

РАСЧЁТ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СОЕДИНЕНИЯ SHERPA С УКРЕПЛЕНИЕМ МЗП В ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЯХ ИЗ КОМБИНАЦИИ СТЕНОВОЙ ПАНЕЛИ-CLT С БАЛКОЙ ИЗ CLT И LVL

Сюй Юнь¹

¹ ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет», Санкт-Петербург, Россия (190005, г. Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, д. 4, e-mail: xyqh111@hotmail.com

Предложена наиболее расчётная схема, позволяющая найти оптимальный подход для повышения несущей способности соединения SHERPA в деревянных конструкциях из комбинации стеновой панели-CLT с балкой из CLT и LVL. Рассмотрена расчётная методика применения металлических зубчатых пластин для повышения прочности смятия в гнезде древесины, которая зависит от прочности смятия в гнездах древесины, МЗП, металлических накладок и прочности шурупа на изгиб. Автором предложен численный алгоритм. С целью проверки достоверности численного исследования проведены испытания для определения несущей способности соединения SHERPA с укреплением МЗП. Проведен сравнительный анализ полученных расчётных и экспериментальных результатов, показана удовлетворительная сходимость. Подтверждена эффективность использования МЗП для повышения несущей способности соединения на изгиб в целом.

Ключевые слова: МЗП, повышение несущей способности на изгиб, соединение SHERPA

THE CALCULATION OF THE LOAD BEARING CAPACITY OF THE REINFORCED CONNECTION SHERPA WITH NAIL-PLATES IN THE WOODEN STRUCTURE FROM THE COMBINATION OF WALL PANEL-CLT AND BEAM FROM CLT OR LVL

Xu Yun¹

¹ Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPSUACE), St. Petersburg, Russia (190005, St. Petersburg, 2-nd Krasnoarmeiskaya St. 4). e-mail: xyqh111@hotmail.com

This paper offers a analytical method that allows to find the best approach to improve the shear strength of the connection SHERPA in the wooden structures from the combination of wall panel-CLT with beam for CLT or LVL. The analytical model is considered to the application of nail-plate for increasing the compressive strength in the hole of wood, which depends on the compressive strength in the hole of the wooden materials, metal plates and the bending strength of screws. A new numerical algorithm is proposed. In order to validate the numerical research a test is conducted to determine the shear strength of connection SHERPA with nail-plate. The comparative analysis of the calculated and experimental results shows the satisfactory convergence. Efficiency of using nail-plate for increasing the shear strength of connection as a whole is conformed.

Keywords: nail-plate, increase the shear strength, connection SHERPA

МЗП (Металлические Зубчатые Пластины), изготавливаемые из листовой стали с толщиной от 1 до 2 мм по методу холодной штамповки, применяются в соединениях элементов деревянных конструкций. МЗП состоит из системы зубьев, формируемых в результате штамповки и отогнуты относительно поверхности пластины под прямым углом [3]. Несущую способность деревянных конструкций на МЗП определяют по условиям смятия древесины в гнездах и изгиба зубьев пластин, а также по условиям прочности пластин при работе на сжатие, растяжение и сдвиг [2]. Поскольку прочности смятия в гнезде древесины наиболее влияет на несущую способность соединений SHERPA сдвигу в деревянных конструкциях, может быть повышена несущая способность соединения на изгиб.

Исследование соединений деревянных элементов на металлических зубчатых пластинах и дюбелях с зубчатыми шайбами поляризационно-оптическим методом при действии кратковременных нагрузок известны работы [1]. Методика повышения несущей способности соединений с укреплением МЗП была предложена в работе [4] впервые. В работе [5] были проведены испытания соединения деревянных конструкций на цилиндрических нагелях с укреплением МЗП и был предложен численный алгоритм в соответствии с нормами *EC5* и *1052:2008-12*.

Целью настоящей работы является формирование математического алгоритма для определения несущей способности соединения SHERPA с укреплением МЗП в деревянных конструкциях и проверка достоверности экспериментального и численного исследования.

В диссертационной работе автора было проведено численное и экспериментальное исследование несущей способности шурупа с укреплением МЗП на сдвиг и автором предложен численный алгоритм. На основе этих работ несущая способность соединения SHERPA с креплением МЗП зависит от следующих факторов:

- прочности шурупов на выдергивание и изгиб;
- прочности смятия в гнезде древесины, МЗП и металлических накладок;
- физико-механических характеристик деревянного элемента;
- расположения и количества шурупов;

Автором предложен численный алгоритм для определения несущая способность соединения SHERPA с креплением МЗП, показанный в следующих уравнениях:

- несущая способность шурупа с укреплением МЗП при сдвиге под углом α к волокнам, Н:

$$F_{v,\alpha,k,2} = \min \begin{cases} b_1^{M_1} \cdot f_{h,\alpha,k} \cdot d + \frac{F_{ax,\alpha,k}}{4} \\ b_1^{C_1} \cdot f_{h,\alpha,k} \cdot d + \frac{F_{ax,\alpha,k}}{4} \\ b_1^{M_2} \cdot f_{h,\alpha,k} \cdot d + \frac{F_{ax,\alpha,k}}{4} + 2f_{y,k} \cdot b_2 \cdot d \\ b_1^{M_3} \cdot f_{h,\alpha,k} \cdot d + \frac{F_{ax,\alpha,k}}{4} + 2f_{y,k} \cdot b_2 \cdot d \\ b_1^{C_3} \cdot f_{h,\alpha,k} \cdot d + \frac{F_{ax,\alpha,k}}{4} + 2f_{y,k} \cdot b_2 \cdot d \\ b_1^4 \cdot f_{h,\alpha,k} \cdot d + \frac{F_{ax,\alpha,k}}{4} + 2f_{y,k} \cdot b_2 \cdot d \end{cases} \quad (1)$$

$$b_1^{M_2} = \frac{-(t_1 + \beta \cdot t_2) + \sqrt{(t_1 + \beta \cdot t_2)^2 + (\beta \cdot t_2^2 + t_1^2) \cdot (1 + 4m + 2y \cdot m^2 + \beta)}}{1 + 4m + 2y \cdot m^2 + \beta} \quad (2)$$

$$b_1^{M_3} = \frac{-t_1 + \sqrt{t_1^2 + \left(\frac{4M_y}{f_1 \cdot d} + t_1^2\right) \cdot (1 + 4m + 2y \cdot m^2 + 2\beta)}}{1 + 4m + 2y \cdot m^2 + 2\beta} \quad (3)$$

$$b_1^{C_3} = \frac{-\beta \cdot t_2 + \sqrt{(\beta \cdot t_2)^2 + \left(\beta \cdot t_2^2 + \frac{4M_y}{f_1 \cdot d}\right) \cdot (2 + 4m + 2y \cdot m^2 + \beta)}}{2 + 4m + 2y \cdot m^2 + \beta} \quad (4)$$

Где:

$F_{v,\alpha,k,1}$ — несущая способность шурупа без МЗП при сдвиге под углом α к волокнам,

H;

$F_{v,\alpha,k,2}$ — несущая способность шурупа с укреплением МЗП при сдвиге под углом α к волокнам, H;

$f_{h,\alpha,k}$ — прочность смятию в гнезде древесины под углом α к волокнам, МПа; для CLT и LVL при $\alpha=0^\circ$, $f_{h,0,k} = 0,15d^{-0,3} \cdot \rho_k$; при $\alpha=90^\circ$, $f_{h,0,k} = 0,15 \cdot 1,58d^{-0,3} \cdot \rho_k$ [SIA 265:2003];

M_y — прочность шурупа при изгибе, МПа; для CLT $M_y = f_{u,k} \cdot \frac{d^3}{6}$; для LVL $M_y = 0,13f_{u,k} \cdot d^3$ [ENV 1998-1 1:1993];

$f_{u,k}$ — прочность шурупа на растяжение, МПа; $f_{u,k} = 600$ МПа [Europäische technische Zulassung ETA-12/0067];

$F_{ax,k}$ — несущая способность шурупа на выдергивание под углом α к волокнам, H; для

CLT $F_{ax,k} = \frac{f_{ax,90,k} \cdot d \cdot l_{ef}}{(\sin \alpha)^2 + 1,5(\cos \alpha)^2}$, $f_{ax,90,k} = 0,0872 \rho_k \cdot d^{-0,4119} \cdot \frac{1}{\pi}$ [DIN 1052:2008]; для LVL

$F_{ax,k} = \pi \cdot d \cdot l_{ef} \cdot f_{ax,\alpha,k}$, $f_{ax,\alpha,k} = \frac{f_{ax,90,k}}{(\sin \alpha)^2 + 1,5(\cos \alpha)^2}$, $f_{ax,90,k} = 0,003(\pi d \cdot l_{ef})^{-0,2} \cdot \rho_k$ [SIA 265:2003];

$f_{ax,90,k}$ — прочность на выдергивание шурупы поперек волокон, МПа;

$f_{y,k}$ — предел текучести МЗП, МПа; $f_{y,k} = 187$ МПа; ρ_k — плотность древесины, кг/м³;

n — соотношение b_1 и b_2 ; $n = b_2/b_1$; $n=1$; m — соотношение b_1 и b_3 ; $m = b_3/b_1$; $m = \beta - 1$;

γ — соотношение f_1 и f_2 ; $\gamma = 2f_{y,k}/f_{h,\alpha,k}$; β — соотношение f_1 и f_3 ; $\beta = f_3/f_{h,\alpha,k}$;

b_1 — длина распределения действующего напряжения смятия в гнезде древесины, мм;

b_2 — длина распределения действующего напряжения смятия в гнезде МЗП, мм;

b_3 — длина распределения действующего напряжения смятия в гнезде металлической накладке, мм; $b_3 = 8$ мм;

t_1 — эффективная длина резьбы, мм; $t_1 = 42$ мм; t_2 — толщина металлической накладке, мм; $t_2 = 1$ мм;

a_1 — длина распределения действующего напряжения смятия в гнезде древесины, мм;

a_2 — длина распределения действующего напряжения смятия в гнезде металлической накладки, мм;

- несущая способность смятию в гнезде металлических накладок, Н:

$$F_3 = 0,01f_3 \cdot d \cdot t_3 \quad (5)$$

- несущая способность соединения SHERPA при изгибе в панели-CLT и балке из CLT и LVL, Н:

$$F_{v,k,панельsherpa} = n \cdot (F_{v,\alpha,k,1} + F_{2,k,1} + F_{2,k,2} + F_3) \quad (6)$$

$$F_{v,k,балкаsherpa} = n \cdot (F_{v,\alpha,k,1} + F_{2,k,1} + F_{2,k,2} + F_3) \quad (7)$$

$$F_{v,k,sherpa} = \min(F_{v,k,панельsherpa}, F_{v,k,балкаsherpa}) \quad (8)$$

Где:

$F_{v,k,панель,sherpa}$ — несущая способность соединения SHERPA при изгибе в деревянных конструкциях из комбинации стеновой панели-CLT с балкой из CLT и LVL, Н;

$F_{v,k,sherpa}$ — несущая способность соединения SHERPA при изгибе в стеновой панели-CLT, Н;

$F_{v,k,балка,sherpa}$ — несущая способность соединения SHERPA при изгибе в балке из CLT и LVL, Н;

$R_{ax,k}$ — несущая способность шурупа на выдергивание под углом к волокнам, Н;

μ — коэффициент силы трения; $\mu = 0,25$; n — количество шурупов;

$m_{1/2}$ — виды разрушения в соответствии с теорией *Johansen*;

Для получения экспериментальных значений нормативной прочности в механической лаборатории СПбГАСУ проведены испытания на выдергивание и изгиб с использованием универсальной испытательной машины INSTRON 5989 (максимальный режим работы до 600 кН). Режим нагружения при непрерывном увеличении нагрузки составляла 2 мм/мин.

Поскольку в работах автора использованы конструкция «балка из LVL (брус из клееного шпона) и стеновой панели из CLT (панель из поперечно-клееной древесины)», нужны определить плотности материалов из CLT и LVL. Температура в лаборатории 20 ± 1 °С и влажность материалов 13%. На основе полученных результатов из испытания плотности определяются равным 495 кг/м^3 для CLT и 560 кг/м^3 для LVL.

Виды разрушения деревянных элементов, МЗП и металлических накладок в деревянных конструкциях из комбинации стеновой панели-CLT с балкой из CLT и LVL представлены на рис. 1-3.

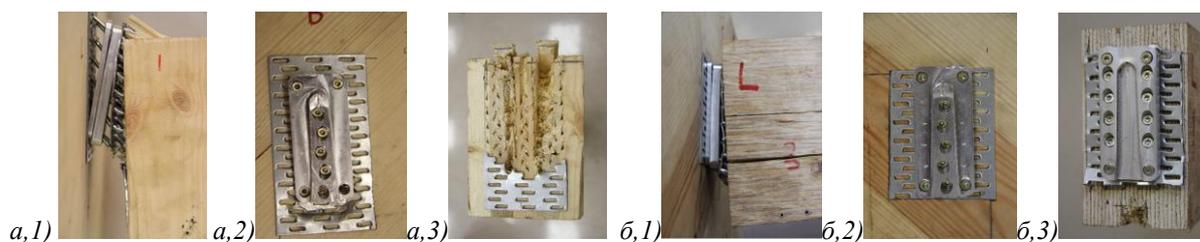


Рис. 1. Виды разрушения опытных деревянных образцов: *a,1)-a,3)* для стеновой панели-CLT с балкой из CLT; *б,1)-б,3)* для стеновой панели-CLT с балкой из LVL

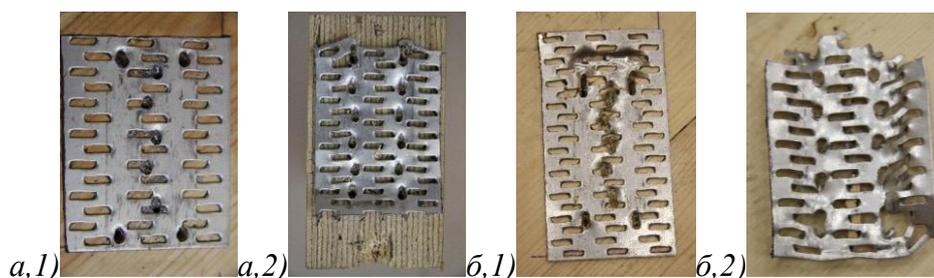


Рис. 2. Виды разрушения МЗП: *a,1)-a,2)* для стеновой панели-CLT с балкой из CLT; *б,1)-б,2)* для стеновой панели-CLT с балкой из LVL

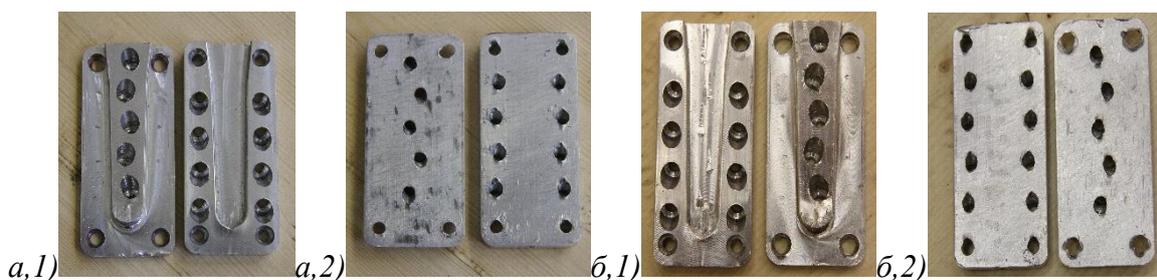


Рис. 3. Виды разрушения металлических накладок: *a,1)-a,2)* для стеновой панели-CLT с балкой из CLT; *б,1)-б,2)* для стеновой панели-CLT с балкой из LVL

Расположение металлических накладок из соединения SHERPA в деревянных конструкциях и установка опытных деревянных образцов на экспериментальном стенде представлены на рис. 4.

Для выполнения расчётов и обработки данных использовались программ *Microsoft Excel*, *Origin pro*, *IBM SPASS Statistics*, *Mathcad*. Экспериментальные результаты представлены в табл. 1 в соответствии с зависимостью «нагрузка-перемещение» (рис. 5).

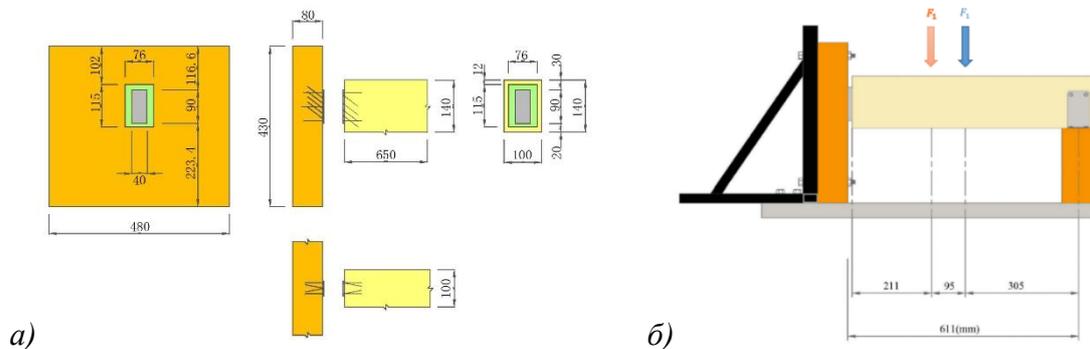


Рис. 4. Испытание по определению несущей способности SHERPA на изгиб: *а*— расположение соединения SHERPA; *б*— установка деревянных опытных образцов на экспериментальном стенде

Таблица 1

Экспериментальные результаты определения несущей способности соединения SHERPA с креплением МЗП в деревянных конструкциях

На балке из CLT			На балке из LVL		
$F_{v,test}$	$F_{v,теку}$	$F_{v,max}$	$F_{v,test}$	$F_{v,теку}$	$F_{v,max}$
46230,50	50082,45	57303,59	40882,69	45479,46	51989,80
$\omega_{CLT/LVL}$	13,08%				

Примечания: $\omega_{CLT/LVL}$ — приращение $F_{v,test,LVL}$ и $F_{v,test,CLT}$; $\omega_{CLT/LVL} = \frac{F_{v,test,CLT} - F_{v,test,LVL}}{F_{v,test,LVL}} \cdot 100\%$

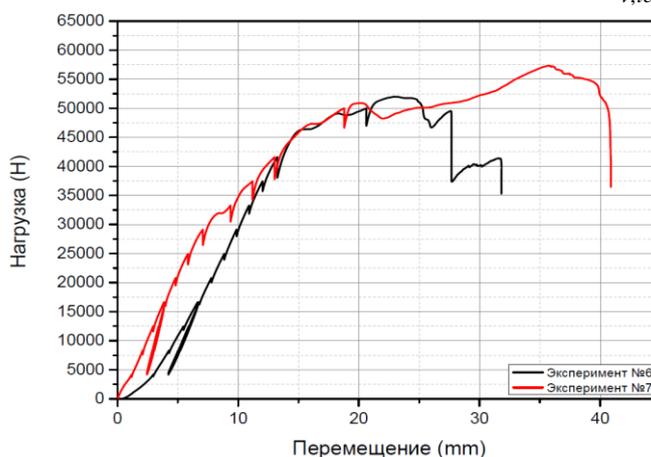


Рис. 5. Зависимость «нагрузка-перемещение»: красная линия— для балки из CLT; чёрная линия— для балки из LVL

Из рис. 5 видно, что по экспериментальные результаты определения несущей способности соединения SHERPA в балке из CLT выше, чем в балке из LVL. Это зависит от прочности шурупа на выдергивание и сдвиг под углом к волокнам. Таким образом, можно сделать вывод о том, что с использованием МЗП можно повысить несущую способность соединения на изгиб.

Сравнение расчётных результатов определения несущей способности соединения SHERPA в деревянных конструкциях на основе предложенных уравнений и экспериментальных представлены в табл. 2.

Таблица 2

Сравнение расчётных и экспериментальных результатов определения несущей способности соединения SHERPA с укреплением МЗП в деревянных конструкциях

На широкой стороне панели из CLT			На узкой стороне панели из CLT			Вдоль волокон балки из LVL для		
$F_{v,\phi,CLT,МЗП}$	$F_{v,p,CLT,МЗП}$	μ	$F_{v,\phi,CLT,МЗП}$	$F_{v,p,CLT,МЗП}$	μ	$F_{v,\phi,CLT,МЗП}$	$F_{v,p,CLT,МЗП}$	μ
33520	29234	14,66%	33520	31556	6,22%	29640	36764	-19,38%

Примечания: $F_{v,\phi,CLT,МЗП}$ - фактическая несущая способность соединения SHERPA с укреплением МЗП при изгибе, Н; $F_{v,p,CLT,МЗП}$ — расчётная несущая способность соединения SHERPA с укреплением МЗП при изгибе, Н; μ — приращение $F_{v,\phi,CLT,МЗП}$ и $F_{v,p,CLT,МЗП}$; $\mu = \frac{F_{v,\phi,CLT,МЗП} - F_{v,p,CLT,МЗП}}{F_{v,p,CLT,МЗП}} \cdot 100\%$

Из табл. 2 видно, что расчётные результатов определения несущей способности соединения SHERPA с укреплением МЗП в деревянных конструкциях ниже на 14,66%, чем экспериментальные. Несущая способность соединения SHERPA с укреплением МЗП при изгибе в балке из CLT выше, чем в балке из LVL.

Для обоснования и подтверждения эффективности методики расчёта соединений с применением МЗП, сравнение расчётных и экспериментальных результатов несущей способности соединения SHERPA без укрепления и с МЗП в деревянных конструкциях из комбинации стеновой панели-CLT с балкой из CLT и LVL представлено в табл. 3 и 4.

Таблица 3

Сравнение расчётных результатов определения несущей способности соединения SHERPA без укрепления и с МЗП в деревянных конструкциях

На широкой стороне панели из CLT			На узкой стороне панели из CLT			Вдоль волокон балки из LVL для		
$F_{v,p,90,CLT,МЗП}$	$F_{v,p,90,CLT}$	μ	$F_{v,p,0,CLT,МЗП}$	$F_{v,p,0,CLT}$	μ	$F_{v,p,0,LVL,МЗП}$	$F_{v,p,0,LVL}$	μ
29234	26331	11,03%	31556	27684	13,99%	36764	32036	14,76%

Примечания: $F_{v,p,90,CLT,МЗП}$ — расчётная несущая способность определения несущей способности соединения SHERPA при изгибе с укреплением МЗП, Н; $F_{v,p,90,CLT}$ — то же без МЗП, Н; μ — приращение $F_{v,p,90,CLT,МЗП}$ и

$$F_{v,p,90,CLT}; \mu = \frac{F_{v,p,CLT,МЗП} - F_{v,p,CLT}}{F_{v,p,CLT}} \cdot 100\%; \alpha — \text{угол между осью шурупа и волокнами}$$

Таблица 4

Сравнение экспериментальных результатов определения несущей способности соединения SHERPA без укрепления и с МЗП в деревянных конструкциях

На широкой стороне панели из CLT			На узкой стороне панели из CLT			Вдоль волокон балки из LVL для		
$F_{v,\phi,90,CLT,МЗП}$	$F_{v,\phi,90,CLT}$	μ_7	$F_{v,\phi,0,CLT,МЗП}$	$F_{v,\phi,0,CLT}$	μ_7	$F_{v,\phi,0,LVL,МЗП}$	$F_{v,\phi,0,LVL}$	μ_6
33520	27830	20,45%	33520	26910	24,56%	29640	22600	31,15%

Примечания: $F_{v,\phi,90,CLT,МЗП}$ — фактическая несущая способность определения несущей способности соединения SHERPA при изгибе с укреплением МЗП, Н; $F_{v,\phi,90,CLT}$ —то же без МЗП, Н; μ — приращение $F_{v,\phi,90,CLT,МЗП}$ и

$$F_{v,\phi,90,CLT}; \mu = \frac{F_{v,\phi,CLT,МЗП} - F_{v,\phi,CLT}}{F_{v,\phi,CLT}} \cdot 100\%; \alpha — \text{угол между осью шурупа и волокнами}$$

Из табл. 6 и 7 видно, что расчётная несущая способность соединения SHERPA с укреплением МЗП в деревянных конструкциях выш на 11,03%, чем без МЗП, а фактическая несущая способность соединения SHERPA с укреплением МЗП при изгибе возрастает минимально на 20.45% и максимально на 31.35% , чем без МЗП. Это утверждено, что применение МЗП позволяет эффективно повысить несущую способность соединения SHERPA в деревянных конструкциях. Поэтому при конструировании деревянных домостроения инженеры и архитекторы могут использовать предложенный численный алгоритм, чтобы эффективно и экономично использовать соединения SHERPA.

Вывод

1. Дано описание расчётной схемы для расчёта несущей способности соединения SHERPA с укреплением МЗП в деревянных конструкциях с использованием балки из CLT и LVL; предложен новый численный алгоритм;
2. Теоретически модели проверены и экспериментально показано влияние

эксцентриситета на несущую способность соединения SHERPA с укреплением МЗП в деревянных конструкциях на основе сравнительного анализа, показана удовлетворительная сходимость; подтверждена эффективность использования МЗП для повышения несущей способности соединения;

Список литературы

1. Албаут Г.П., Пуртов В.В., Павлик А.В., Табанюхова М.В. Исследование соединений деревянных элементов на металлических зубчатых пластинах и дюбелях с зубчатыми шайбами поляризационно-оптическим методом при действии кратковременных нагрузок, Известия вузов 7/2007 г.
2. Краткий обзор истории развития расчёта несущей способности соединения на металлических зубчатых пластинах [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://ostroykevse.ru/Obrabotka_dereva/Soedinenie_Dereva_6.html
3. Общие сведения методики расчёта несущей способности соединения на металлических зубчатых пластинах [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://derevok.narod.ru/publ/soedinenija_na_metallicheskikh_zubchatykh_plastinakh/1-1-0-22
4. Blaß, H. J.; Schmid, M.; Werner, H.: Verstärkung von Verbindungen, Bauen mit Holz, Heft 9, 2001.
5. Kevarinmäki, A., Kangas, J., Nokelainen, T., und Kanerva, P. 1995. Nail-plate reinforced bolt joints of Kerto-FSH structures. Publication 51, Helsinki University of Technology/LSEBP, ISSN 0783-9634. 23 p.

Рецензенты:

Глухих В.Н., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой технической механики, ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет», г. Санкт-Петербург.

Черных А.Г., д.т.н., профессор, ректор СПГХПА, г. Санкт-Петербург.