УДК 624.011

© А. Г. Черных, д-р техн. наук, профессор
© Чан Куок Фонг, аспирант
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Россия)
E-mail: Tranqp125@gmail.com

DOI 10.23968/1999-5571-2020-17-4-89-99

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

АНАЛИЗ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СОЕДИНЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ САМОНАРЕЗАЮЩИХ НАГЕЛЕЙ В РАЗЛИЧНЫХ МОДЕЛЯХ ПЛАСТИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ

ANALYSIS OF THE LOAD BEARING CAPACITY OF THE CONNECTION WITH THE USE OF SELF-DRILLING DOWELS IN VARIOUS MODELS OF ELASTIC FAILURE

В настоящее время все чаще в некоторых областях строительства снова применяются деревянные конструкции, обладающие высокой прочностью, низкой деформируемостью и хорошей эстетикой. Соединения с несколькими стальными пластинами очень эффективны для деревянных рам и ферм. Для создания оптимальных соединений необходимо актуализировать связь между параметрами соединения и несущей способностью конструкции. Однако в технических регламентах отсутствуют методики расчета конкретно для этого типа соединения. Проведены исследование и разработка методов расчета соединений, анализ работы самонарезающих нагелей, определение факторов, влияющих на несущие способности, по Еврокоду 5. Выполнено сравнение полученных результатов с результатами других методов исследований, приведены рекомендации по применению стандарта в России.

Ключевые слова: самонарезающие нагели, деревянные конструкции, метод расчета несущей способности, местное напряжение, пластиковый шарнир.

Currently, wooden structures characterized with high strength, low deformability and good aesthetics are being increasingly used in some areas of construction. Connections with multiple steel plates are very effective for wooden frames and trusses. In order to provide optimal connections, it is necessary to establish the relationship between the connection parameters and the load-bearing capacity of the structure. However, the technical regulations do not provide calculation methods specifically for this type of connection. There have been carried out a research and development of methods for calculating connections, an analysis of the self-drilling dowels' performance, and the factors affecting the load bearing capacity according to Eurocode 5 have been specified. The results obtained have been compared with other various research methods' results, there are offered authors' recommendations on the application of the standard in Russia.

Keywords: self-drilling dowels, wooden structures, method of calculating the load-bearing capacity, local stress, plastic hinge.

Введение

В настоящее время возрастает тенденция применения деревянных конструкций с использованием современных технологий. Требуются конструкции, выдерживающие большие нагрузки, обладающие хорошей эстетикой. В деревянных рамах и фермах применение нагельных соединений — главный фактор при принятии конструктивных решений. Прочность соединения обыч-

но определяет надежность всей конструкции. Нагрузки сосредоточены на соединениях, где и возникает местное напряжение. Расчет несущей способности соединений является актуальной проблемой.

На практике рассматривается и применяется множество решений нагельных соединений (рис. 1). Из рассмотренных примеров разрушений деревянных конструкций [4, 5] большую

Рис. 1. Схемы нагельных соединений: а — с применением гладких стальных нагелей; б — с применением стальных пластин и самонарезающих нагелей

часть составляют конструкции, где использовались нагельные соединения.

Нагельные соединения с использованием металлических пластин увеличивают несущую способность конструкции. Этот тип соединения появился в 1940-х годах [6] и с тех пор созданы различные конструкции: крупнопролетная ферма, выполненная из узлов с несколькими стальными пластинами [7], здание Treet в Бергене (Норвегия), 14-этажное деревянное здание из вертикальных ферм [8], Швейцарский федеральный технологический институт в Цюрихе (ETH) [12].

Хотя соединения со стальными пластинами с нагелями применялись на практике в течение длительного времени [2, 3, 9, 10, 11], стандарты и методы расчета все еще ограничены, не специфичны для этого типа соединения. В предыдущих исследованиях механизмы разрушения соединения рассматривались с помощью экспериментов, но без создания систематической зависимости параметров, влияющих на несущую способность конструкции. Соединение может отказываться двумя различными способами: с пластическим или хрупким характером разрушения. Желательно спроектировать конструкцию так, чтобы достичь пластического разрушения раньше хрупкого. В данной работе рассмотрено соединение в пластическом предельном состоянии при изменении конструктивных параметров: количества стальных пластин, количества нагелей (диаметр 5–7 мм) и расположения стальных пластин в структуре соединения [12].

1. Методы

1.1. Геометрия соединения

На рис. 2 показан типичный пример соединения со стальными пластинами и четырьмя плоскостями сдвига¹. Основные параметры деревянных конструкций — ширина b и толщина h (мм). Толщина древесины h состоит из трех основных частей: два наружных элемента толщиной t_1 и один в центре толщиной t_2 , а также двух стальных пластин толщиной t_p .

Механизм разрушения соединения элементов деревянных конструкций с применением самонарезающих нагелей приведен на схеме (рис. 3). В данной работе рассматриваются разные исследовательские модели этого механизма.

Цель настоящей работы — проведение расчета несущей способности соединения «сталь–дерево» с применением самонарезающих нагелей при условии пластического рабочего состояния в зоне разрушения. Сравниваются результаты с различными расчетными моделями путем проверки по различным формулам. Стандартный метод для расчета соединения с применением нагелей предложен в Еврокоде 5 (EN 1995-1-1)². В рамках данной статьи предлагается расчет соединения с двумя металлическими пластинами в целях оптимизации несущей способности нагелей и разрабатываются методы расчета моделей

¹ AS/NZS 1328.1:1998. Glued laminated structural timber — Performance requirements and minimum production requirements. Joint Technical Committee TM/4, 1998.

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.

Рис. 2. Соединение «сталь – дерево» с применением самонарезающих нагелей

пластического разрушения для соединений с несколькими плоскостями среза и рекомендации по применению расчетных моделей к российским нормам.

1.2. Режим хрупкого разрушения (рис. 4)

Все возможные режимы разрушения соединения рассматриваются в трех источниках: Quenneville & Zarnani [3], Еврокод 5

и Hanhijärvi & Kevälinmäki [2] (табл. 1). Кроме того, стандарт CSA O86:2009³ рассматривает полную модель хрупкого разрушения.

Модели хрупкого разрушения содержат формулы для расчета прочности каждого из элементов древесины. Следовательно, сопротивление нагельного соединения хрупкому разрушению для случаев одиночного или двойного сдвига будет равно сумме прочностей каждого древесного элемента [13].

1.3. Режим пластического разрушения

Как указано во введении, в предыдущих стандартах не предусмотрен метод расчета режима пластического разрушения при многократных соединениях плоскостей среза. Модели, предложенные Pedersen [10] с четырьмя связями плоскостей среза и Sawata et al. [11] для соединений любого числа плоскостей среза, представлены на рис. 5.

1.3.1. Метод Еврокода 5

В соответствии с пунктом 8.1.3 (2) Еврокода 5 несущая способность многосрезного соединения в каждой плоскости среза определяется исходя из предположения, что каждая плоскость среза является частью нескольких соединений из

³ CSA Standard, O86:2009. Engineering design in wood. Canadian Standards Association, 2009.

Рис. 3. Блок-схема механизма разрушения соединения «сталь – дерево»

Рис. 4. Хрупкое разрушение: а — заделка; б — расщепление; в — сдвиг ряда; з — сдвиг блока; д — растягивающие напряжения

Таблица 1

Несущая способность нагелей в соединениях с моделями хрупкого разрушения

Модели разрушения	Сдвиг и расщепление рядов	Сдвиг блока	Растягивающие напряжения
Еврокод 5	$n_{ef} = \min \left\{ \begin{array}{l} n_c \\ n_c^{0,9} \sqrt{\frac{a_1}{13d}} \end{array} \right. \quad (1)$	$F_{B,block} = \max \left\{ \begin{array}{l} 1,5 A_{net,t} f_{t,0,k} \\ 0,7 A_{net,v} f_{v,k} \end{array} \right. \quad (2)$	$\tilde{A}_{t,0,d} = f_{t,0,d} \quad (3)$
Quenneville et al. [3, 15]	$F_{B,row} = R_v n_r$ $R_v = 0,75 f_{v,k} K_{LS} n_c 2a_{cr,t} \quad (4)$	$F_{B,block} = R_v + 1,25 f_{t,0,k} A_{net,t} \quad (5)$	$F_{B,net} = f_{t,0,k} A_{net} \quad (6)$
Hanhijärvi & Kevarinmäki [1, 2]	Предлагается комплексная расчетная модель, интегрирующая все возможные режимы хрупкого разрушения для соединений с нагелями		
	$F_B = \min \left\{ \begin{array}{l} F_{b,1} \left(2 + \frac{t_2}{t_1} \right) \quad \text{Отказ внешнего элемента (7)} \\ F_{b,1} \left(1 + 2 \frac{t_1}{t_2} \right) \quad \text{Отказ внутреннего элемента} \end{array} \right.$		

трех элементов. Таким образом, четырехсрезное соединение вычисляется как сумма двухсрезных и односрезных соединений (рис. 6).

$$F_{v,Rk} = 2F_{v,Rk(б)} + 2F_{v,Rk(в)}; \quad (8)$$

$$f_{h,1,k} t_1 d \quad (f)^4 \quad (9)$$

$$F_{v,Rk(l)} = \min \left\{ \begin{array}{l} f_{h,1,k} t_1 d \\ f_{h,1,k} t_1 d \left[\sqrt{2 + \frac{4M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} d t_1^2}} - 1 \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}; \quad (g) \quad (10) \\ 2,3 \sqrt{M_{y,Rk} f_{h,2,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (h) \quad (10) \end{array} \right.$$

⁴ Буквы (f)–(m) означают виды разрушения соединений древесины со стальными пластинами (см. Еврокод 5, с. 41).

$$F_{v,Rk(в)} = \min \left\{ \begin{array}{l} 0,5 f_{h,2,k} t_2 d \quad (j/l) \quad (11) \\ 1,15 \sqrt{2M_{y,Rk} f_{h,2,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (m) \quad (12) \end{array} \right.$$

1.3.2. Метод Pedersen

Pedersen [10] предложил метод, основанный на ЕУМ (европейской модели текучести), модифицирующий уравнения для соединения с четырьмя плоскостями среза. Несущая способность соединения, учитывая пластическое разрушение, может быть определена как

$$F_D = F_y n_s n_c n_r, \quad (13)$$

Рис. 5. Модели пластического разрушения

где F_D — несущая способность соединения при пластическом разрушении; n_s — число плоскостей среза; F_y — несущая способность каждой плоскости среза в одном нагельном элементе, определяемая как

$$\frac{1}{4}(2t_1 + t_2)d \cdot f_{h,0} \quad (\text{Модель 1}) \quad (14)$$

$$\left(-\frac{1}{2}t_1 + \frac{t_2}{4} + \sqrt{\frac{1}{2}t_1^2 + \frac{M_y}{d \cdot f_{h,0}}} \right) d \cdot f_{h,0} \quad (\text{Модель 2}) \quad (15)$$

$$\sqrt{4M_y \cdot d \cdot f_{h,0}} \quad (\text{Модель 3}) \quad (16)$$

$$F_y = \min \left\{ \left(\frac{1}{2}t_1 + \frac{1}{2} \times \sqrt{t_1^2 + \frac{2M_y}{d \cdot f_{h,0}}} \right) d \cdot f_{h,0} \quad (\text{Модель 4}) \quad (17) \right.$$

$$\left(\sqrt{\frac{M_y}{d \cdot f_{h,0}}} + \frac{1}{2}t_1 \right) d \cdot f_{h,0} \quad (\text{Модель 5}) \quad (18)$$

$$\left(\sqrt{\frac{M_y}{d \cdot f_{h,0}}} + \frac{1}{4}t_2 \right) d \cdot f_{h,0} \quad (\text{Модель 6}) \quad (19)$$

$$\left(-\frac{1}{2}t_1 + \frac{1}{2} \times \sqrt{t_1^2 + \frac{2M_y}{d \cdot f_{h,0}}} + \sqrt{\frac{M_y}{d \cdot f_{h,0}}} \right) d \cdot f_{h,0} \quad (\text{Модель 7}) \quad (20)$$

где $f_{h,0}$ — нормативное сопротивление смятию древесины и M_y — нормативный момент пластической деформации нагеля — это значения, определенные в Еврокоде 5.

1.3.3. Method Sawata et al.

Sawata et al. [11] разработали аналогичный метод, основанный на ЕУМ. Вместо того чтобы

Рис. 6. Плоскости среза в нескольких срезных соединениях

получить значение для каждой плоскости среза, они предложили набор уравнений, который обеспечивает эффективную толщину t_{ef} нагельного элемента вдоль всего соединения, которая определяется как:

$$2t_1 + (n_s - 1)t_2 \quad (\text{Модель 1}) \quad (21)$$

$$2t_1 \left(\sqrt{2 + \frac{2}{3} \cdot \frac{M_y}{d \cdot f_{h,0}} \times \left(\frac{d}{t_1}\right)^2} - 1 \right) + (n_s - 1)t_2 \quad (\text{Модель 2}) \quad (22)$$

$$n_s \cdot d \sqrt{\frac{8}{3} \cdot \frac{M_y}{d \cdot f_{h,0}}} \quad (\text{Модель 3}) \quad (23)$$

$$t_{ef} = \min \left\{ 2t_1 + (n_s - 1) \sqrt{\frac{8}{3} \cdot \frac{M_y}{d \cdot f_{h,0}}} \right. \quad (\text{Модель 4}) \quad (24)$$

$$\left. d \sqrt{\frac{8}{3} \cdot \frac{M_y}{d \cdot f_{h,0}}} + (n_s - 1)t_2 \right\} \quad (\text{Модель 5}) \quad (25)$$

$$2t_1 \left(\sqrt{2 + \frac{2}{3} \cdot \frac{M_y}{d \cdot f_{h,0}} \left(\frac{d}{t_1}\right)^2} - 1 \right) + (n_s - 1)d \sqrt{\frac{8}{3} \cdot \frac{M_y}{d \cdot f_{h,0}}} \quad (\text{Модель 6}) \quad (26)$$

Общая пластическая способность соединения F_D определяется как

$$F_D = t_{ef} f_{h,0} d n_c n_r \quad (27)$$

1.3.4. Сравнение моделей пластического разрушения

Чтобы проверить точность двух описанных моделей, их содержание было сопоставлено с другими исследованиями [14] (рис. 7). Оба метода достигают очень хорошего соответствия с ре-

зультатами теста. Поскольку метод [10] несколько более точен, он был использован в данной работе для получения пластической способности выполненных испытаний.

2. Расчет и разработка модели

2.1. Входные параметры

Для исследования пластичности соединения с самонарезающими нагелями спроектирована модель соединения с переменными параметрами, включающими: положение стальных пластин в соединении, количество нагелей, диаграмму положения нагелей в соединении (характеристический интервал). Для расчетов приняты следующие параметры: самонарезающие нагели WS-7×133, $\phi 7$ мм, $L = 133$ мм, $f_u = 600$ Н/мм², $M_y = 31\,930$ Н·мм. Две стальные пластины толщиной 5 мм с характерным пределом текучести $f_{y,k} = 300$ Н/мм². Деревянная конструкция LVL с геометрическими размерами $b \times h = 140 \times 140$ мм²; $f_{t,0,k} = 28,98$ Н/мм²; $F_{v,k} = 2,6$ Н/мм² (параметры по СТО 36554501-021-2010⁵).

2.2. Оптимальное положение стальных пластин в соединении

Из формул предыдущих исследований следует, что параметры t_1 и t_2 определяют зависимость несущей способности соединения от положения секций (положения стальных пластин). При наличии устойчивых к сжатию связей внешняя на-

⁵ СТО 36554501-021-2010. Деревянные конструкции. Много-слойный клееный из шпона материал Ultralam (Ультралам). Общие технические требования.

Рис. 7. Сравнение результатов испытаний, выполненных по [14], и методами, описанными в [10, 11]

грузка симметрична, соотношение между t_1 и t_2 следует уравнению

$$t_2 = h - 2(t_1 + t_p). \quad (28)$$

В структуре соединения рассмотрим изменение t_1 с шагом 5 мм ($10 \text{ мм} \leq t_1 \leq b = 140 \text{ мм}$). Несущая способность нагеля в соединениях в зависимости от положения стальных пластин представлена в табл. 2 и на рис. 8.

В данном исследовании за основу принят способ расчета Еврокода 5, который сравнивается с другими расчетными моделями. Соединение является оптимальным, когда его несущая способность наибольшая. При расчете получаем: $F_{\max} = \max(F_{\min}) = 17,61 \text{ кН}$, что соответствует значениям $t_1 = 45 \text{ мм}$; $t_2 = 40 \text{ мм}$, и $F_{\max}$ достигается в модели пластического разрушения ($g + l$). В результате каждый метод расчета предлагает различные оптимальные модели соединения с четырьмя плоскостями среза. Согласно [10] получено оптимальное соединение с пластическим разрушением по модели 7, и согласно [11] — по модели 5. По Еврокоду 5 суммой моделей $g + l$ получен лучший результат несущей способности нагеля. На рис. 9 показаны результаты расчетов.

2.3. Разработка расчета моделей пластического разрушения в соединении с несколькими плоскостями среза

Расчетное уравнение для прочности на сдвиге древесного соединения с нагелями основаны на теории, первоначально предложенной Йохансеном (Johansen) [16]. При увеличении количества стальных пластин соединения, работающего на сжатие и растяжение, положение стальных пластин симметричное, чтобы обеспечить равномерное распределение нагрузки. Поэтому два геометрических параметра, влияющих на несущую способность соединения, по-прежнему равны t_1 и t_2 в соединении с несколькими стальными пластинами.

В исследовании [10], в котором рассматривается положение самой наружной стальной пластины, формулы (14)–(20) обеспечивает соотношение несущей способности нагеля одной плоскости среза в соединении на наружной и внутренней частях самой внешней стальной пластины (см. рис. 6). Несущая способность нагеля в соединении линейно зависит от количества стальных пластин n_s и рассчитывается по формуле (13).

В исследовании [11] несущая способность соединения учитывает все стальные пластины в соединении. Каждый случай пластического разрушения рассчитывается в зависимости от количества стальных пластин. Уравнение (27) выглядит как

$$F_D = f(n_s) f_{h,0} d n_c n_r.$$

Согласно Еврокоду 5, несущая способность нагеля в соединении учитывается независимо от каждой плоскости среза. Формула (8) для соединения с несколькими стальными пластинами будет выглядеть как

$$F_{v,Rk} = 2F_{v,Rk(6)} + (2n_s - 2)F_{v,Rk(6)}, \quad (30)$$

где n_s — количество стальных пластин в соединении.

Из результатов расчета п. 2.2 получаем оптимальные типы соединения по разным моделям (см. рис. 9). При увеличении количества стальных пластин вычисления выполняются для каждого типа соединения (оптимизированного с помощью расчетной модели) в соответствии с рассматриваемыми расчетными моделями. В табл. 3 показан пример расчета для соединения с двумя и тремя стальными пластинами.

Согласно расчетным моделям выполняем расчет с увеличением количества стальных пластин в соединении. В результате получим диаграмму значения несущей способности нагеля в соединении при увеличении количества стальных пластин (рис. 10). Предлагаем применить полученные формулы в стандартах расчета данных конструкций в России.

Рекомендуемый выбор метода расчета в зависимости от количества стальных пластин n_s :

■ n_s от 1 до 3 — значение несущей способности нагеля принимать по результатам расчета от F_{Pe} до F_{Eu-5} ;

■ n_s от 3 до 6 — значение несущей способности нагеля принимать по результатам расчета от F_{Pe} или F_{Sa} до F_{Eu-5} ;

■ n_s от 6 до 10 — значение несущей способности нагеля принимать по результатам расчета по F_{Pe} до F_{Sa} .

Выводы

В работе представлены модели расчета пластических разрушений соединений, в которых экспериментально проверяются две модели — Pedersen [10] и Sawata et al. [11]. Расчеты по Еврокоду 5 сравниваются с этими двумя моделями.

Таблица 2

Значение несущей способности нагелей с различными моделями НДС**А. По Еврокоду 5**

№	t_1	t_2	Модель f	Модель g	Модель h	Модель l	Модель m	$F_{v,Rk(a)}$	$F_{v,Rk(б)}$	F_{En-5} , кН
1	10	110	2,03	3,81	5,85	11,16	4,14	2,03	4,14	12,34
2	15	100	3,04	3,62	5,85	10,14	4,14	3,04	4,14	14,36
3	20	90	4,06	3,61	5,85	9,13	4,14	3,61	4,14	15,50
4	25	80	5,07	3,72	5,85	8,11	4,14	3,72	4,14	15,73
5	30	70	6,09	3,91	5,85	7,10	4,14	3,91	4,14	16,11
6	35	60	7,10	4,16	5,85	6,09	4,14	4,16	4,14	16,59
7	40	50	8,11	4,44	5,85	5,07	4,14	4,44	4,14	17,16
8	45	40	9,13	4,75	5,85	4,06	4,14	4,75	4,06	17,61
9	50	30	10,14	5,08	5,85	3,04	4,14	5,08	3,04	16,24
10	55	20	11,16	5,42	5,85	2,03	4,14	5,42	2,03	14,90
11	60	10	12,17	5,78	5,85	1,01	4,14	5,78	1,01	13,59

Б. По Pedersen [10]

№	Модель 1	Модель 2	Модель 3	Модель 4	Модель 5	Модель 6	Модель 7	F_{pe} , кН
1	6,59	7,49	5,09	3,08	3,56	8,12	3,60	12,32
2	6,59	6,88	5,09	3,88	4,07	7,62	3,38	13,52
3	6,59	6,37	5,09	4,74	4,57	7,11	3,23	12,91
4	6,59	5,92	5,09	5,65	5,08	6,60	3,12	12,48
5	6,59	5,51	5,09	6,58	5,59	6,10	3,04	12,15
6	6,59	5,12	5,09	7,53	6,10	5,59	2,98	11,90
7	6,59	4,76	5,09	8,50	6,60	5,08	2,93	11,71
8	6,59	4,40	5,09	9,47	7,11	4,57	2,89	11,55
9	6,59	4,06	5,09	10,45	7,62	4,07	2,85	11,42
10	6,59	3,73	5,09	11,44	8,12	3,56	2,83	11,31
11	6,59	3,40	5,09	12,43	8,63	3,05	2,81	11,22

В. По Sawata et al. [11]

№	Модель 1	Модель 2	Модель 3	Модель 5	Модель 6	Модель 7	F_{sa} , кН
1	71,00	92,54	116,37	16,53	96,04	112,87	8,26
2	66,94	85,11	116,37	18,55	89,95	111,53	9,28
3	62,89	77,93	116,37	20,58	83,86	110,44	10,29
4	58,83	70,98	116,37	22,61	77,78	109,57	11,31
5	54,77	64,23	116,37	24,64	71,69	108,91	12,32
6	50,72	57,67	116,37	26,67	65,61	108,43	13,33
7	46,66	51,26	116,37	28,70	59,52	108,10	14,35
8	42,60	44,98	116,37	30,73	53,44	107,92	15,36
9	38,54	38,83	116,37	32,75	47,35	107,85	16,38
10	34,49	32,78	116,37	34,78	41,26	107,88	16,39
11	30,43	26,82	116,37	36,81	35,18	108,01	13,41

Рис. 8. Зависимости несущей способности нагеля от типа соединения метода расчета

Рис. 9. Несущая способность соединения и геометрия соединения, полученные из результатов расчета

Расчеты по Еврокоду 5 соответствуют принципу распределения и передачи нагрузки для соединения с двумя стальными пластинами. Этот результат аналогичен расчетам по методу [10], но является более оптимальным.

В методе [11] учет связи между поперечными сечениями на нагеле вместо учета несущей

способности на каждом отдельном поперечном сечении увеличивает несущую способность нагелей. Согласно предыдущим исследованиям и результатам расчета, метод [11] менее точен, чем метод [10] и Еврокод (см. рис. 9).

Для расчета соединений в зависимости от количества стальных пластин в соединении по рос-

Таблица 3

Пример расчета для различных типов соединения

Количество стальных пластин n_s	Варианты соединения	F_{Eu-S} , кН	F_{Pe} , кН	F_{Sa} , кН
2	$t_1 = 15; t_2 = 100$	14,36	13,52	9,28
	$t_1 = 45; t_2 = 40$	17,61	11,55	15,36
	$t_1 = 30; t_2 = 50$	16,24	11,42	16,38
3	$t_1 = 15; t_2 = 100$	22,64	20,28	13,43
	$t_1 = 45; t_2 = 40$	25,73	17,32	19,52
	$t_1 = 30; t_2 = 50$	22,33	17,13	20,53

Рис. 10. Зависимость несущей способности нагеля от количества стальных пластин

сийским нормам целесообразно использовать методику, предложенную автором в п. 2.3.

При расчете соединения в условиях пластического разрушения все еще существуют противоречивые результаты. Для метода Еврокода 5 необходимо провести дополнительные исследования, чтобы определить коэффициент надежности формул и расчетных теорий.

Расчет соединения в условиях пластического разрушения является основой для разработки схемы расположения нагелей и оптимизации их количества в соединении при исключении возможности хрупкого разрушения.

Библиографический список

1. Hanhijärvi A., Kevarinmäki A. Design method against timber failure mechanisms of dowelled steel-to-timber connections // CIB-W18 Timber Structures, Bled, Slovenia, 2007. Paper 40-7-3.
2. 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. URL: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/publications/2008/P677.pdf>.
3. Quenneville P., Zarnani P. Proposal for the Connection Chapter of the New Zealand Design of Timber Structures standard, Unpublished, 2017.
4. Frühwald E., Serrano E., Toratti T., Emilsson A., Thelandersson S. Design of safe timber structures – How can we learn from structural failures in concrete, steel and timber? Report TVBK-3053 (Technical Report). Division of Structural Engineering, Lund University, 2007. 230 p.
5. Frühwald E. Analysis of structural failures in timber structures: typical causes for failure and failure modes // Eng. Struct. 2011. Vol. 33, № 11. Pp. 2978–2982.
6. Gehri E. Multiple shear steel-to-timber joints // Madsen B. Behaviour of Timber Connections. Vancouver, Canada: Timber Engineering Ltd, 2000. Pp. 367–403.
7. Crocetti R. Large-span timber structures // Proceedings of the World Congress on Civil, Structural and Environmental Engineering (CSEE'16), Prague, Czech Republic. 2016. Pp. 1–23. <https://doi.org/10.11159/icseem16.124>.
8. Malo K. A., Abrahamsen R. B., Bjertnæs M. A. Some structural design issues of the 14-storey timber framed building “Treet” in Norway // Eur. J. Wood Prod. 2016. Vol. 74. Pp. 407–424. <https://doi.org/10.1007/s00107-016-1022-5>.
9. Jorissen A. J. M. Double shear timber connections with dowel type fasteners: Ph.D. thesis. Delft, 1998. 284 p.
10. Pedersen M. U. Dowel Type Timber Connections. Strength Modelling: Ph.D. thesis. Danmarks Tekniske Universitet, 2002. 165 p.
11. 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. <https://doi.org/10.1007/s10086-006-0800-9>.
12. van de Kuilen I. J.-W. Leistungsfähigen Verbindungen für Holzbrücken – Holz-Holz und Holz-Stahl // Internationale Holzbrückentage. 2010. 18 p.
13. 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. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.03.037>.

14. Rossi S., Crocetti R., Honfi D., Frühwald Hansson E. Load-bearing capacity of ductile multiple shear steel-to-timber connections // *Proceeding of WCTE – World Conference on Timber Engineering*, 2016. Vienna, Austria.

15. Quenneville P. J., Franke S., Swager T. *Timber Portal Frames Design Guide – Australia*. Christchurch, New Zealand: Structural Timber Innovation Company, 2011.

16. Johansen K. W. *Theory of timber connections*. International Association of Bridge and Structural Engineering, Bern. 1949. Publication No. 9. Pp. 249–262.

References

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

2. 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 Publ., 2008, no. 677. Available at: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/publications/2008/P677.pdf>

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

4. Frühwald E., Serrano E., Toratti T., Emilsson A., Thelandersson S. *Design of safe timber structures. How can we learn from structural failures in concrete, steel and timber?* Report TVBK-3053 (Technical Report). Division of Structural Engineering, Lund University Publ., 2007, 230 p.

5. Frühwald E. Analysis of structural failures in timber structures: typical causes for failure and failure modes. *Eng. Struct.*, 2011, vol. 33, no. 11, pp. 2978–2982.

6. Gehri E. *Multiple shear steel to timber joints*. In: Madsen B. *Behaviour of timber connections*. Vancouver, Canada: Timber Engineering Ltd, 2000, pp. 367–403.

7. Crocetti R. *Large-span timber structures*. In: *Proceedings of the World Congress on Civil, Structural and Environmental Engineering (CSEE'16)*, Prague, Czech Republic, 2016, pp 1–23. Available at: <https://doi.org/10.11159/icsenm16.124>

8. Malo K. A., Abrahamsen R. B., Bjertnæs M. A. Some structural design issues of the 14-storey timber framed building “Treet” in Norway. *Eur. J. Wood Prod.*, 2016, vol. 74, pp. 407–424. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00107-016-1022-5>.

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

10. Pedersen M. U. *Dowel type timber connections. Strength Modelling*. PhD thesis. Danmarks Tekniske Universitet Publ., 2002, 165 p.

11. 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>.

12. Van de Kuilen I. J. W. *Leistungsfähigen Verbindungen für Holzbrücken–Holz-Holz und Holz-Stahl*. Internationale Holzbrückentage, 2010.

13. 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. *Eng. Struct.*, 2018, vol. 171, pp. 895–910. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.03.037>.

14. Rossi S., Crocetti R., Honfi D., Frühwald Hansson E. *Load-bearing capacity of ductile multiple shear steel-to-timber connections*. *Proceedings of WCTE – World Conference on Timber Engineering*, 2016, Vienna, Austria.

15. Quenneville P. J., Franke S., Swager T. *Timber portal frames design guide*. Australia, Christchurch; New Zealand, Structural Timber Innovation Company, 2011.

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