УДК 624.011

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

DOI 10.23968/1999-5571-2020-17-5-72-81

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

АНАЛИЗ РАЗЛИЧНЫХ МОДЕЛЕЙ РАЗРУШЕНИЯ СОЕДИНЕНИЙ «СТАЛЬ – ДЕРЕВО» С САМОНАРЕЗАЮЩИМИ НАГЕЛЯМИ

ANALYSIS OF VARIOUS FAILURE MODELS OF STEEL-WOOD CONNECTIONS WITH SELF-DRILLING DOWELS

Несущая способность нагельных соединений деревянных конструкций определяется по двум предельным состояниям: разрушение древесины (смятие) либо деформация стального нагеля (изгиб). Обе модели разрушения являются пластичными. В некоторых случаях возможно хрупкое разрушение, которое будет определять несущую способность соединения. Однако в российских нормах хрупкое разрушение нагельных соединений не рассматривается, так как данный вид разрушения исключается правилами расстановки нагелей. Приложение А Еврокода 5 включает расчеты хрупкого разрушения, вызванные скалыванием блока или ряда древесины в соединениях. В работах [10, 11] авторы рассматривали различные модели разрушений для соединений с нагелями большого диаметра (более 12 мм). В данном исследовании автор оценивает и классифицирует расчетные модели для хрупкого разрушения в соединениях деревянных конструкций с использованием самонарезающих нагелей малого диаметра (менее 12 мм), которые не представлены в стандартах Еврокод 5 и СП 64.13330.2017. Предложены решения для уменьшения вероятности возникновения хрупкого разрушения в таких соединениях.

Ключевые слова: самонарезающие нагели, хрупкое разрушение, соединения деревянных конструкций, расчет несущей способности, напряжение, механизмы разрушения.

The load-bearing capacity of the dowel connections of wooden structures is determined by two limiting states, namely, by the failure of wood (crumpling) or deformation of steel dowel (bending). Both failure models are plastic. In some cases, brittle failure is possible, which will determine the load-bearing capacity of the connection. However, the regulations in the Russian Federation do not consider the brittle failure of dowel connections because this type of failure is excluded by the rules for placing dowels. Appendix A of Eurocode 5 includes types of brittle failure caused by chipping of a block or slipping of wood in connection. In [10, 11], the authors consider various fracture models for connections with large-diameter dowels (over 12 mm). In the present study, the author evaluates and classifies calculation models for brittle failure in connections of wooden structures using self-drilling dowels of small diameter (less than 12 mm), which are not presented in the Eurocode 5 and SP 64.13330.2017 standards. Solutions are proposed for reducing the probability of brittle failure propagation in such connections.

Keywords: self-drilling dowels, brittle failure, wooden structure connections, load-bearing capacity calculation, stress, failure mechanisms.

Введение

Для обеспечения безопасной работы соединения необходимо, чтобы расчетное усилие, действующее на соединение, не превышало его несущей способности. Сложное напряженное состояние в соединениях, возникающее из-за наложения различных напряжений, требует определения несущей способности соединения исходя

из нескольких условий [8]: по смятию древесины и по изгибу нагеля с учетом угла между приложенной нагрузкой и направлением волокон в древесине. Несущая способность соединений элементов из древесины в странах Евросоюза определяется с помощью европейской модели предельных состояний ЕУМ (European Yield Model) [11, 12]. Эта модель основана на предпо-

ложении о податливости соединения в местах заделки нагелей в древесину.

Предполагается, что пластичный механизм разрушения, описываемый ЕУМ, отражает общую несущую способность соединения. Однако в некоторых случаях возможно хрупкое разрушение деревянного элемента. Механизм разрушения соединения с нагелями зависит от геометрии соединения и типа нагелей [6]. Рассматриваются существующие предложения по различным механизмам хрупкого разрушения в соединениях, нагруженных параллельно волокнам древесины. В соединениях деревянных конструкций, выполненных с применением стальных пластин, которые выполняют роль соединительного элемента между деталями конструкций, хрупкое разрушение может произойти во внутренних и внешних частях деревянных элементов соединения в зависимости от расположения стальных пластин.

Для упрощения расчета соединений используются виды соединений w-s-w (wood-steel-wood, дерево-сталь-дерево) и s-w-s (steel-wood-steel, сталь-дерево-сталь). Варианты конфигурации соединения с применением самонарезающих нагелей представлены на рис. 1.

Различные модели в соответствии с описанными режимами хрупкого разрушения [5] представлены на рис. 2.

Описание моделей хрупкого разрушения основано на ранней статье Fahlbusch (1949) [1], в которой упомянут термин «групповой эффект», означающий, что из-за взаимодействия между нагелями несущая способность всего соединения больше, чем суммарная несущая способ-

Рис. 1. Варианты конфигурации соединений стальных пластин с деталью деревянных конструкций:
а — с применением самонарезающих нагелей;
б–г — с применением стальных болтов

ность соединяемых деталей в отдельности [3, 7]. Как следствие, для обеспечения требуемой несущей способности соединения фактически требуется меньшее число крепежных элементов, чем расчетное (Foschi and Longworth, 1975; Nozynski, 1980; Yasumura et al., 1987; Gehri, 1996; Jorissen, 1998). Данное явление было учтено в предварительной версии Еврокода 5 EN 1995-1-1:1993 (1993) и окончательно принято в Еврокоде 5 (2004) на основании результатов исследований Jorissen (1998) [9].

Smith и Steck (1985) отметили необходимость в учете новых моделей хрупкого разрушения, а в 1990-х годах Racher (1994) и Kevarginmäki (1995) предложили подход к анализу разрушения скалывания блока древесины, который заложил основу для действующей редакции приложения А Еврокода 5 (2011) [10].

Новые модели хрупкого разрушения были включены в канадский стандарт CSA-O86¹ на основании работ Mohammad and Quenneville (1999). Quenneville, Zarnani (2017) предложены подобные изменения в стандарт Новой Зеландии [4].

Цель исследования: анализ несущей способности соединения с несколькими стальными пластинами на основании хрупкой модели разрушения.

Для этого необходимо выбрать, оценить и классифицировать расчетные модели хрупкого разрушения в соединениях с использованием самонарезающих нагелей малого диаметра. Предыдущие исследования рассматривали эту проблему только для соединений на нагелях большого диаметра (более 12 мм). В стандартах Еврокод 5² и СП 64.13330³ не отражены все возможные модели хрупкого разрушения.

Потеря несущей способности деревянных конструкций может происходить в результате хрупкого разрушения, причиной которого являются не учтенные в расчетах перенапряжения одних частей составного элемента при одновременном разгрузке других. В настоящее время не существует метода расчета, учитывающего

¹ CSA Standard, O86:2009. Engineering design in wood. Canadian Standards Association, 2009.

² 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.

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

Рис. 2. Модели хрупкого разрушения: а — раскалывание; б — скалывание ряда; в — скалывание блока; г — разрыв элемента конструкции [5]

возможность хрупкого разрушения соединений с несколькими плоскостями скалывания. Hanhijärvi и Kevarinmäki (2007, 2008) [2] предположили, что прочность соединения может быть представлена как сумма прочностей простых соединений («дерево–сталь–дерево» для внешних элементов и «сталь–дерево–сталь» для внутренних элементов соединения). Это предположение основано на том, что все элементы деревянных конструкций в соединении достигают своей предельной несущей способности одновременно. Это вызывает сомнение, поскольку толщина элементов, а также соответствующая эффективная толщина из-за деформации нагеля могут быть различными. В результате элементы соединения могут не достигать своего отказа одновременно.

1. Анализ расчета по Еврокоду 5

Скалывание ряда и раскалывание. Оба режима разрушения определяются с учетом понижающего коэффициента n_{ef} . Этот параметр, основанный на исследованиях Йориссена [9], определяется для нагелей по формуле

$$n_{ef} = \min \left\{ n_c, n_c^{0,9} \sqrt{\frac{a_1}{13d}} \right\}. \quad (1)$$

Для определения несущей способности F_D при возникновении хрупких отказов применяется формула

$$F_D = F_y n_s n_{ef} n_r. \quad (2)$$

Нагрузка, вызывающая скалывание блока, определяется в Приложении А (п. 6.1.2 Еврокода 5) как максимальное значение разрушающей

нагрузки при растяжении волокон и суммой разрушающих нагрузок при скалывании параллельно и поперек волокон:

$$F_{B,block} = \max \left\{ 1,5 A_{net,t} f_{t,0,k}, 0,7 A_{net,v} f_{v,k} \right\}, \quad (3)$$

где $f_{t,0,k}$ и $f_{v,k}$ — характеристическая прочность на растяжение вдоль волокон и характеристическая прочность на скалывание соответственно; $A_{net,t}$, $A_{net,v}$ — площадь нетто поверхности скалывания в плоскости, перпендикулярной волокнам и параллельной волокнам соответственно.

Несмотря на то что нет метода определения разрушения от растягивающего усилия, в разделе 6.1.2 Еврокода 5 установлено, что расчетное напряжение от растягивающих усилий вдоль волокон $\sigma_{t,0,d}$ должно быть меньше или равно расчетному сопротивлению растяжению $f_{t,0,d}$. Это условие должно также выполняться и в соединениях деревянных конструкций:

$$\sigma_{t,0,d} = f_{t,0,d}. \quad (4)$$

2. Модель, предложенная Quenneville и Zarnani

Quenneville и Zarnani [4] рассматривают каждый из возможных хрупких режимов разрушения отдельно. Однако раскалывание не рассматривается, поскольку авторами не предполагается возможный режим разрушения в соединении с двумя или более рядами нагелей. Несущая способность деревянного элемента при таком виде разрушения будет равна минимальной нагрузке и рассчитывается по двум режимам отказа.

Скалывание ряда. Для соединения с несколькими рядами одинаковых n_r нагелей Quenneville

и Zarnani определяют усилие сдвига F_B , соответствующее разрушению ряда деревянного элемента, по формулам

$$F_{B,row} = R_v n_r; \quad (5)$$

$$R_v = 0,75 f_{v,k} K_{LS} n_c 2a_{cr} t, \quad (6)$$

где K_{LS} — коэффициент нагружения поверхности (равный 1 для средних элементов и 0,65 для боковых элементов), который учитывает эффективную толщину t_{ef} ; a_{cr} — минимальное из двух: расстояние между рядами нагелей a_1 и расстояние до нагруженной кромки a_3 .

Скалывание блока. Quenneville и Zarnani определяют разрушающую нагрузку скалывания $F_{B^{block}}$ как сумму несущей способности двух плоскостей скалывания и плоскости растяжения:

$$F_{B^{block}} = R_v + 1,25 f_{t,0,k} A_{net,t}, \quad (7)$$

где R_v — расчетное сопротивление скалыванию ряда нагеля, определяемое по формуле (6); $A_{net,t}$ — площадь нетто поверхности скалывания в плоскости, перпендикулярной волокнам, $A_{net,t} = b_{net} t$.

Несущая способность при растяжении деревянного элемента соединения $F_{B,net}$ определяется по формуле

$$F_{B,net} = f_{t,0,k} A_{net}, \quad (8)$$

где $f_{t,0,k}$ — характеристическая прочность при растяжении; A_{net} — площадь нетто поперечного сечения деревянного элемента.

3. Модель, предложенная Hanhijärvi и Kevärinmäki

Hanhijärvi и Kevärinmäki [2, 3] предложили комплексный подход к решению обозначенной выше проблемы. Расчетная модель, разработанная авторами, учитывает все возможные режимы хрупкого разрушения для соединений с нагелями. Как показано на рис. 3, стык деревянных элементов разделен на две части: наружную (квадратная штриховка) и внутреннюю (линейная штриховка). Каждая из частей соединения связана со своей соответствующей плоскостью разрушения (сплошные линии для внутренних частей и штриховые линии для внешних частей). Несущая способность наружной и внутренней части определяются отдельно, а прочность каждого деревянного элемента соединения рассматривается как сумма несущих способностей обеих частей.

Различные модели разрушения предполагаются в каждой части соединения. Рассмотрено

возможное взаимодействие между напряжением скалывания и напряжением растяжения (F_j и F_k), что уменьшает результирующую несущую способность (F_{j+k}). Вследствие этого результирующая несущая способность F_{j+k} определяется из уравнения, учитывающего коэффициент взаимодействия $k_{inter} = 0,3$:

$$F_{j+k} = \begin{cases} F_j \left(1 - k_{inter} \frac{F_j}{F_k} \right), & \text{если } F_j \leq F_k; \\ F_k \left(1 - k_{inter} \frac{F_k}{F_j} \right), & \text{если } F_k < F_j. \end{cases} \quad (9)$$

Этот метод учитывает эффективное количество крепежных деталей (при распределении нагрузки между крепежными элементами), $n_{ef} = n_c^{0,9}$. Кроме того, происходит уменьшение фактической толщины t_{ef} (аналогично параметру K_{LS} от Quenneville и Zarnani [4] и t_{ef} из Еврокода 5), которая определяется по формулам

$$t_{ef} = \min \left(1, \frac{d}{0,6 \sqrt{\frac{1,5 f_{h,0}}{f_y} 2,45 t}} \right) t \text{ (внешняя часть);}$$

$$t_{ef} = \min \left(1, \frac{d}{0,5 \sqrt{\frac{1,5 f_{h,0}}{f_y} 1,23 t}} \right) t \text{ (внутренняя часть),}$$

где f_y — предел текучести нагелей.

Рис. 3. Разделение соединения на внешнюю и внутреннюю части, выполненное Hanhijärvi и Kevärinmäki [2, 3], и возможные варианты разрушения

Расчет несущей способности внутренних частей. Возможные режимы хрупкого разрушения — растяжение $F_{t,int}$ (формула (11)) и скалывание $F_{v,int}$ (формула (12)):

$$F_{t,int} = k_{t,cnctr} \frac{n_{ef}}{n_c} (a_2 - d) t f_{t,0,k}; \quad (11)$$

$$F_{v,int} = k_{v,cnctr} \frac{n_{ef}}{n_c} 2 L_c t_{red} f_{v,k}, \quad (12)$$

где $k_{t,cnctr}$ и $k_{v,cnctr}$ — коэффициенты концентрации напряжений, близкие к значениям 1,5 и 0,7, определенным в Еврокоде 5. Они зависят от типа инженерной древесины (КДК, LVL и др.), используемой в соединениях.

Несущая способность при хрупком разрушении определяется с учетом взаимодействия между скалыванием и растяжением $F_{t+v,int}$.

Расчет несущей способности внешних частей. Возможные режимы хрупкого разрушения — растяжение $F_{t,out}$ (формула (13)) и скалывание $F_{v,out}$ (формула (14)):

$$F_{t,out} = k_{t,cnctr} \frac{n_{ef}}{n_c} \left(a_4 - \frac{d}{2} \right) t f_{t,0,k} K_{t,out}; \quad (13)$$

$$F_{v,out} = k_{v,cnctr} \frac{n_{ef}}{n_c} L_c t_{red} f_{v,k}; \quad (14)$$

$$F_{spl,hole} = \frac{k_{t90,cnctr} n_{ef} 10 f_{t,90,k} t_{red} a_3}{\max \left(1; 0,65 \frac{a_3}{a_4} \right)}; \quad (15)$$

$$F_{spl,end} = \frac{k_{t90,cnctr} n_{ef} 10 f_{t,90,k} t_{red} a_3}{2,7 \cosh \left(\frac{a_3}{a_4} - 1,4 \right)}, \quad (16)$$

где $k_{t,out}$ — коэффициент, учитывающий асимметрию распределения растягивающих напряжений, зависит от соотношения площадей растяжения и скалывания; $k_{t90,cnctr}$ — коэффициент концентрации напряжений, который зависит от вида древесины.

4. Модель жесткости

В стандартах нет сведений о модели хрупкого разрушения для соединения с несколькими плоскостями скалывания. HANHJÄRVI и KEVARINMÄKI [2, 3] в своих расчетах использовали метод определения несущей способности соединения, учитывающий четыре плоскости скалывания. Авторы предположили, что такое соединение можно рассчитать как сумму двух двойных скалывающих воздействий: $F_{w-s-w-s-w} = F_{w-s-w} + F_{s-w-s}$.

Согласно этому предложению, все элементы древесины должны достигать максимума своей несущей способности одновременно. Однако это невыполнимо в случае хрупкого разрушения, наступающего до того, как нагель достигнет предела текучести при разных толщинах внутреннего и наружного деревянных элементов. Для случая, когда несущая способность каждого деревянного элемента достигает предела хрупкого разрушения, предложен метод жесткости для расчета несущей способности соединения [11].

Модель хрупкого разрушения соединения, когда один из элементов (внешний или внутренний) достигает своей хрупкой стадии, можно представить в виде пружинной модели (рис. 4), где наружные элементы имеют жесткость K_1 , а внутренние элементы — K_2 . Предполагается, что соединение является симметричным, так как асимметричная конфигурация не будет иметь никакого смысла с точки зрения эффективного распределения нагрузки.

Жесткость каждого пружинного элемента может быть определена по закону Гука [14] как осевая жесткость деревянного элемента:

$$K = \frac{E_0 A}{L} = \frac{E_0 b t}{L}, \quad (17)$$

где A — площадь поперечного сечения древесины, определяемая его шириной b и толщиной t ; L — длина образца древесины; E_0 — модуль упругости параллельно волокнам.

Рис. 4. Пружинная модель соединения деревянных элементов с четырьмя плоскостями сдвига со стальными пластинами. F_b — несущая способность соединения

Следовательно, общая несущая способность соединения (F_B) определяется как сумма нагрузок, приложенных к двум внешним элементам, — ($F_{b,1}$) и внутреннему ($F_{b,2}$):

$$F_B = 2F_{b,1} + F_{b,2}. \quad (18)$$

Деформация Δ всех пружин может быть принята равной

$$\Delta_1 = \Delta_2. \quad (19)$$

Нагрузка на каждую пружину (то есть на каждый элемент) определяется по формуле

$$F_B = K\Delta. \quad (20)$$

Объединив представленные выше формулы (17), (19), (20), имеем

$$\frac{F_{b,1}L_1}{E_1b_1t_1} = \frac{F_{b,2}L_2}{E_2b_2t_2}. \quad (21)$$

Так как все свойства деревянных элементов, кроме толщины t , одинаковы, то формула (21) может быть упрощена до

$$F_{b,1} = F_{b,2} \frac{t_1}{t_2}. \quad (22)$$

Результирующее выражение (22), полученное путем объединения равенств (18) и (21), справедливо для случая соединения с двумя стальными пластинами. Подобные выражения могут быть получены и для соединений с большим количеством плоскостей скалывания.

5. Влияние диаметра нагеля и геометрического положения элементов на предел прочности соединения (при хрупком разрушении)

На практике в соединениях деревянных конструкций применяют нагели диаметром от 5 до 30 мм. Выбор диаметра нагеля сильно влияет на несущую способность соединения и режим его разрушения за счет пластической деформации

Рис. 5. Соотношение между количеством и диаметром нагелей при изгибающем моменте $M_y = 1247 \text{ Н} \cdot \text{м}$ (нормативный момент пластической деформации одного нагеля $d = 30 \text{ мм}$, $f_u = 600 \text{ Н/мм}^2$)

нагеля⁴. При одинаковой несущей способности соединения требуется меньшее количество нагелей с увеличением их диаметра (рис. 5).

Для соединений деревянных конструкций выбор нагелей меньшего диаметра и увеличение их количества приведут к более равномерному распределению напряжений в древесине. Кроме того, деформации при изгибе нагелей малого диаметра уменьшают эффективное напряжение и перераспределяют напряжение на элементы с большей жесткостью в структуре древесины. Это приводит к локальному разрушению в элементе деревянной конструкции.

Для численного анализа рассматриваемых моделей соединений проведен расчет методом конечных элементов в программе ANSYS 18.2 [14]. Входные параметры элементов деревянных конструкций приняты по [13]. Общий вид исследуемого соединения представлен на рис. 6. Результаты определения напряжений в элементах соединения показаны на рис. 7.

В табл. 1 представлены относительные деформации древесины в области отверстий для нагелей различных диаметров. Деревянные элементы в области А имеют большие по величине относительные деформации, чем в области Б. Максимальное значение деформаций всегда находится в области А с процессом увеличения нагрузки. Следовательно, в этой области произойдет хрупкое разрушение.

Данный факт объясняется тем, что работа деревянного элемента зависит от совместной работы нагелей и стальных пластин в соединении. Аналитические результаты показывают, что напряжения сжатия в первой стальной пластине (область А) ($\sigma_1 = -20,487 \text{ МПа}$) меньше, чем во второй стальной пластине (область Б) ($\sigma_2 = -31,739 \text{ МПа}$). Напряжения в соединениях с меньшими по диаметру нагелями также меньше, поскольку деформации изгиба в нагелях уменьшают напряжения и деформации в деревянных элементах, что позволяет всему соединению достигнуть момента пластического разрушения (рис. 8).

Диаметр нагелей влияет на характер хрупкого разрушения в деревянных конструкциях. Результаты численного моделирования, представленные на рис. 7, а, б, показывают, что для нагелей

⁴ Limträhandbok Del 1-3. 2016.

Рис. 6. Общий вид образцов деревянных конструкций с использованием различных диаметров нагелей

Рис. 7. Деформации в деревянных конструкциях и напряжения для различных диаметров нагелей: а — общие деформации соединения; б — относительная деформация в отверстиях; в — изополя напряжений в нагелях $d = 7$ мм; г — изополя напряжений в нагелях $d = 10$ мм

диаметром 10 мм возникает большая деформация, что может вызвать хрупкое разрушение по скалыванию ряда (см. рис. 2, б), в то время как в соединении с нагелями 7 мм деформации распределены по поверхности деревянного элемента за счет увеличения числа нагелей (согласно принципу дробности [15]) (табл. 2).

Как видно из результатов численного моделирования, нагрузка, передаваемая от нагелей в ряду (n), концентрируется в поперечном се-

чении деревянной конструкции, таким образом увеличивая суммарное напряжение в зоне крепления нагелей.

Очевидно, что при распределении напряжений по различным плоскостям деревянного элемента вероятность возникновения хрупкого разрушения в соединении от растягивающих усилий значительно уменьшается (см. рис. 2). Для этого автором данной работы предлагается применять следующие схемы расстановки сталь-

Таблица 1

Изополя относительных деформаций в отверстиях деревянных конструкций

Нагрузка	0,2 МПа	0,4 МПа	0,6 МПа	0,8 МПа	1,0 МПа
Относительные деформации в области А, $d = 10$ мм
Относительные деформации в области Б, $d = 7$ мм
$\varepsilon_{\max}$, мм/мм	8,3224e-002	8,3367e-002	8,3548e-002	9,417e-002	0,10402

Рис. 8. Распределение напряжений по длине нагелей

Таблица 2

Напряжения и относительные деформации в деревянном элементе

Напряжения в поперечном сечении по длине деревянного элемента, МПа
Относительные деформации на поперечном сечении по длине деревянного элемента, мм/мм
	Область А ($d = 10$ мм)	Область Б ($d = 7$ мм)

Рис. 9. Схема положения стальных пластин для распределения напряжений на поперечном сечении

ных пластин и нагелей в соединениях деревянных конструкций (рис. 9).

Эффективность предложенного решения нуждается в подтверждении экспериментальными и аналитическими исследованиями.

Выводы

Обобщены характеристики различных моделей хрупкого разрушения в соединениях деревянных конструкций с самонарезающими нагелями и стальными пластинами. На основании расчетных моделей в различных работах выявлены факторы, вызывающие хрупкое разрушение в соединениях. Численное моделирование показало, что уменьшение диаметра нагелей способствует распределению локальных напряжений в деревянных конструкциях, тем самым значительно уменьшая вероятность хрупкого разрушения соединения.

Анализ напряженно-деформированного состояния деревянных конструкций, соединенных стальными нагелями, позволил предположить эффективность предлагаемых схем для соединений «сталь–дерево» с распределением напряжений, представленных на рис. 9.

Библиографический список

1. Soltis L. A., Wilkinson T. L. Bolted-connection design. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1987. 21 p.
2. Hanhijärvi A., Kevälinmäki A. Design method against timber failure mechanisms of dowelled steel-to-timber connections // CIB-W18 Timber Structures, Bled, Slovenia, 2007. Paper 40-7-3.
3. Hanhijärvi A., Kevälinmäki 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>.
4. Quenneville P., Zarnani P. Proposal for the Connection Chapter of the New Zealand Design of Timber Structures. Unpublished, 2017.
5. Yurrita M., Cabrero J. M. Effective thickness of timber elements for the evaluation of brittle failure in timber-to-steel connections with large diameter fasteners loaded parallel-to-grain at the elastic range: A new method based on a beam on elastic foundation // Engineering Structures. 2020. Vol. 209. Paper 109959.
6. Jockwer R., Fink G., Köhler J. Assessment of the failure behaviour and reliability of timber connections with multiple dowel-type fasteners // Engineering Structures. 2018. Vol. 172. Pp. 76–84.
7. Gehri E., Mischler A. Multiple shear steel-to-timber joints // Madsen B. Behaviour of Timber Connections.

Vancouver, Canada: Timber Engineering Ltd, 2000. Pp. 367–403.

8. Черных А. Г., Данилов Е. В. Методы исследования соединений деревянных конструкций на когтевых шпонках // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 2. URL: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=8685> (дата обращения: 02.10.2020).

9. Jorissen A. J. M. Double shear timber connections with dowel type fasteners: Ph.D. thesis. Delft, 1998. 284 p.

10. Cabrero J., 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 // *Engineering Structures*. 2018. Vol. 171. Pp. 895–910.

11. Yurrita M., Cabrero J. M., Quenneville P. Brittle failure in the parallel-to-grain direction of multiple shear softwood timber connections with slotted-in steel plates and dowel-type fasteners // *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 216. Pp. 296–313.

12. Jockwer R., Fink G., Köhler J. Assessment of existing safety formats for timber connections - How probabilistic approaches can influence connection design in timber engineering // *International Conference on Connections in Timber Engineering*, Austria, 13.09.2017. Pp. 16–31.

13. Ашкенازی Е. К. Анизотропия древесины и древесных материалов. М.: Лесная промышленность, 1978. 223 с.

14. Максимов П. В., Волков А. И. Расчет каркасных деревянных конструкций с применением МКЭ // *Вестник Пермского нац. исслед. политехн. ун-та. Механика*. 2012. № 1. С. 73–92.

15. Ведяков И. И., Пятикрестовский К. П. Очерк истории создания норм проектирования строительных конструкций. Часть 2 // *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2018. № 3 (18). С. 30–46.

References

1. Soltis L. A., Wilkinson T. L. *Bolted-connection design*. Madison, WI, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1987, 21 p.

2. Hanhijärvi A., Kevälinmäki A. Design method against timber failure mechanisms of dowelled steel-to-timber connections. *CIB-W18 Timber Structures*, Bled, Slovenia, 2007, Paper 40–7–3.

3. Hanhijärvi A., Kevälinmäki 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>

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

5. Yurrita M., Cabrero J. M. Effective thickness of timber elements for the evaluation of brittle failure in timber-to-steel connections with large diameter fasteners loaded parallel-to-grain at the elastic range. A new method based on a beam on elastic foundation. *Engineering Structures*, 2020, vol. 209, Paper 109959.

6. Jockwer R., Fink G., Köhler J. Assessment of the failure behaviour and reliability of timber connections with multiple dowel-type fasteners. *Engineering Structures*, 2018, vol. 172, pp. 76–84.

7. Gehri E., Mischler A. *Multiple shear steel-to-timber joints*. Madsen B. Behaviour of Timber Connections. Vancouver, Canada, Timber Engineering Ltd, 2000, pp. 367–403.

8. Chernykh A. G., Danilov E. V. *Metody issledovaniya soedineniy derevyannykh konstruktsey na kogtevykh shponkakh* [Methods for studying joints of wooden structures on claw dowels]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya – Modern problems of science and education*, 2013, no. 2. Available at: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=8685> (accessed: 02.10.2020).

9. Jorissen A. J. M. Double shear timber connections with dowel type fasteners. Ph.D. thesis. Delft, 1998, 284 p.

10. Cabrero J., 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. *Engineering Structures*, 2018, vol. 171, pp. 895–910.

11. Yurrita M., Cabrero J. M., Quenneville P. Brittle failure in the parallel-to-grain direction of multiple shear softwood timber connections with slotted-in steel plates and dowel-type fasteners. *Construction and Building Materials*, 2019, vol. 216, pp. 296–313.

12. Jockwer R., Fink G., Köhler J. Assessment of existing safety formats for timber connections How probabilistic approaches can influence connection design in timber engineering. *International Conference on Connections in Timber Engineering*, Austria, 13.09.2017, pp. 16–31.

13. Ashkenazi E. K. *Anizotropiya drevesiny i drevesnykh materialov* [Anisotropy of wood and wood materials]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1978, 223 p.

14. Maksimov P. V., Volkov A. I. *Raschet karkasnykh derevyannykh konstruktsey s primeneniem MKE* [Calculation of frame wooden structures with the use of FEM]. *Vestnik Permskogo nats. issled. politekhn. un-ta. Mekhanika – Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Mechanics*, 2012, no. 1, pp. 73–92.

15. Vedyakov I. I., Pyatikrestovskiy K. P. *Ocherk istorii sozdaniya norm proektirovaniya stroitel'nykh konstruktsey. Chast' 2* [Essay on the history of creating the norms for designing building structures. Part 2]. *Vestnik NITs «Stroitel'stvo» – Bulletin of SRC «Construction»*, 2018, no. 3 (18), pp. 30–46.