

УДК 539.4:539.5

DOI: 10.37482/0536-1036-2020-4-157-167

## РАСЧЕТ ЖЕСТКОСТИ СОЕДИНЕНИЙ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ LVL С КОГТЕВЫМИ ШАЙБАМИ

*А.Г. Черных, д-р техн. наук, зав. каф.*

*Е.В. Данилов, ст. преподаватель; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8919-4600>*

*П.С. Коваль, ст. преподаватель*

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, ул. 2-я Красноармейская, Санкт-Петербург, Россия, 190005; e-mail: chagrigrig@lan.spbgasu.ru, sleepme@mail.ru, pkoval@lan.spbgasu.ru

Применение когтевых шайб в нагельных соединениях позволяет увеличить несущую способность и жесткость узлов. Вместе с тем совместная работа когтевых шайб и нагелей в конструкциях из современных материалов изучена недостаточно. В работе приводятся основные недостатки существующих методик расчета таких соединений. Представлены дифференциальные уравнения, моделирующие поведение нагельного соединения с когтевыми шайбами с учетом возможных изменений форм когтей, влажности древесины, длительности действия нагрузки. Нагель и коготь шайбы описываются уравнениями для балок, лежащих на упруго-вязком основании, с использованием ядра уравнения  $K(\tau, t)$ , отражающего нелинейность факторов, влияющих на деформации соединителя. Приведены уравнения деформации нагеля, которые предлагается решать путем разложения в ряд методом Бубнова–Галеркина. Полученные выражения объединяются в одном уравнении с использованием функций Хэвисайда. Также представлены уравнения деформирования, которые записываются с учетом возможного смещения когтя по двум ортогональным направлениям. Приводятся выражения, позволяющие перейти от расчета когтей шайбы и нагеля к определению общей несущей способности и жесткости узла. Для адекватной моделирования поведения элементов соединения при достижении пластической стадии учитывается возможность образования пластических шарниров за счет изменения граничных условий. В статье приводится методика определения теоретических смещений и линейной жесткости соединения. Уравнения рассчитываются с использованием зависимостей, полученных экспериментальным путем. В ходе решения уравнений можно установить значения линейной жесткости. Данные значения сравниваются с экспериментальными, полученными ранее, для оценки адекватности предложенных решений. Распределение теоретических и экспериментальных данных обладает средней сходимостью 91 %, что подтверждает справедливость представленной методики определения жесткости нагельных соединений в LVL с когтевыми шайбами. Предлагаемая методика может быть рекомендована для более точного расчета деревянных конструкций по прочности и жесткости, что позволит снизить их материалоемкость и повысить надежность.

**Для цитирования:** Черных А.Г., Данилов Е.В., Коваль П.С. Расчет жесткости соединений конструкций из LVL с когтевыми шайбами // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 4. С. 157–167. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-4-157-167

**Ключевые слова:** когтевые шайбы, LVL, деревянные конструкции, жесткость, соединения.

### *Введение*

В практике строительства из деревянных конструкций часто используются новые композиционные материалы на основе древесины, имеющие улучшенные прочностные и жесткостные характеристики. К ним

относится LVL брус (Laminated Veneer Lumber) – брус клееный из шпона. Этот материал изучен недостаточно. Его расчетные характеристики зависят от применяемого породного состава слоев и технологии изготовления. Для увеличения несущей способности и жесткости деревянных конструкций обосновано использование когтевых шайб, что позволяет повысить прочность и жесткость нагельных соединений.

Когтевые шайбы – это разновидность соединителей, выполненных в виде двух- или односторонней зубчато-кольцевой шпонки, изготовленной из круглой пластины, края которой вырезаны и наклонены под углом  $90^\circ$  к ее плоскости, образуя треугольные когти, выступающие попеременно с противоположных сторон пластины (двусторонние) или с одной стороны (односторонние) (рис. 1) [14]. При расчете по существующим методикам невозможно полностью учесть факторы, влияющие на характер одновременной работы двух разных соединителей. Поэтому развитие методик расчета жесткости нагельных соединений с когтевыми шайбами в деревянных конструкциях является актуальной задачей.

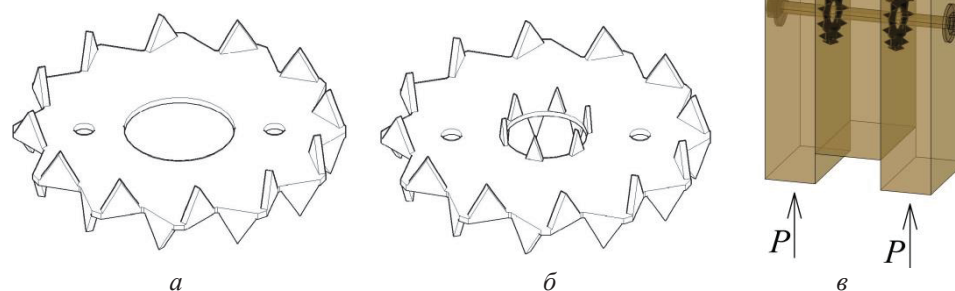


Рис. 1. Когтевые шайбы: *a* – диаметр до 95 мм; *б* – диаметр 95 мм и более; *в* – когтевая шайба в нагельном соединении ( $P$  – усилие, действующее на соединение)

Fig. 1. Claw washers: *a* – diameter less than 95 mm, *б* – diameter 95 mm and more, *в* – claw washer in dowel connection ( $P$  – force acting on the connection)

Соединения с когтевыми шайбами совмещают разновидности соединений нагельного и шпоночного типа. Изучением работы и расчетом нагельных соединений деревянных конструкций занимались П.А. Дмитриев, Г.Г. Никитин, Н.В. Шешукова и др. [5–7, 10, 15]. Исследования конструкций с когтевыми шайбами ведутся с начала прошлого века следующими учеными: в отечественной практике – В.Г. Леннов, Б.В. Лабудин, Е.В. Попов, В.В. Пуртов, А.В. Павлик и др. [8, 9, 11, 12]; в зарубежной – Н.Г. Blass, М. Schlager, С.Н. Mettem, А.В. Page и др. [16–18, 22]. Результаты работы исследователей в разное время нашли отражение в таких нормативных документах, как DIN 1052, Eurocode 5, NEN 3852 [19, 21, 23]. В существующих методиках есть недостатки, которые приведены в табл. 1.

Цель исследования – устранение недостатков методик, рассмотренных в табл. 1, что позволит увеличить точность расчетов жесткости соединений конструкций из LVL с когтевыми шайбами. В нашей работе ставятся следующие задачи: разработать математическую модель соединения с

Таблица 1  
Некоторые существующие методики расчета соединений с когтевыми шайбами

Авторы	Страна	Недостатки методики
В.Г. Леннов [9]	СССР	Не рассматривается влияние формы когтей на коэффициент постели
С.Н. Mettem, М. Schlager, G. Davis, J.H. Blass, A.V. Page, J. Eh- lbeck [16–18, 22]	Германия	Не позволяет адекватно учитывать влияние варьирования плотности используемых материалов и изменения толщины элементов
Y. Hirashima [20]	Япония	Используются нераспространенные породы древесины с физико-механическими характеристиками, отличными от древесины, используемой в России и Европе
Eurocode 5, DIN 1052, СтАДД-3.2–2011, NEN 3852 [14, 19, 21, 23]	Европейский союз, Россия	Выполняется прогноз деформативности соединений только для длительного периода времени (более 50 лет) и только для соединителей, ограниченных стандартом EN912

нагелями и когтевыми шайбами; теоретически определить жесткость соединений из LVL с когтевыми шайбами; сопоставить результаты теоретических и экспериментальных исследований.

#### Объекты и методы исследования

В работе приняты следующие допущения: ось нагеля принимается прямолинейной до момента образования в нем пластического шарнира; деформации нагеля (когтя шайбы) и LVL совместны; при действии срезающих сил в соединении каждый крепежный элемент принимает равную долю усилия; все крепления в соединении имеют линейное смещение при изменении нагрузки; расстояние до крепежного элемента принимается из условия, что в течение приложения нагрузки не произойдет разрушения, раскалывания или смятия деревянных конструкций.

Изогнутая ось нагеля может описываться уравнением [13]:

$$EIy^{IV}(x,t) + Cy(x,t) + \int_0^t p(x,t)K(t,\tau)d\tau = q(x,t), \quad (1)$$

где  $EI$  – жесткость стержня нагеля;  $y(x,t)$  – смещение в точке;  $C$  – коэффициент постели,  $p(x,t)$  – реакция гнезда нагеля;  $K(t,\tau)$  – наследственное ядро уравнения;  $q(x,t)$  – внешняя нагрузка.

Ядро уравнения  $K(t,\tau)$  принимается по результатам аппроксимации кривых ползучести LVL при действии цилиндрическим штампом [13]:

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

где  $A$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  – постоянные величины;  $t$  – время нагружения.

Граничные условия для каждого элемента соединения (на примере двухсрезного симметричного):

при  $x = 0$ :

$$\begin{aligned} EIy''(0,t) &= 0; \\ y''(0,t) &= 0; \\ M_0 = Q_0 &= 0; \end{aligned}$$

при  $x = l$ :

$$\begin{aligned} EI y''''(l, t) &= 0; \\ y''(l, t) &= 0; \\ M_l = Q_l &= 0, \end{aligned}$$

где  $M_0, M_l$  – изгибающий момент в начале и окончании стержня нагеля;  $Q_0, Q_l$  – поперечная сила в начале и окончании стержня нагеля;  $l$  – длина стержня нагеля.

Решение уравнения (1) производится разложением в ряд и с применением метода Бубнова–Галеркина. Затем определяются коэффициенты  $C_{ij}$ , и далее методом интегрирования собираются все составляющие уравнения:

$$y(x, t) = \sum C_{ij} z_{ij}, \quad (2)$$

где  $z_{ij}$  представляет собой балочную функцию.

Использование функций Хэвисайда позволяет записать полученные уравнения для всех элементов в одном выражении. Тогда (2) можно переписать в следующем виде:

$$\begin{aligned} y(x, t) = C_{11} z_{11}(x, t)(H(x) - H(x - l_1)) + C_{12} z_{12}(x, t)(H(x - l_1) - H(x - l_1 - l_2)) + \\ + C_{13} z_{13}(x, t)(H(x - l_1 - l_2) - H(x - l_1 - 2l_1)). \end{aligned} \quad (3)$$

При решении уравнения (3) необходимо, чтобы удовлетворялись условия:

$$\sigma_{\text{см}} = \frac{q_{\text{см}}}{d_{\text{см}}} = \frac{d^4 y}{dx^4} \frac{EI}{d_{\text{см}}} < R_{\text{см}}^{\text{дл}}; \quad y(x, t) \leq \delta_{\text{пред}},$$

где  $\sigma_{\text{см}}$  – напряжения смятия;  $q_{\text{см}}$  – внешнее силовое воздействие;  $d_{\text{см}}$  – диаметр нагеля;  $R_{\text{см}}^{\text{дл}}$  – величины временного и длительного сопротивления LVL смятию под соответствующим углом к волокнам при действии цилиндрическим штампом;  $\delta_{\text{пред}}$  – предельно допустимое смещение в узле, равное 2 мм [5, 10].

Для когтя шайбы можно воспользоваться уравнением, предложенным Н.Ю. Работновым [13]. Записываются уравнения деформирования по осям  $Y$  и  $Z$ . Усилие  $N$  раскладывается на составляющие, прикладываемые параллельно и перпендикулярно когтю (расчетная схема когтя шайбы в упруго-вязком полупространстве представлена на рис. 2):

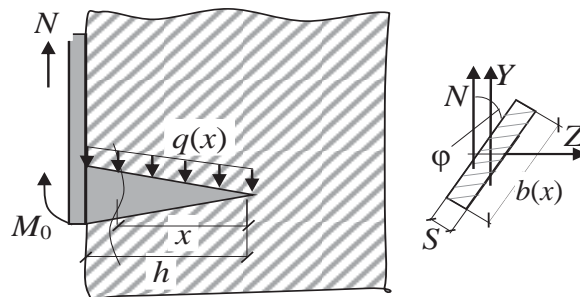


Рис. 2. Схема к расчету когтя шайбы под углом  $\varphi$  к направлению приложения усилия  $N$

Fig. 2. Scheme for the calculation of a washer claw at an angle  $\varphi$  to the direction of application of force  $N$

$$\begin{cases} EI(x)\{2y'''(x,t) + xy^{IV}(x,t)\} + C_\alpha y(x,t) + \\ + \int_{t_0}^t EI(x)\{2y'''(x,t) + xy^{IV}(x,t)\}K_0(t-\tau)d\tau = 0; \\ C_{\alpha+90}z(x,t) + EI(x)\{z'''x^3 + 6z''x^2 + 6z'x\} + \\ + \int_0^t EI(x)\{z'''x^3 + 6z''x^2 + 6z'x\}K_0(t-\tau)d\tau = 0, \end{cases} \quad (4)$$

где  $C_\alpha$ ,  $C_{\alpha+90}$  – коэффициент постели при угле действия силы к волокнам  $\alpha$  и  $\alpha + 90^\circ$  соответственно;  $K_0$  – ядро уравнения.

Ядро  $K(t,\tau)$  в выражении (4) принимается в результате аппроксимации кривых ползучести LVL при действии треугольным штампом, определенных экспериментально. Учет образования пластического шарнира должен проводиться при граничных условиях из табл. 2.

Таблица 2

## Граничные условия

Период	При $x = 0$	При $x = h$
До образования пластического шарнира	$\frac{d^2y}{dx^2} = -\frac{M}{EI} = 0;$ $\frac{d^3y}{dx^3} = -\frac{Q}{EI} = 0$	$\frac{dy}{dx} = \varphi = 0;$ $\frac{d^3y}{dx^3} = -\frac{Q}{EI} = -\frac{N}{EI}$
После образования пластического шарнира	$\frac{d^2y}{dx^2} = -\frac{M}{EI} = 0;$ $\frac{d^3y}{dx^3} = -\frac{Q}{EI} = 0$	$\frac{dy}{dx} = \varphi \neq 0;$ $\frac{d^3y}{dx^3} = -\frac{Q}{EI} = -\frac{N}{EI}$

Несущая способность когтевой шайбы может быть найдена как сумма несущих способностей всех когтей, а суммарная несущая способность одного соединителя на один срез определяется как сумма несущих способностей нагеля и когтевой шайбы.

При передаче нагрузки на узел внутри него могут возникать продольные усилия  $S_1$ , поперечные усилия  $S_2$ , изгибающий момент  $S_3$  (рис. 3).

На каждый соединитель внутри одного среза узла будут передаваться эквивалентные продольные усилия  $S_{\text{экр.1}}$ , поперечные усилия  $S_{\text{экр.2}}$ , усилие действия момента  $S_{\text{экр.3}}$ . При выполнении расчета за перемещения  $\Delta$  принимаются смещения соединителей относительно начального положения:

$$S_{\text{экр.1}} = \frac{S_1}{n n_{\text{ш}}}; S_{\text{экр.2}} = \frac{S_2}{n n_{\text{ш}}}; S_{\text{экр.3},i} = \frac{S_3 r_i}{n_{\text{ш}} \sum_{i=1}^n r_i^2}; \Delta_i = \frac{r_i}{r_{\text{max}}} \Delta_{\text{max}},$$

где  $n$  – число соединителей;  $n_{\text{ш}}$  – число условных срезов (швов);  $r_i$  – расстояние от центра вращения до  $i$ -го соединителя;  $r_{\text{max}}$  – расстояние от центра вращения до максимально удаленного соединителя.

Для определения перемещений в узле по осям  $x$ ,  $y$  и поворота на угол  $\Theta$  необходимо задать три значения жесткостей  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$  соответственно.

Жесткости  $K_{\text{нар1}}$ ,  $K_{\text{нар2}}$ ,  $K_{\text{нар3}}$  для нагеля на один срез будут определяться:

$$K_{\text{нар1}} = \frac{N_{\text{нар}} \sin \alpha}{\Delta_{x,c}}; K_{\text{нар2}} = \frac{N_{\text{нар}} \cos \alpha}{\Delta_{y,c}}; K_{\text{нар3}} = \frac{N_{\text{нар}} r_i}{\Theta}.$$

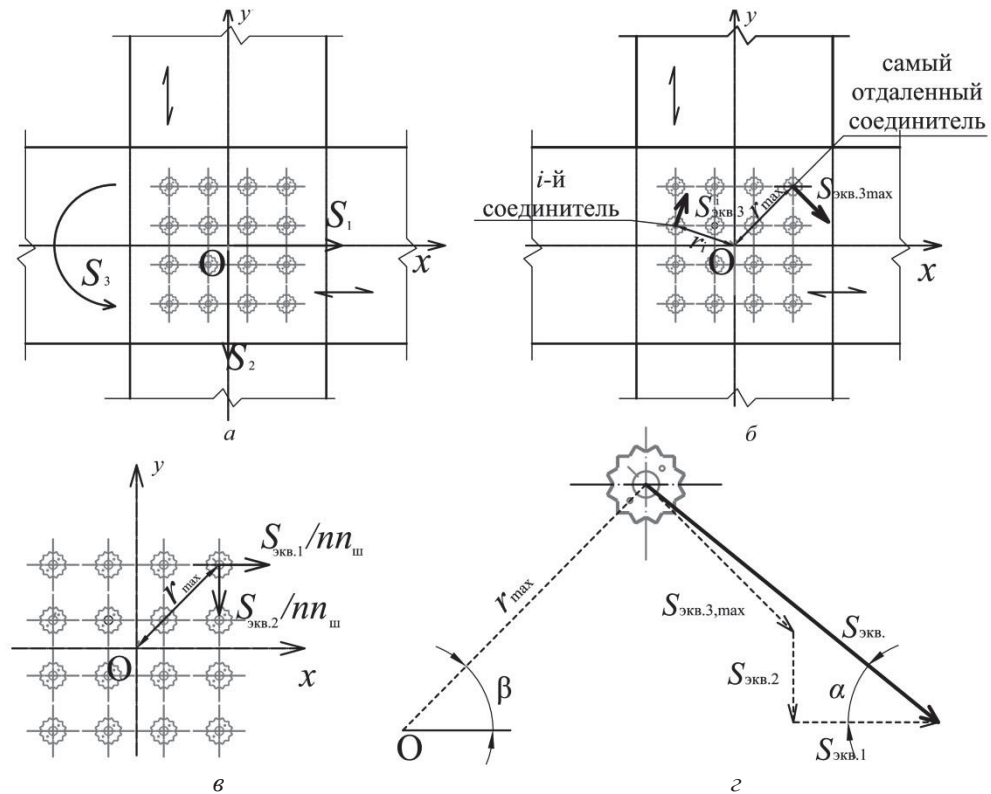


Рис. 3. Схема для расчета соединений: а – общий вид соединения; б – возникновение усилий в различных соединительных элементах от действия  $S_3$ ; в – возникновение усилий от действия усилий  $S_1$  и  $S_2$ ; з – определение  $S_{экр}$  и его составляющих

Fig. 3. Scheme for calculating the connections: а – general view of a connection; б – occurrence of forces in various connecting elements because of the bending moment ( $S_3$ ); в – occurrence of forces because of the longitudinal ( $S_1$ ) and lateral ( $S_2$ ) forces; з – definition of the equivalent forces ( $S_{экр}$ ) and their components

Жесткости  $K_{к.ш1}$ ,  $K_{к.ш2}$ ,  $K_{к.ш3}$  для когтевой шайбы на один срез:

$$K_{к.ш1} = \frac{\sum N_{к.ш} \sin \alpha}{\sum \Delta_{x,c}}; \quad K_{к.ш2} = \frac{\sum N_{к.ш} \cos \alpha}{\sum \Delta_{y,c}}; \quad K_{к.ш3} = \frac{\sum N_{к.ш} r_i}{\sum \Theta};$$

$$\Theta = \arccos \left( \frac{2r_i^2 + \sqrt{\Delta_{y,c}^2 + \Delta_{x,c}^2}}{2r_i^2} \right).$$

Здесь  $\Delta_{x,c}$  и  $\Delta_{y,c}$  – смещения соединяемых элементов относительно начального положения по осям  $y$  и  $x$  соответственно, определяемые из выражений (3) для нагеля и (4) для каждого когтя шайбы.

Для любого узла жесткости  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$  могут быть найдены путем сложения всех жесткостей соединителей на каждом срезе:

$$K_1 = \sum K_{наг1} + \sum K_{к.ш1}; \quad K_2 = \sum K_{наг2} + \sum K_{к.ш2}; \quad K_3 = \sum K_{наг3} + \sum K_{к.ш3}.$$

При известных жесткостях соединения можно найти фактические смещения из следующих выражений:

$$\Delta_1 = \frac{S_1}{K_1}; \Delta_2 = \frac{S_2}{K_2}; \theta = \frac{S_3}{K_3}.$$

Для определения теоретической жесткости узлов нагельных соединений в LVL с когтевыми шайбами требуются только значения экспериментальных исследований параметров уравнений (3), (4), которые раскрыты в работах [1–4].

#### *Результаты исследования и их обсуждение*

По предлагаемой методике были рассчитаны коэффициенты линейной жесткости в зависимости от угла направления среднего элемента к направлению действия нагрузки ( $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ), диаметров когтевой шайбы (50, 95, 117 мм), диаметра нагеля (12, 16, 20 мм) при фиксированной толщине элементов LVL  $t = 45$  мм.

Значения теоретических результатов на один срез для одного соединителя сопоставлялись с экспериментальными, приведенными в [1, 3]. Результаты расчета и испытаний представлены в табл. 3 и на рис. 4.

Таблица 3

#### **Результаты теоретических и экспериментальных исследований жесткости на один срез для двухсрезного соединения при действии кратковременной нагрузки**

Угол приложения нагрузки к волокнам $\alpha$ , град	Диаметр когтевой шайбы $d_{к.ш.}$ , мм	Диаметр нагеля $d_{наг.}$ , мм	Линейная жесткость на 1 условный срез $K$ , кН/мм		Разница экспериментальных и теоретических значений, %
			Теория	Эксперимент	
0	50	12	9,93	10,05	0,60
		16	15,26	11,20	13,30
		20	17,91	12,32	15,61
	95	12	11,13	15,21	13,41
		16	16,67	16,45	0,66
		20	19,18	17,55	4,25
	117	12	17,91	17,90	0,03
		16	19,18	19,15	0,08
		20	20,14	20,67	1,28
90	50	12	1,86	1,88	0,53
		16	3,98	2,53	18,22
		20	4,69	2,89	19,19
	95	12	4,11	3,50	7,42
		16	2,85	4,01	14,46
		20	2,56	4,15	19,16
	117	12	3,50	4,21	8,43
		16	4,09	4,72	6,67
		20	4,41	4,88	4,82

На графиках (рис. 4) приведены значения линейной жесткости соединений с когтевыми шайбами на один срез при разных размерах когтевой шайбы и нагеля, при варьировании угла приложения силы к волокнам среднего элемента (с учетом того, что направление волокон крайних элементов двухсрезного соединения сонаправлено с действием нагрузки).



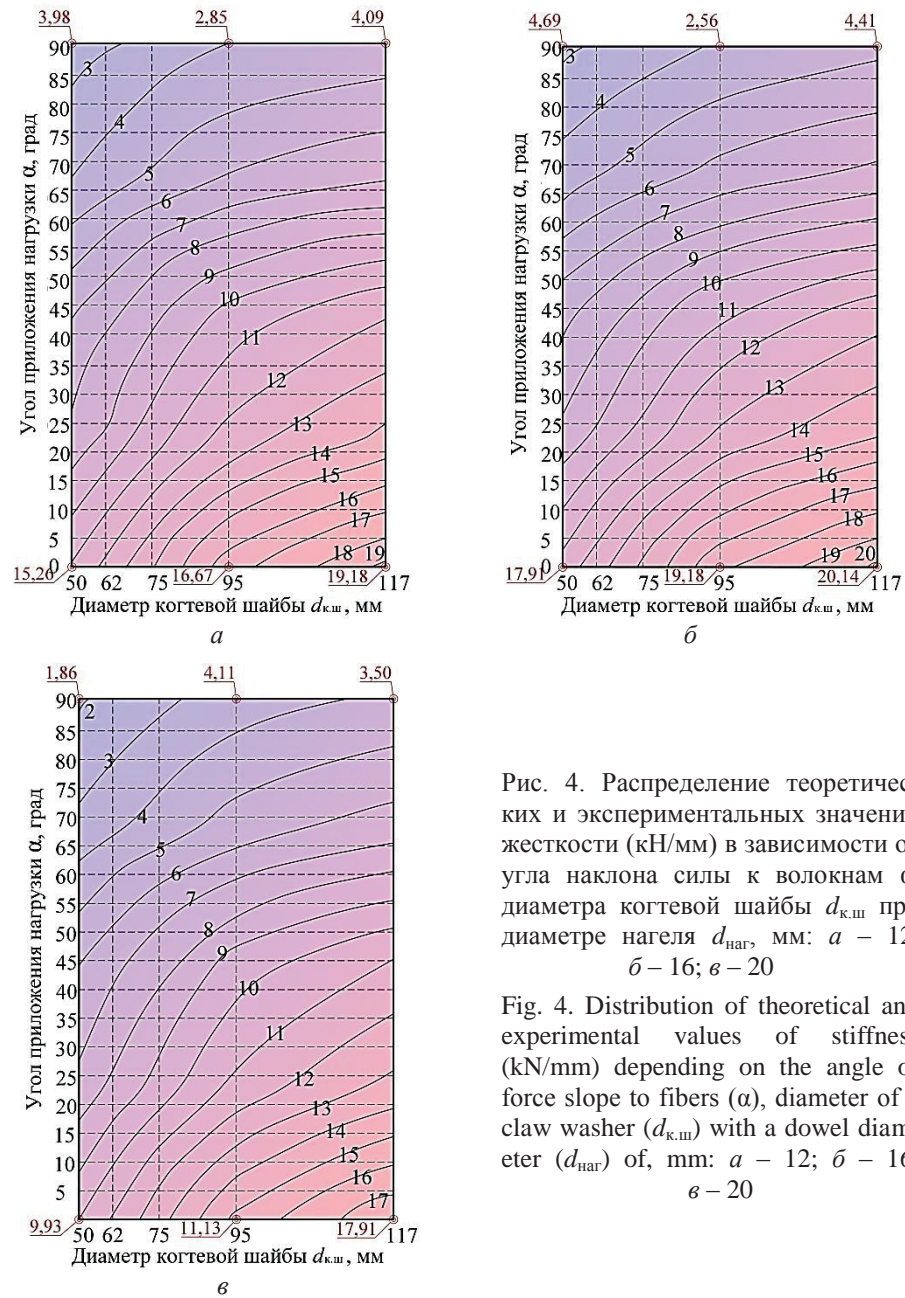


Рис. 4. Распределение теоретических и экспериментальных значений жесткости (кН/мм) в зависимости от угла наклона силы к волокнам  $\alpha$ , диаметра когтевой шайбы  $d_{к.ш.}$  при диаметре нагеля  $d_{наг}$ , мм: *a* – 12; *б* – 16; *в* – 20

Fig. 4. Distribution of theoretical and experimental values of stiffness (kN/mm) depending on the angle of force slope to fibers ( $\alpha$ ), diameter of a claw washer ( $d_{к.ш.}$ ) with a dowel diameter ( $d_{наг}$ ) of, mm: *a* – 12; *б* – 16; *в* – 20

Знания о линейной жесткости для конкретного расчетного случая позволяют определять теоретические смещения элементов соединения, используя уравнения (5).

Из табл. 3 и рис. 4 видно, что максимальная разница в данных теоретических и экспериментальных исследований доходит до 20 % при средней сходимости 91,77 %, что является хорошим показателем. На основании этого можно заключить, что приведенная модель нагельного соединения с когтевыми шайбами является адекватной.



*Заключение*

Предлагаемая методика определения жесткости нагельных соединений в LVL бруссе с когтевыми шайбами является адекватной и может быть использована для более точного расчета конструкций, что позволит снизить их материалоемкость и повысить эксплуатационную надежность. Дальнейшие исследования можно продолжить в направлении изучения влияния меняющихся срезовых условий. Также обосновано проведение экспериментальных исследований при промежуточных показателях диаметров нагелей и когтевых шайб, иных значениях толщин элементов LVL.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Глухих В.Н., Черных А.Г., Данилов Е.В. Деревянные конструкции с применением когтевых шайб и учетом начальных напряжений древесины. СПб.: СПбГАСУ, 2018. 284 с. [Glukhikh V.N., Chernykh A.G., Danilov E.V. *Wooden Structures Using Claw Washers and Taking Into Account the Initial Stresses of Wood*. Saint Petersburg, SPbGASU Publ., 2018. 284 p.]
2. Данилов Е.В. Исследование длительной прочности LVL при смятии цилиндрическим штампом // Вестн. гражд. инж. 2014. № 4(45). С. 38–42. [Danilov E.V. Investigation of Long-Term LVL Strength in Compression by a Cylindric Stamp. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov* [Bulletin of Civil Engineers], 2014, no. 4(45), pp. 38–42].
3. Данилов Е.В. Исследование кратковременной прочности LVL при смятии треугольным штампом // Вестн. гражд. инж. 2014. № 1(42). С. 28–33. [Danilov E.V. Research of the Short-Term Strength of LVL in Compression by a Triangular Plate. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov* [Bulletin of Civil Engineers], 2014, no. 1(42), pp. 28–33].
4. Данилов Е.В. Определение линейной жесткости нагельных соединений с когтевыми шайбами в бруссе LVL // Вестн. гражд. инж. 2017. № 2(61). С. 81–85. [Danilov E.V. Determination of Linear Stiffness of Dowel Joints with Claw Rings in the LVL Beam. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov* [Bulletin of Civil Engineers], 2017, no. 2(61), pp. 81–85]. DOI: [10.23968/1999-5571-2017-14-2-81-85](https://doi.org/10.23968/1999-5571-2017-14-2-81-85)
5. Дмитриев П.А. Исследование длительной несущей способности соединений деревянных элементов на стальных цилиндрических нагелях // Изв. вузов. Строительство и архитектура. 1973. № 5. С. 28–35. [Dmitriyev P.A. Studying the Long-Term Bearing Capacity of Wooden Connections on Steel Cylindrical Dowel Pins. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Stroitel'stvo i arkhitektura* [News of Higher Educational Institutions. Construction], 1973, no. 5, pp. 28–35].
6. Дмитриев П.А., Стрижаков Ю.Д. Исследование прочности древесины на смятие в отверстиях поперек волокон при действии кратковременной и длительной нагрузок // Изв. вузов. Строительство и архитектура. 1967. № 7. С. 28–35. [Dmitriyev P.A., Strizhakov Yu.D. Studying the Bearing Strength of Wood in the Holes against the Grain under the Action of Temporary and Steady Loads. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Stroitel'stvo i arkhitektura* [News of Higher Educational Institutions. Construction], 1967, no. 7, pp. 28–35].
7. Дмитриев П.А., Стрижаков Ю.Д. Исследование деревянных элементов на дюбелях при действии кратковременных нагрузок // Изв. вузов. Строительство и архитектура. 1969. № 8. С. 41–49. [Dmitriyev P.A., Strizhakov Yu.D. Studying the Wooden Elements of Dowels under the Action of Temporary Loads. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Stroitel'stvo i arkhitektura* [News of Higher Educational Institutions. Construction], 1969, no. 8, pp. 41–49].
8. Лабудин Б.В. Совершенствование клееных деревянных конструкций с пространственно-регулярной структурой. Архангельск: АГТУ, 2007. 267 с. [Labudin

B.V. *Improving Laminated Wood Structures with a Spatially Regular Structure*. Arkhangel'sk, ASTU Publ., 2007. 267 p.]

9. Леннов В.Г. Индустриальные деревянные фермы на когтевых шайбах: дис. ... канд. техн. наук. Горький, 1941, 289 с. [Lennov V.G. *Industrial Timber Trusses Made with the Use of Claw Washers*: Cand. Eng. Sci. Diss. Gorky, 1941. 289 p.]

10. Никитин Г.Г. Расчет нагельных соединений с учетом деформаций, развивающихся во времени: дис. ... канд. техн. наук. Л., 1964. 192 с. [Nikitin G.G. *Calculation of Dowel Connections with Allowances Made for Deformations Developing in Time*: Cand. Eng. Sci. Diss. Leningrad, 1964. 192 p.]

11. Попов Е.В., Столыпин Д.А., Лабудин Б.В., Мелехов В.И. Напряженно-деформированное состояние панелей на деревянном каркасе с различными вариантами крепления обшивки // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2016. Т. 4, № 5-2(25-2). С. 133–139. [Popov E.V., Stolypin D.A., Labudin B.V., Melekhov V.I. Stress-Strain State of Panels on a Wooden Frame with Different Variants Joints of Trim. *Aktual'nyye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika*, 2016, vol. 4, no. 5-2(25-2), pp. 133–139].

12. Пуртов В.В., Павлик А.В. Расчет в программе ANSYS деревянных конструкций с крепежными элементами повышенной несущей способности // VII Междунар. симп. «Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений (APCSCE 2018)» (Новосибирск, 1–8 июля 2018 г.). Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин), 2018. С. 72. [Purtov V.V., Pavlik A.V. Calculation in the ANSYS Program of Wooden Structures with Fasteners of Increased Bearing Capacity. *Proceedings of the VII International Symposium "Actual Problems of Computational Simulation in Civil Engineering (APCSCE 2018)"*, Novosibirsk, July 1–8, 2018. Novosibirsk, NSUACE (SIBSTRIN) Publ., 2018, p. 72].

13. Работнов Ю.Н. Ползучесть элементов конструкций. М.: Наука, 1966. 752 с. [Rabotnov Yu.N. *Creeping of Structural Elements*. Moscow, Nauka Publ., 1966. 752 p.]

14. СтАДД-3.2–2011. Деревянные конструкции. Соединения деревянных элементов с использованием зубчатых пластин. СПб., 2012. 59 с. [Association Standard of Wooden House Construction StADD-3.2.–2011. *Wooden Structures. Joining Wooden Elements Using Connector Plates*. Saint Petersburg, 2012. 59 p.]

15. Шешукова Н.В. Несущая способность и деформативность нагельных соединений деревянных конструкций при циклическом нагружении: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2001, 152 с. [Sheshukova N.V. *Bearing Capacity and Deformability of the Dowel Connections of Wooden Structures when Subjected to Cyclic Loadings*: Cand. Eng. Sci. Diss. Saint Petersburg, 2001. 152 p.]

16. Blass H.J., Aune P., Choo B.S., Gortlacher R., Griffiths D.R., Hilson B.O. et al. *Timber Engineering STEP 1: Basis of Design, Material Properties, Structural Components and Joints*. Almere, Netherlands, Centrum Hout, 1995. 300 p.

17. Blass H.J., Schlager M. *Trial Calculations for Determination of the Load-Carrying Capacity of Joints with Bulldog Connectors*. CEN/TC 124/WG4 N23, 1993. 6 p.

18. Blaß J.H., Ehlbeck J., Schlager M. Characteristic Strength of Tooth-Plate Connector Joints. *Holz als Roh und Werkstoff* [European Journal of Wood and Wood Products], 1993, vol. 51, pp. 395–399. DOI: [10.1007/BF02628236](https://doi.org/10.1007/BF02628236)

19. *Eurocode 5: Design of Timber Structures. Part: General Rules and Rules for Buildings*. ENV 1995-1-1. Brussels, CEN, 1993. 133 p.

20. Hirashima Y. Lateral Resistance of Timber Connector Joints Parallel to Grain Direction. *Proceedings of the International Engineering Conference*. Tokyo, 1990, vol. 1, pp. 254–261.

21. Lißner K., Rug W., Steinmetz D. DIN 1052:2008-12 Neue Grundlagen für Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken – Teil 5(2): Aussteifungen von Holztragwerken (Fortsetzung aus Heft 7/09 und Schluss). *Bautechnik*, 2009, vol. 86, iss. 8, 490–505. DOI: [10.1002/bate.200910051](https://doi.org/10.1002/bate.200910051)

22. Mettem C.J., Page A.V. Davis G. Validatory Tests and Proposed Design Formulae for the Load-Carrying Capacity of Toothed-Plate Connected Joints. *Papers of the 26th*

*Meeting of the Working Commission W18 – Timber Structures, Athens, GA, USA, August, 1993.* Germany, Universität Karlsruhe, 1994, CIB-W18 Paper 26-7-2. 25 p.

23. *Standard NEN 3852:1973 nl. Technische grondslagen voor de berekening van bouwconstructies – TGB 1972 – Hout – Houtconstructies* [Regulations for the Calculation of Building Structures – Timber Structures]. Netherlands, 1973. 131 p.

## STIFFNESS ANALYSIS OF CONNECTIONS OF LVL STRUCTURES WITH CLAW WASHERS

*A.G. Chernykh, Doctor of Engineering, Head of Department*

*E.V. Danilov, Senior Lecturer; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8919-4600>*

*P.S. Koval, Senior Lecturer*

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, ul. 2-ya Krasnoarmeyskaya, 4, Saint Petersburg, 190005, Russian Federation; e-mail: chagrig@lan.spbgasu.ru, sleepme@mail.ru, pkoval@lan.spbgasu.ru

The use of claw washers in dowel connections allows to increase the bearing capacity and stiffness of joints. However, joint action of claw washers and dowels in the structures of advanced materials is studied insufficiently. The paper presents the key failures of existing methods for calculating such connections. Differential equations, that simulate the behavior of a dowel connection with claw washers taking into account the possible changes in the shape of claws, wood moisture content and the duration of loading, are presented. Washer dowel and claw are followed the equations for beams secured on a visco-elastic base, using the equation kernel  $K(\tau, t)$ , which reflects the nonlinearity of the factors affecting the deformation of a connection. The dowel deformation equations are given, which are proposed to be solved by the Bubnov-Galerkin method. The obtained expressions are united into a single equation using the Heaviside step functions. The deformation equations are presented as well. They are written taking into account the virtual displacement of a claw in two orthogonal directions. The expressions allow to pass from calculation of washer claws and a dowel to determination the total bearing capacity and joint stiffness. The possibility of plastification due to the changes in boundary conditions is considered for adequate simulation of connection components behavior upon reaching the plastic stage. The article provides a methodology for determining the theoretical displacements and linear stiffness of a connection. The equations are calculated using dependences available from experiments. In the course of solving the equations, it is possible to determine the values of linear stiffness. These values are compared with the experimental data received earlier to assess the adequacy of the obtained solutions. The distribution of theoretical and experimental data have an average convergence of 91 %, which confirms the validity of the presented methodology for determining the stiffness of dowel connections in LVL with claw washers. The proposed methodology can be recommended for more precise calculation of wooden structures in strength and stiffness, which will reduce their material consumption and enhance reliability.

**For citation:** Chernykh A.G., Danilov E.V., Koval P.S. Stiffness Analysis of Connections of LVL Structures with Claw Washers. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2020, no. 4, pp. 157–167. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-4-157-167

**Keywords:** claw washers, LVL, wooden structures, stiffness, connections.

Поступила 30.08.19 / Received on August 30, 2019