General — Common Rules and Rules for Buildings. Comité Européen de Normalisation, 2004.

² Limträhandbok Del 1-3. 2016.

³ СП 64.13330. Деревянные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-25-80. 2017.

Таблица 1

Модели работы нагеля при соединении со стальными пластинами

<p>Модель I</p> $2F_y = \left(t_1 + \frac{t_2}{2} \right) f_e d$	<p>Модель II</p> $2F_y = \left(2y_1 - t_1 + \frac{t_2}{2} \right) f_e d$ $M_{y_1} = \left(y_1^2 - \frac{t_1^2}{2} \right) f_e d$	<p>Модель III</p> $2F_y = (t_1 + y_2) f_e d$ $M_{y_2} = \frac{y_2^2 f_e d}{4}$

<p>Модель IV</p> $2F_y = \left(y_1 + \frac{t_2}{2} \right) f_e d$ $M_{y_1} = \frac{y_1^2 f_e d}{4}$	<p>Модель V</p> $2F_y = (2y_1 - t_1 + y_2) f_e d$ $M_{y_1} = \left(y_1^2 - \frac{t_1^2}{2} \right) f_e d$ $M_{y_2} = \frac{y_2^2 f_e d}{4}$	<p>Модель VI</p> $2F_y = (y_1 + y_2) f_e d$ $M_{y_1} = \frac{y_1^2 f_e d}{4}$ $M_{y_2} = \frac{y_2^2 f_e d}{4}$

Примечание. F_y — предел текучести стального нагеля; f_e — прочность заделки в древесину; d — диаметр нагеля; M_{y_1} , M_{y_2} — момент изгиба нагеля.

нагелей в соединении; $m_T, m_B, m_A, m_{с.с}, m_{дл}, \gamma_m$ — определяются с учетом требований п. 6.9³.

Математическая формула расчета соединения по модели «дерево-сталь-дерево» и «сталь-дерево-сталь» (по Еврокоду 5)

Правила EN 1995-1-1 составлены таким образом, что при отказе в соединении всегда возникает пластическая деформация. Если в определен-

ной ситуации возможны оба типа деформации (пластическая или хрупкая деформация), то при проектировании соединения следует обеспечивать его пластическую работу [13]. При этом считается, что цилиндрический нагель работает только как деталь на изгиб, без учета влияния нити и трений между поверхностью нагеля и поверхностью отверстия в деревянных конструк-

Рис. 1. Несущая способность стального нагеля в соединении «сталь-дерево» в зависимости от толщины детали из LVL (несущая способность определена согласно EN 1995-1-1 и DIN EN 1995-1-1/NA⁴)

⁴ DIN EN 1995-1-1/NA: Entwurf, berechnung und bemessung von Holzbauwerken, 12.6.2009.

циях, $F_{ax,Rk} = 0$, а $M_{y,Rk}$ и $f_{h,i,k}$ рассчитываются в соответствии с п. 8.5.1.1 Еврокода 5.

$$F_{v,Rk} (6) =$$

$$= \min \begin{cases} f_{h,1,k} t_1 d \\ f_{h,1,k} t_1 d \left[\sqrt{2 + \frac{4M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} d t_1^2}} - 1 \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}; \\ 2,3 \sqrt{M_{y,Rk} f_{h,2,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \end{cases} \quad (3)$$

$$F_{v,Rk} (в) = \min \begin{cases} 0,5 f_{h,2,k} t_2 d \\ 1,15 \sqrt{2 M_{y,Rk} f_{h,2,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \end{cases} \quad (4)$$

Для соединения с тремя стальными пластинами:

$$F_{v,Rk} = 2F_{v,Rk(6)} + 4F_{v,Rk(в)} \quad (5)$$

Согласно п. 2.4.3¹ расчетное сопротивление F_u (несущая способность) рассчитывается как

$$F_u = n_{\text{нагелей}} \frac{F_{v,Rk} k_{mod}}{\gamma_m}, \quad (6)$$

где $F_{v,Rk(6)}$ — нормативная несущая способность одного нагеля в одной плоскости среза в соединении «дерево-сталь-дерево», $F_{v,Rk(в)}$ — то же в соединении «сталь-дерево-сталь»; $F_{v,Rk}$ — нормативная несущая способность одного нагеля в одной плоскости среза в соединении с тремя

стальными пластинами; γ_m — частный коэффициент свойств материала (значения γ_m даны согласно табл. 2.3, п. 2.4.1¹, для LVL $\gamma_m = 1,2$); k_{mod} — коэффициент модификации, учитывающий эффект длительности действия нагрузки и содержания влаги (значения k_{mod} приведены в п. 3.1.3¹, при постоянной нагрузке $k_{mod} = 0,6$).

Шведская методика для расчета соединений с тремя стальными пластинами (Limträhandbok Del 1-3, 2016)²

$$R_k = R_{k,central} + R_{k,lateral}; \quad (7)$$

$$R_{k,central} = 2(2 \cdot 1,15 \cdot \sqrt{2} \sqrt{2 M_{y,k} f_{h,k} d})$$

для

$$\sqrt{2} \sqrt{\frac{M_{y,k}}{f_{h,k} d}} < t_1 \leq 1,15 \cdot 4 \sqrt{\frac{M_{y,k}}{f_{h,k} d}}; \quad (8)$$

$$R_{k,lateral} = 2 \begin{cases} f_{h,k} d t_1 \left(\sqrt{2 + \frac{4 M_{y,k}}{f_{h,k} d t_1^2}} - 1 \right) \\ 1,15 \cdot \sqrt{2} \sqrt{2 M_{y,k} f_{h,k} d} \end{cases}$$

для

$$t_1 \geq 1,15 \cdot 4 \sqrt{\frac{M_{y,k}}{f_{h,k} d}}; \quad (9)$$

$$F_w = n_{\text{нагелей}} \frac{R_k k_{mod}}{\gamma_m}. \quad (10)$$

Соответствующие значения расчетной несущей способности можно найти, если значения характеристик умножить на (k_{mod} / γ_m) , где $\gamma_m = 1,2$ (k_{mod} — коэффициент модификации по Еврокоду 5¹, при постоянной нагрузке $k_{mod} = 0,6$ (в табл. 7.3 по Limträhandbok Del 1-3, 2016²)).

Экспериментальные исследования

На основе теоретического анализа приняты три различные схемы соединения в зависимости от факторов, влияющих на несущую способность соединения: количество нагелей, расположение, размер и толщина стальных пластин. Для исследования используются стальные пластины различных размеров для перераспределения напряжений в деревянной конструкции LVL [14]. Выбрано три схемы соединения с различными стальными пластинами: С-01 (¹⁴⁰140¹⁴⁰); С-02 (¹⁴⁰175¹⁴⁰); С-03 (¹⁷⁵140¹⁷⁵). Числа в скобках (¹⁴⁰140¹⁴⁰) — глубина заделки стальных пластин в деревянную деталь (рис. 2).

В механической лаборатории СПбГАСУ проведены испытания для получения запланированных экспериментальных результатов и рас-

Рис. 2. Схемы испытания соединений «сталь–дерево» на растяжение: 1 — деревянный образец (LVL); 2 — цилиндрические нагели ($d = 6$ мм); 3 — стальные пластины (толщина 5 мм)

смотрения механизмов разрушения элементов в соединении (рис. 3, 4). Для исследований образцов LVL при растяжении использовалась универсальная испытательная машина INSTRON 5969 с максимальной нагрузкой до 100 кН. Плотность образцов из LVL составила 560 кг/м^3 (ГОСТ 33124–2014). Температура в лаборатории во время испытаний $(22 \pm 1)^\circ\text{C}$, относительная влажность 63 %.

Для выполнения расчета и обработки результатов наблюдений использовалась программа Microsoft Excel. Верхняя граница упругих деформаций, перемещений и максимальной нагрузки (F_{1-2} и U_{1-2}) определена графоаналитическим методом: на графике зависимости перемещений от нагрузки точка окончания прямолинейной части графика найдена построением касательных. Таким образом, были получены значения F_{1-2} и U_{1-2} для каждого образца (см. табл. 2).

Экспериментальные значения несущей способности нагельных соединений при растяжении приведены в табл. 2. Графики зависимости «нагрузка–перемещение» при растяжении соединений приведены на рис. 5.

Стандартное отклонение рассчитано при значении выходных параметров по формуле

$$s = \sqrt{\frac{\sum_i (y - y_{\text{cp}})^2}{n - 1}},$$

где n — объем выборки по каждой схеме соединения.

Коэффициент вариации, %, просчитан при значении выходных параметров по формуле

$$u = \frac{s}{y_{\text{cp}}}.$$

С добавлением одного ряда нагелей в соединении (от шести нагелей в схеме C-01 до восьми нагелей на схемах C-02 и C-03) несущая способность увеличивается, но не пропорционально количеству нагелей, так как равняется сумме распределенных нагрузок на рабочие поверхности поперечных сечений. В схемах C-02, C-03 рассредоточенное расположение пластин способствует изменению несущей способности и жесткости соединения на линейном участке упругости (F_{1-2}). Для схемы C-03 несущая способность ($F_{1-2} = 93,14 \text{ кН}$) больше, чем несущая способность в схеме C-02 ($F_{1-2} = 83,65 \text{ кН}$), а деформация ($U_{1-2} = 5,12 \text{ мм}$) в схеме C-03 меньше, чем в схеме C-02 ($U_{1-2} = 6,06 \text{ мм}$).

Это можно объяснить тем, что в случае соединения с рассредоточенным расположением пластин режим работы нагелей изменяется, в результате происходит перераспределение нагрузки на рабочие поверхности поперечных сечений. Это решение увеличивает несущую способность соединения за счет уменьшения действия механизмов разрушения деревянных конструкций.

Кроме того, экспериментальные результаты также показывают, что положение нагелей в соединении оказывает влияние на механизм разрушения деревянных конструкций. Как видно из рис. 4, все разрушения произошли в виде скалывания вдоль ряда нагелей.

Значения расчетной несущей способности нагельных соединений, полученных по российским

Рис. 3. Испытание опытного образца соединения «сталь-дерево» на растяжение:
а — геометрические параметры соединений; б — опытный образец
на испытательной машине

Рис. 4. Внешний вид разрушения соединений «сталь-дерево» при растяжении

нормативам ($T_{\text{СП}}$), европейским нормам (F_u), шведским методикам (F_w), и экспериментальные данные (F_{1-2}) приведены в табл. 3.

Для оценки несущей способности соединения по результатам испытаний определено соотношение между расчетными и экспериментальными

результатами, полученные значения для различных методик расчета значительно больше, чем 1,3⁵ — см. табл. 4.

⁵ Рекомендации по испытанию соединений деревянных конструкций // ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко. М.: Стройиздат, 1980. 40 с.

Таблица 2

Экспериментальные значения несущей способности нагельных соединений

№ опыта	Обозначение выходных параметров, ед. изм.	Несущая способность				Средняя несущая способность y_{cp}	Стандартное отклонение S	Коэффициент вариации v , %
		1 (y_1)	2 (y_2)	3 (y_3)	4 (y_4)			
Схема С-01	F_{1-2} , кН	74,47	79,57	75,02	81,51	77,64	3,45	4,44
	U_{1-2} , мм	6,49	9,98	5,16	8,18	7,45	2,09	28,04
	F_{max} , кН	80,76	92,95	87,52	93,3	88,63	5,88	6,63
Схема С-02	F_{1-2} , кН	75,87	90,27	84,12	84,34	83,65	5,92	7,07
	U_{1-2} , мм	7,35	5,35	5,64	5,9	6,06	0,89	14,67
	F_{max} , кН	88,27	95,76	87,84	88,5	90,09	3,79	4,20
Схема С-03	F_{1-2} , кН	98,6	83,62	94,02	96,32	93,14	6,62	7,10
	U_{1-2} , мм	4,81	5,44	3,46	6,77	5,12	1,38	26,87
	F_{max} , кН	105,17	94,69	101,48	103,67	101,25	4,63	4,57

Примечание. F_{1-2} — несущая способность соединения в зоне упругости; U_{1-2} — значение смещения, соответствующее значению нагрузки F_{1-2} ; F_{max} — максимальная несущая способность соединения при растяжении.

Рис. 5. Зависимость «нагрузка–перемещение» при испытаниях на растяжение соединений «сталь–дерево»: а — схема С-01; б — схема С-02; в — схема С-03

Графическая интерпретация полученных значений фактической и расчетной несущей способности для разных схем соединений при растяжении представлена на рис. 6.

Из табл. 3, 4 и на рис. 6 хорошо видно, что прослеживается расхождение результатов между теоретическими и фактическими значениями

несущей способности в зависимости от параметров соединения. В результате наибольшее соотношение между фактической и теоретической несущей способностью получено при расчете по СП 64.13330.2017. Следовательно, можно сделать вывод о завышенном запасе несущей способности, что требует уточнения расчетных формул

Таблица 3

Результаты расчетных и экспериментальных значений несущей способности, кН

№ опыта	Параметры соединения		F_{1-2} (эксперимент)	$T_{сп}$ (СП64-13330)	F_u (Еврокод 5)	F_w (шведские нормы)
	Размеры пластин в схеме, мм	Количество нагелей, шт.				
Схема С-01	¹⁴⁰ 140 ¹⁴⁰	6	77,64	29,75	48,45	51,18
Схема С-02	¹⁴⁰ 175 ¹⁴⁰	8	83,65	33,25	56,49	62,55
Схема С-03	¹⁷⁵ 140 ¹⁷⁵	8	93,14	33,06	59,82	68,24

Таблица 4

Отношение значений фактической несущей способности к расчетной для разных схем соединения

№ опыта	Отношение $F_{1-2} / F_{расч.}$		
	$(F_{1-2} / T_{сп}) \geq 1,3$	$(F_{1-2} / F_u) \geq 1,3$	$(F_{1-2} / F_w) \geq 1,3$
Схема С-01	2,61	1,60	1,52
Схема С-02	2,52	1,48	1,34
Схема С-03	2,82	1,56	1,37

Примечание. $F_{расч.}$ — значение несущей способности соединения по различным теоретическим методам расчета.

Рис. 6. Фактические и расчетные значения несущей способности соединений «сталь–дерево» при растяжении

для нагельных соединений с использованием трех стальных пластин (соединения «сталь–дерево»).

Выводы

В данном исследовании приведены зависимости «нагрузка–перемещение» для нагельных соединений с расположением стальных пластин по трем вариантам. Результаты показывают, что использование рассредоточенного расположения пластин приводит к уменьшению перемещений сдвига, что снижает вероятность разрушения соединения. Распределение стальных пластин в соединении изменяет механизмы работы каждого нагеля в зависимости от их положения в конструкции. Таким образом, при перераспределении нагрузки по рабочим поверхностям поперечных сечений уменьшается местное напряжение в гнездах заделки нагелей.

Можно предположить, что применение самонарезающих нагелей с распределенными стальными пластинами в соединении будет способствовать устранению локальных напряжений в деревянных конструкциях, тем самым значительно уменьшая вероятность хрупкого разрушения нагельного соединения.

Получены новые данные о несущей способности деревянных конструкций из LVL для соединений «сталь–дерево» с тремя стальными пластинами. Рассмотрены механизмы разрушения в соединениях деревянных конструкций и режимы работы нагелей при изгибе.

Библиографический список

1. Черных А. Г., Григорьев К. С., Коваль П. С., Данилов Е. В., Бакрышева В. В., Кашипов И. Т. К вопросу определения несущей способности нагельных соединений в конструкциях из бруса клееного из однонаправленного шпона (LVL) // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 4. С. 109.
2. Johansen K. W. Theory of timber connections. International Association of Bridge and Structural Engineering. Bern, 1949. Publication No. 9. Pp. 249–262.
3. Pedersen M. U. Dowel Type Timber Connections. Strength Modelling: Ph.D. thesis. Danmarks Tekniske Universitet, 2002. 165 p.
4. Hanhijärvi A., Kevarinmäki A. Timber Failure Mechanisms in High-Capacity Dowelled Connections of Timber to Steel: Experimental results and design. VTT Technical Research Centre of Finland. VTT

Publications, № 677. 2008. URL: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/publications/2008/P677.pdf>

5. Quenneville P., Zarnani P. Proposal for the connection chapter of the New Zealand Design of Timber Structures. Unpublished, 2017.

6. Cabrero J. M., Yurrita M. Performance assessment of existing models to predict brittle failure modes of steel-to-timber connections loaded parallel-to-grain with dowel-type fasteners // Eng. Struct. 2018. Vol. 171. Pp. 895–910. URL: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.03.037>.

7. Hanhijärvi A., Kevarinmäki A. Timber Failure Mechanisms in High-Capacity Dowelled Connections of Timber to Steel: Experimental results and design. VTT Technical Research Centre of Finland. VTT Publications, № 677. 2008. URL: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/publications/2008/P677.pdf>

8. Черных А. Г., Данилов Е. В., Коваль П. С., Мамедов Ш. М. Обзор исследований, нормирования и применения LVL бруса в отечественной и зарубежной строительной практике // Вестник гражданских инженеров. 2020. № 1 (78). С. 100–106.

9. Umaina Muhammed C. K., Arya R. Analytical Study on Flexural Behaviour of Glued Laminated Timber // International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology. 2015. Vol. 4 (4). Pp. 2485–2493. URL: <https://doi.org/10.15680/IJIRSET.2015.0404051>.

10. van de Kuilen J. W. G. Leistungsfähigen Verbindungen für Holzbrücken – Holz-Holz und Holz-Stahl // Internationale Holzbrückentage. 2010. 18 p.

11. Misconel A., Ballerini M., van de Kuilen J. W. G. Steel-to-timber joints of beech-LVL with very high strength steel dowels // World Conference on Timber Engineering. 22–25 Aug 2016. Vienna University of Technology. Pp. 269–276.

12. Sawata K., Sasaki T., Kanetaka S. Estimation of shear strength of dowel-type timber connections with multiple slotted-in steel plates by European yield theory // J. Wood Sci. 2006. Vol. 52. Pp. 496–502. URL: <https://doi.org/10.1007/s10086-006-0800-9>.

13. Черных А. Г., Чан Куок Фонг. Анализ несущей способности соединения с применением самонарезающих нагелей в различных моделях пластического разрушения // Вестник гражданских инженеров. 2020. № 4 (81). С. 89–99.

14. Чан Куок Фонг. Анализ различных моделей разрушения соединений «сталь – дерево» с самонарезающими нагелями // Вестник гражданских инженеров. 2020. № 5 (82). С. 72–81.

References

1. Chernykh A. G., et al. K voprosu opredeleniya nesushchey sposobnosti nagel'nykh soedineniy v

konstruktsiyakh iz brusa kleenogo iz odnonapravlenno shpona (LVL) [On the issue of determining the load-bearing capacity of dowel connections in structures made of glued timber made of unidirectional veneer (LVL)]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya – Modern problems of science and education*, 2012, no. 4, p. 109.

2. Johansen K. W. *Theory of timber connections*. International Association of Bridge and Structural Engineering. Bern, 1949. Publ. no. 9, pp. 249–262.

3. Pedersen M. U. *Dowel type timber connections. Strength modeling*. Ph.D. thesis. Danmarks Tekniske Universitet Publ., 2002, 165 p.

4. Hanhijärvi A., Kevarinmäki A. Timber failure mechanisms in high-capacity dowelled connections of timber to steel. Experimental results and design. VTT Technical Research Centre of Finland. *VTT Publications*, 2008, no. 677. Available at: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/publications/2008/P677.pdf>

5. Quenneville P., Zarnani P. *Proposal for the connection chapter of the New Zealand Design of timber structures*. Unpublished, 2017.

6. Cabrero J. M., Yurrita M. Performance assessment of existing models to predict brittle failure modes of steel-to-timber connections loaded parallel-to-grain with dowel-type fasteners. *Eng. Struct.*, 2018, vol. 171, pp. 895–910. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.03.037>

7. Hanhijärvi A., Kevarinmäki A. Timber failure mechanisms in high-capacity dowelled connections of timber to steel. Experimental results and design. VTT Technical Research Centre of Finland, *VTT Publications*, no. 677. 2008. Available at: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/publications/2008/P677.pdf>

8. Chernykh A. G., Danilov E. V., Koval P. S., Mamedov Sh. M. *Obzor issledovaniy, normirovaniya i primeneniya LVLbrusa v otechestvennoy i zarubezhnoy*

stroitel'noy praktike [Review of research works, regulation and application of LVL beam in domestic and foreign construction practice]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2020, no. 1 (78), pp. 100–106.

9. Arya R. Analytical study on flexural behaviour of glued laminated timber. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 2015, vol. 4 (4), pp. 2485–2493. Available at: <https://doi.org/10.15680/IJIRSET.2015.0404051>.

10. Van de Kuilen J. W. G. *Leistungsfähigen Verbindungen für Holzbrücken – Holz-Holz und Holz-Stahl*. Internationale Holzbrückentage, 2010, 18 p.

11. Misconel A., Ballerini M., van de Kuilen J. W. G. *Steel-to-timber joints of beech-LVL with very high strength steel dowels*. World Conference on Timber Engineering, Aug. 22–25, 2016. Vienna University of Technology Publ., pp. 269–276.

12. Sawata K., Sasaki T., Kanetaka S. Estimation of shear strength of dowel-type timber connections with multiple slotted-in steel plates by European yield theory. *J. Wood Sci.*, 2006, vol. 52, pp. 496–502. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10086-006-0800-9>

13. Chernykh A. G., Tran Quoc Phong. *Analiz nesushchey sposobnosti soedineniya s primeneniem samonarezayushchikh nageley v razlichnykh modelyakh plasticheskogo razrusheniya* [Analysis of the load bearing capacity of the connection with the use of self-drilling dowels in various models of elastic failure]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2020, no. 4 (81), pp. 89–99.

14. Tran Quoc Phong. *Analiz razlichnykh modeley razrusheniya soedineniy «stal' –derevo» s samonarezayushchimi nagelyami* [Analysis of various failure models of steel-wood connections with self-drilling dowels]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2020, no. 5 (82), pp. 72–81.