

УДК 624.011.2+674.028.3/9

DOI: 10.37482/0536-1036-2020-4-178-189

КОНТАКТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ КОГТЕВОЙ ШАЙБЫ С ДРЕВЕСИНОЙ ОТ ПРЕДЕЛЬНОГО СДВИГА

Е.В. Попов¹, канд. техн. наук; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8950-7558>

А.В. Русланова¹, соискатель; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0298-9129>

В.В. Сопилов¹, аспирант; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0298-9129>

Н. Ждралович², гл. инж., координатор проектов; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0997-5130>

Ш.М. Мамедов³, канд. экон. наук, доц.; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0366-1085>

Б.В. Лабудин¹, д-р техн. наук, проф.; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2547-3096>

¹Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 22, г. Архангельск, Россия, 163002; e-mail: EPV1989@yandex.ru, kalipso64@gmail.com, sopilov.v@edu.narfu.ru, sevned@mail.ru

²Правление губернии Финмарк, Государственный дом, г. Вадсё, Округ Тромс и Финнмарк, Норвегия, 9811; e-mail: fmfinzd@fylkesmannen.no

³Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, ул. 2-я Красноармейская, д. 4, Санкт-Петербург, Россия, 190005; e-mail: mamedov_am@bk.ru

При проектировании, изготовлении и эксплуатации изделий из древесины и элементов деревянных конструкций необходимо решение проблемы обеспечения расчетной прочности, жесткости и их несущей способности, что актуально при реконструкции и в новом деревянном домостроении, так как от правильного выбора вида соединения зависит техническая возможность использования древесины в элементах конструкций. Для этого применяют различные типы специальных соединителей в виде когтевых шайб, кольцевых шпонок, нагельных групп и др. Существующий сортament когтевых шайб подразумевает различные диаметры, толщины и конфигурацию когтей в зависимости от требуемой несущей способности и размеров сечений пиломатериалов. Принятая модель древесины –

транстропное тело. Усилия, передающиеся в соединениях элементов деревянных конструкций, воспринимаются суммарной контактной поверхностью сопряженных элементов. Однако работа отдельных зубьев когтевых шайб изучена недостаточно: отсутствуют исследования влияния геометрических характеристик зуба на несущую способность коннектора, не оценивается изменение толщины соединителя и др. В качестве объекта исследования принят прототип – двухсторонняя когтевая шайба типа «Bulldog» диаметром 50 мм. Рассмотрены различные схемы раскроя шайбы, в которой predeterminedены размеры (ширина и высота) зуба треугольной формы. Изучено влияние толщины шайбы (заготовки) в пределах 1,0...1,5 мм на несущую способность коннектора. Основным критерием выбранных схем раскроя является возможность изготовления шайб одноударной штамповкой без дополнительной подрезки. Исследовано 5 вариантов двухсторонних когтевых шайб с количеством зубьев от 8 до 12 шт. с каждой стороны. В качестве математической модели работы зуба принято дифференциальное уравнение 4-го порядка, описывающее поведение нагеля на упругом основании с постоянным значением изгибной жесткости EI , переход к которому осуществлялся от переменного значения $EI = f(x)$ путем поиска эквивалентной ширины сечения из условия изгиба элемента треугольного сечения при помощи переменной, направленной нормально к фронтальной поверхности, и постоянной, направленной нормально к боковой поверхности.

Для цитирования: Popov E.V., Ruslanova A.V., Sopilov V.V., Zdralovic N., Mamedov S.M., Labudin B.V. Contact Interaction of a Claw Washer with Wood at Limiting Shear // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 4. С. 178–189. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-4-178-189

Ключевые слова: древесина, деревянные конструкции, анизотропия древесины, прочность, деформативность, когтевые шайбы, зубчатые шпонки.

Введение

Древесина – самовозобновляемый природный ресурс с особенными прочностными, технологическими и анизотропными свойствами, что необходимо учитывать при конструировании и расчете соединений. Наиболее ответственной является проблема взаимодействия в контактной зоне древесины и соединения (коннектора). Вопросами конструирования и расчета соединений элементов деревянных конструкций (ДК) на металлических зубчатых пластинах (МЗП), шпонках и шайбах занимались В.М. Вдовин [6], М.С. Галахов [7], Е.В. Данилов, А.Г. Черных [8], Д.Д.

Ишмаева [10], А.В. Карельский [11], Б.В. Лабудин [14, 16, 17], Сюй Юнь [21], А.О. Орлов [27, 28], J. Karadelis, P. Brown [24], Е.-М. Meghlat, Marc Oudjene, Н. Ait-Aider [25], Blaß H.J., Schädle P. [22], Čechavičius R. [23] и др.

Из всего разнообразия соединений, используемых в деревянных конструкциях, развитие получили соединения различных видов на шпонках, когтевых шайбах Леннова, клеестальных волнистых зубчатых шпонках, когтевых шайбах типа «Bulldog» и др. [1–3] Такие соединения применяются при изготовлении стропильных ферм, составных балок, колонн и плоских ребристых панелей, усилении деревянных конструкций различного назначения, а также в монтажных соединениях.

Среди когтевых и зубчатых шпонок можно выделить отличающиеся простотой изготовления и монтажом соединений (рис. 1).

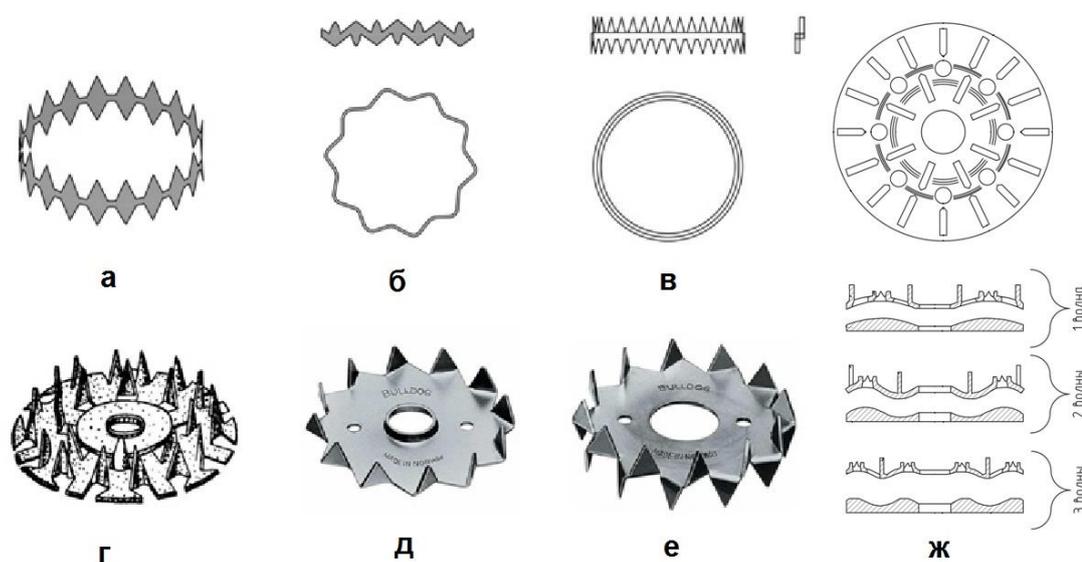


Рис. 1. Разновидности зубчатых шпонок и когтевых шайб:
а – шпонка «Аллигатор»; *б* – шпонка М.М. Хорькова; *в* – шпонка Н.П.Кабакова; *г* – шайба В.Г. Леннова; *д*, *е* – шайбы «Bulldog»;
ж – клеестальные волнистые зубчатые шпонки (КСВЗШ)

Шпонка «Аллигатор» [13] (рис. 1, *а*), представляющая собой замкнутое кольцо из гофрированной стали толщиной 1,2...1,4 мм, вырезанное с обеих сторон острыми фестонами. Устойчивость шпонки обеспечивается цилиндрической жесткостью кольца, сильно ослабленного вырезами между зубьями, что ограничивает диаметр кольца (до 160 мм).

Зубчатая шпонка М.М. Хорькова [2] (рис. 1, *б*) выполняется из листового металла в виде замкнутого контура с зубчатыми выступами. Зигзагообразные вырезы и зубцы оформлены так, что против каждой вершины-зигзага расположены вершины зубцов, а в плоскости, перпендикулярной к осевой линии, зигзагам и зубцам придана криволинейная форма с переменным чередованием внутрь контура и наружу.

Шпонка состоит из металлической ленты с выштампованными в ней зубьями, расположенными несимметрично. Лента изогнута волнообразно и в законченном виде сомкнута.

Зубчатая шпонка Н.П. Кабакова [1] представляет собой 2 кольцевые шпонки, каждая из которых имеет зубья, расположенные только с одной стороны кольцевых ободков (рис. 1, в). Отличие шпонки от обыкновенной шпонки «Аллигатор» заключается в том, что узловые соединения деревянных конструкций, выполненные с применением этого приспособления, являются шарнирными. Простота сборки элементов деревянных конструкций позволяет заготавливать заранее отдельные элементы и собирать их на месте. Для сохранения относительного вращения соединяемых частей диаметр одной кольцевой шпонки выполнен меньше диаметра другой на величину, равную двойной толщине кольцевого ободка. Таким образом, эти шпонки, плотно входя своими гладкими краями одна в другую, создают шарнирность соединения.

Когтевая шайба В.Г. Леннова (рис. 1, з) представляет собой круглую пластинку толщиной 1...2 мм, снабженную в центре отверстием под болт, из которого выштампованы зубья. Шайба впрессовывается в древесину соединяемых элементов. Испытания соединений показали высокую несущую способность, выявили практически одинаковую несущую способность шайбы в соединениях вдоль и поперек волокон древесины сосны вследствие дробности передачи осевых нагрузок в элементах ДК из пиломатериалов [15, 18].

Для изготовления когтевых коннекторов используется низкоуглеродистая сталь с холоднокатанным покрытием (или без него). Материал тела шайбы должен соответствовать типам сталей DC01+C390 (по EN 10139) или холоднокатанной высокопрочной стали холодной штамповки H320M (по EN 10268). Шайбы представляют собой круглые пластинки из тонкой (1,0...1,2 мм) стали с когтями треугольной формы, отогнутыми перпендикулярно плоскости пластинки. Они изготавливаются с односторонним (рис. 1, д) и двусторонним (рис. 1, е) отгибом зубьев. В качестве достоинств этих когтевых шайб можно отметить простоту запрессовки соединения, отсутствие необходимости предварительной сверловки отверстий, высокую несущую способность соединения.

Двусторонние шайбы «Bulldog» могут применяться не только в узловых соединениях, но и для повышения сдвиговой жесткости нагельных соединений деревянных конструкций [16]. Расчет соединений с этими когтевыми шайбами выполняется согласно [20].

В целях увеличения прочности и надежности узловых соединений и уменьшения деформативности стержневых деревянных систем при работе элементов на знакопеременные усилия разработано соединение с применением КСВЗШ (рис. 1, ж). Шпонка снабжена зубцами, которые расположены на гребнях и во впадинах с одной стороны. Пластины соединяемых элементов в зоне контакта могут быть выполнены из древесины [3, 14].

Объекты и методы исследования

В качестве объекта исследования принимается двухсторонняя когтевая шайба «Bulldog» (рис. 2), изготовленная из стальной пластинки диаметром 50 мм и толщиной 1 мм, в которой предварительно выполнено 12 надрезов. Количество надрезов равно количеству зубьев с каждой стороны шайбы; угол между надрезами обозначим α . Длина надреза $l_{\text{надр}}$ определяет величину стороны треугольника – зуба шайбы. Высота зуба $h_{\text{зуб}}$ равна произведению длины стороны $l_{\text{стор}}$ треугольника на косинус половины угла β между внутренней стороной зуба и хордой дуги внешней стороны зуба. Длина основания зуба – удвоенное произведение длины стороны $l_{\text{стор}}$ на косинус угла γ между стороной и основанием зуба.

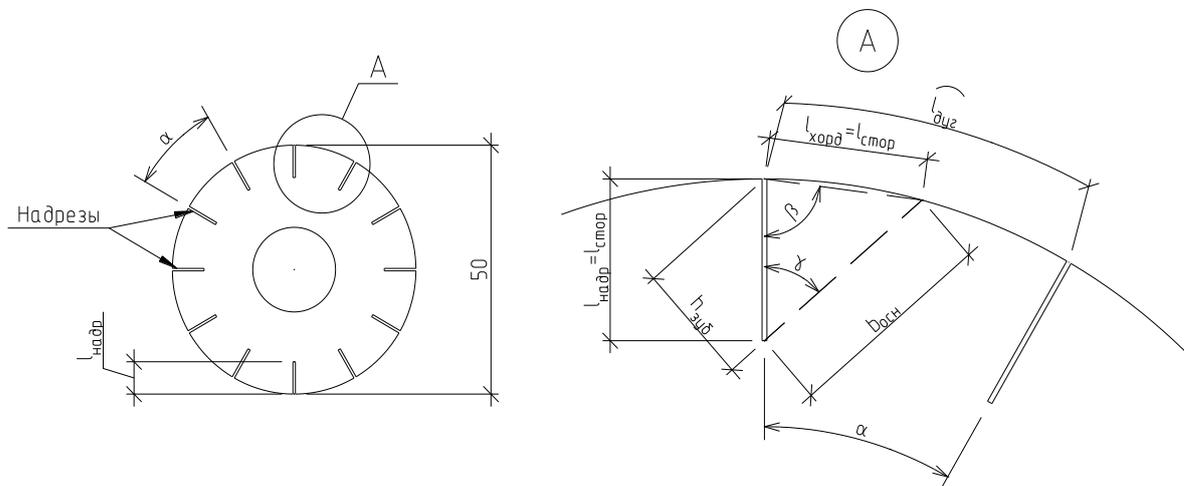


Рис. 2. Схема заготовки для выштамповки когтевой шайбы «Bulldog» диаметром 50 мм и показатели, определяющие размеры зуба

Перечень шайб «Bulldog» производства компании «Bova Nail» [26] приведен в табл. 1.

Таблица 1

Сортамент когтевых шайб «Bulldog»

Диаметр когтевой шайбы, мм	50	75	95
Диаметр болта, мм	17	23	36
Минимальный шаг расстановки шайб, мм	70	110	140

Эффективность производства когтевых шайб базируется на возможности их изготовления одноударной штамповкой из круглой стальной пластинки-заготовки, размеры зуба должны определять возможность выполнения шайбы без дополнительной подрезки, что важно с точки зрения рационального расхода материала.

Для подбора рациональной формы необходимо рассмотреть несколько вариантов когтевой шайбы с разными количеством и размерами зубьев.

При работе шайбы в соединении целесообразно равномерное распределение усилия по ширине зуба, т. е. необходимо, чтобы две стороны зуба, образующие угол β (рис. 2), были равны между собой. С учетом этого исходная длина надреза для последующей штамповки должна определяться условием: длина хорды $l_{\text{хорд}}$ равна половине дуги между надрезами, т. е.

$$l_{\text{хорд}} = 2R \sin\left(\frac{\alpha}{4}\right), \quad (1)$$

где R – радиус круглой пластинки, из которой штампуется шайба; $\alpha = 360/n$; n – количество надрезов.

Учитывая необходимость соблюдения равенства сторон зуба между собой, а значит и равенства длины надреза и хорды половины дуги, получаем выражение, определяющее требуемую длину надреза при заданном количестве зубьев:

$$l_{\text{надр}} = 2R \sin\left(\frac{360}{4n}\right). \quad (2)$$

Поскольку существенным недостатком когтевых шайб является то, что незначительность размеров зубьев при усушке древесины приводит к их выходу из гнезд, что весьма снижает прочность соединения во влажной древесине пиломатериала [13], целесообразно рассмотреть варианты исполнения шайбы с увеличенными размерами зубьев, из чего следует необходимость уменьшения их общего количества.

По формуле (2) определяем необходимую длину надреза при заданном количестве зубьев:

$n = 8:$	$l_{\text{надр}} = 9,8 \text{ мм}; h_{\text{зуб}} = 7,5 \text{ мм}; b_{\text{осн}} = 12,4 \text{ мм};$
$n = 9:$	$l_{\text{надр}} = 8,7 \text{ мм}; h_{\text{зуб}} = 6,7 \text{ мм}; b_{\text{осн}} = 11,2 \text{ мм};$
$n = 10:$	$l_{\text{надр}} = 7,8 \text{ мм}; h_{\text{зуб}} = 6,0 \text{ мм}; b_{\text{осн}} = 10,1 \text{ мм};$
$n = 11:$	$l_{\text{надр}} = 7,1 \text{ мм}; h_{\text{зуб}} = 5,4 \text{ мм}; b_{\text{осн}} = 9,3 \text{ мм};$
$n = 12:$	$l_{\text{надр}} = 6,5 \text{ мм}; h_{\text{зуб}} = 4,9 \text{ мм}; b_{\text{осн}} = 8,6 \text{ мм}.$

Варианты когтевых шайб представлены на рис. 3.

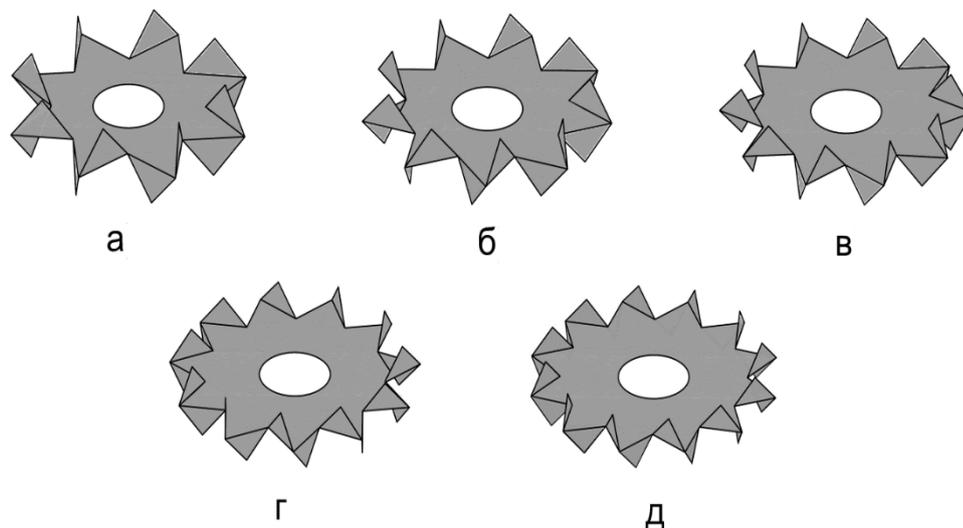


Рис. 3. Варианты когтевых шайб с различным количеством зубьев:
 $a - n = 8$; $б - 9$; $в - 10$; $г - 11$; $д - 12$ (стандартная шайба)

Расчет когтя выполним, как для балки на упругодеформируемом основании. Такое допущение справедливо при действии кратковременной нагрузки и малых деформациях, когда предельно допустимое значение для соединений ограничивается требованиями Строительных правил [19]. Считая материал когтя упругим и пренебрегая влиянием поперечных сил на деформацию и кручение, принимаем гипотезу плоских сечений и записываем дифференциальное уравнение упругой оси когтя как защемленной в пластине балки, лежащей на упругодеформируемом основании [8]:

$$EI(x)y(x)^{IV} + Cy(x) = 0, \quad (3)$$

где C – кратковременный коэффициент постели единицы длины основания под углом γ к волокнам.

Для решения уравнения (3) с переменным по высоте моментом инерции поперечного сечения введем в расчет постоянное эквивалентное значение $EI(x) = \text{const}$ из условия равенства перемещения острия при действии поперечной нагрузки на коготь. При изгибе когтя из плоскости под действием переменной нагрузки $q(x)$ получена эквивалентная ширина $b_{\text{экв}} = 0,8 b$ (где b – ширина основания зуба). Поскольку задача вычисления $b_{\text{экв}}$ при изгибе когтя под постоянной нагрузкой ($q = \text{const}$) в своей плоскости не имеет аналитического решения, значения $b_{\text{экв}}$ подбирались численно, путем аппроксимации момента инерции заменяющей функцией для каждого варианта: $b_{\text{экв}} = 0,011$; $0,009$; $0,008$; $0,0074$; $0,0068$ соответственно при количестве когтей с одной стороны $n = 8$; 9 ; 10 ; 11 ; 12 шт.

Эквивалентная изгибная жесткость зуба при изгибе из плоскости

$$EI = E_{\text{ст}} \left(\frac{S^3 b_{\text{экв}}}{12} \right)$$

И В ПЛОСКОСТИ:

$$EI = E_{\text{ст}} \left(\frac{b_{\text{ЭКВ}}^3 S}{12} \right), \quad (4)$$

где $E_{\text{ст}}$ – модуль упругости стали, $E_{\text{ст}} = 2 \cdot 10^8$ кПа; S – толщина зуба, определяемая толщиной стальной пластинки-заготовки.

Согласно [4], решение уравнения (4) при $EI(x) = \text{const}$ имеет следующий вид:

$$y(x) = e^{\frac{Px}{\sqrt{2}}} \left(C_1 \cos \frac{Px}{\sqrt{2}} + C_2 \sin \frac{Px}{\sqrt{2}} \right) + e^{-\frac{Px}{\sqrt{2}}} \left(C_3 \cos \frac{Px}{\sqrt{2}} + C_4 \sin \frac{Px}{\sqrt{2}} \right), \quad (5)$$

где C_1, C_2, C_3, C_4 – постоянные интегрирования, определяемые из граничных условий; $P = \sqrt[4]{C/EI}$.

Запишем граничные условия при работе когтя в упругой стадии (до образования пластического шарнира):

$$\begin{cases} x = 0 \rightarrow \frac{dy}{dx} = 0 \text{ и } \frac{d^3y}{dx^3} = -\frac{N}{EI}; \\ x = h_{\text{зуб}} \rightarrow \frac{d^2y}{dx^2} = 0 \text{ и } \frac{d^3y}{dx^3} = 0, \end{cases} \quad (6)$$

где $h_{\text{зуб}}$ – высота зуба, мм.

С учетом подстановки $\frac{P}{\sqrt{2}} = A$, находим произвольные постоянные интегрирования:

$$\begin{aligned} C_1 &= \frac{N}{8EI \cdot A^3}; \\ C_2 &= \frac{Ne^{Ah} \sin Ah - 2Ne^{-Ah} \cos Ah + Ne^{-Ah} \sin Ah}{8A^3 EI e^{Ah} \cos Ah (e^{Ah} + e^{-Ah})}; \\ C_3 &= -C_1; \\ C_4 &= -\frac{Ne^{Ah} \cos Ah + Ne^{-Ah} \sin Ah + Ne^{-Ah} \sin Ah}{8A^3 EI e^{Ah} \cos Ah (e^{Ah} + e^{-Ah})}. \end{aligned} \quad (7)$$

Для описания процесса деформирования нагельного гнезда воспользуемся известным выражением:

$$y(x) = \frac{q(x)}{c}. \quad (8)$$

Суммарная деформация древесины гнезда $\Delta_{\text{др}}$ в основании зуба ($x = 0$) будет определяться выражением

$$\Delta_{\text{др}} = \int_0^h \frac{q(x)}{c} = \frac{-Q(0)}{c} = \frac{N}{c}. \quad (9)$$

Для случаев расположения когтя под углом к вектору прикладываемой нагрузки N ($0 < \alpha < 90^\circ$), необходимо учитывать составляющие усилия N , прикладываемые вдоль и поперек плоскости когтя.

Для выражения коэффициентов постели при смятии под любым углом γ к волокнам древесины используем общепринятые формулы [5, 9, 19], учитывающие анизотропию древесины:

$$C_{\gamma}^{\text{вр}} = \frac{C_0}{1 + \left(\frac{C_0}{C_{90}} - 1 \right) \cdot \sin^3 \gamma}, \quad (10)$$

где $C_{\gamma}^{\text{вр}}$ – кратковременный коэффициент толщины древесины при измельчении под углом γ к волокнам; C_0, C_{90} – коэффициенты постели при

смятии древесины под углами $\gamma = 0^\circ$ и $\gamma = 90^\circ$ соответственно, определяемые из следующих зависимостей [12]:

$$C_0^{BP} = (-0,14b_{см} + 2,289)R_c ; C_{90}^{BP} = (-0,094b_{см} + 0,826)R_c, \quad (11)$$

где C_0^{BP} – кратковременный коэффициент толщины древесины при смятии под углом $\gamma = 0^\circ$ к волокнам; C_{90}^{BP} – кратковременный коэффициент толщины древесины при смятии под углом $\gamma = 90^\circ$ к волокнам; $b_{см}$ – ширина сгибаемой части зуба, м; R_c – расчетное сопротивление древесины сжатию вдоль волокон, кПа.

Расчет производим для каждого зуба всех представленных вариантов шайбы. За критерий прочности каждого зуба считается усилие, вызывающее предельную деформацию (перемещение) зуба $\Delta_{ult} = 2$ мм.

Результаты исследования и их обсуждение

Рассмотрим односрезное соединение, работающее на продольный сдвиг (рис. 4). Условно считаем, что возникающий распор воспринимается болтом, работу которого на сдвиг совместно с когтевой шайбой условно не учитываем.

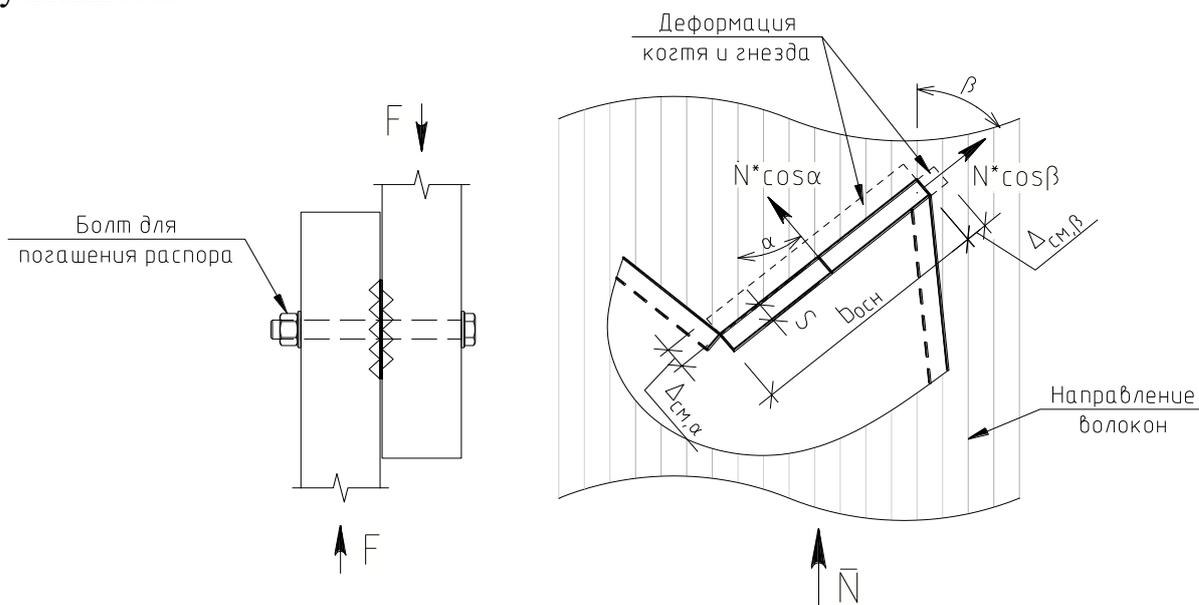


Рис. 4. Схема односрезного соединения при продольном сдвиге (слева) и расчетная схема когтя шайбы (справа)

Определение несущей способности шайбы производим в следующей последовательности:

предположим, что на каждый коготь шайбы действует параллельно направлению волокон древесины единичная сила $\bar{N} = 1$;

силу \bar{N} раскладываем на компоненты, нормальные к фронтальной и боковой поверхностям когтя, которые образуют углы α и β с направлением действия силы \bar{N} и направлением волокон;

решая уравнения (4) и (9), находим перемещения когтя по направлению компонент вектора действия силы \bar{N} ($\Delta_{см, \alpha}$ и $\Delta_{см, \beta}$ в направлении нормалей фронтальной и боковой поверхностей когтя соответственно);

определяем предельное усилие, воспринимаемое когтем:

$$N_{ult, к} = (\Delta_{ult}/\Delta_{см, \alpha}) \cos \alpha + (\Delta_{ult}/\Delta_{см, \beta}) \cos \beta, \quad (11)$$

где Δ_{ult} – предельно допустимое перемещение, $\Delta_{ult} = 2$ мм;

исходя из предельной деформации соединения определяем несущую способность двухсторонней когтевой шайбы $N_{к.ш}$ как сумму несущих способностей всех когтей:

$$N_{ult, ш} = 0,5 \sum N_{ult, к}, \quad (12)$$

где 0,5 – коэффициент, учитывающий смятие древесины с двух сторон шайбы.

Результаты расчета представлены в табл. 2, зависимость несущей способности шайб от толщины заготовки – на рис. 5.

Таблица 2

Несущая способность когтевых шайб в зависимости от схемы раскроя и толщины заготовки

Схема раскроя шайбы (по количеству зубьев с одной стороны, шт.)	Несущая способность шайбы $N_{ult, ш}$, кН, в зависимости от толщины заготовки t , мм					
	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5
$n = 8$	3,06	3,33	3,54	3,73	3,88	4,01
$n = 9$	3,45	3,67	3,86	4,02	4,16	4,27
$n = 10$	3,72	3,93	4,10	4,24	4,36	4,47
$n = 11$	3,81	3,99	4,16	4,31	4,43	4,54
$n = 12$	4,22	4,38	4,52	4,64	4,74	4,83

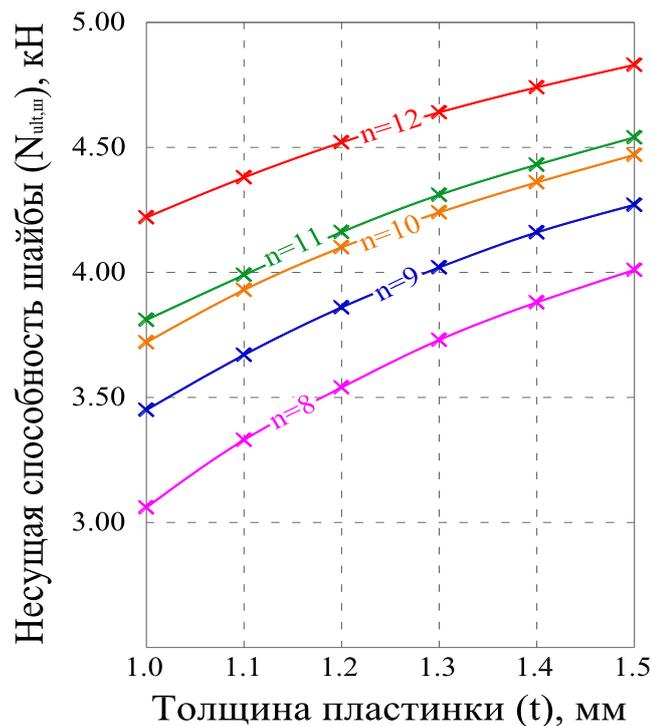


Рис. 5. Зависимость несущей способности шайбы от толщины пластинки

Несущая способность когтевой шайбы $N_{ult. ш.}$, выштампованной из пластинки одного диаметра, может значительно отличаться (до 54 %). При варьировании толщины пластинки-заготовки в пределах 1,0...1,5 мм увеличение $N_{ult. ш.}$ варьируется в пределах 15...31 %, с ростом общего числа зубьев влияние толщины снижается.

При общем количестве зубьев от 8 до 12 шт. увеличение несущей способности составляет 20...38 %, наибольшее различие характерно для шайб, штампованных из пластины толщиной 1 мм.

Установлено, что наиболее эффективным является вариант раскроя двухсторонней когтевой шайбы с количеством зубьев с каждой стороны $n = 12$ шт. Учитывая незначительную высоту зубьев ($h_{зуб} = 4,9$ мм) для шайб данного варианта можно рекомендовать их к применению только с предварительно высушенными пиломатериалами, поскольку выход зубьев из гнезд при усушке будет негативно сказываться на работе когтевого соединения. Для использования во влажных пиломатериалах наиболее рациональным является вариант при $n = 9$ шт. с высотой зуба 6,7 мм.

Выводы

1. Предложена методика расчета, позволяющая теоретически определять несущую способность соединений деревянных конструкций на когтевых шайбах при действии кратковременной нагрузки, а также рациональные параметры раскроя для одно- и двухсторонних шайб произвольного диаметра.

2. Определены наиболее эффективные параметры раскроя двухсторонней когтевой шайбы, изготавливаемой из стальной пластинки

толщиной 1,0...1,5 мм, с учетом предельной деформации соединения деревянных элементов при продольном сдвиге.

3. Установлено, что влияние диаметра стальной заготовки, длительности действия нагрузки и породного состава стержневых элементов деревянных конструкций на несущую способность шайб требует проведения дополнительных исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. А. с. № 26424. МПК E04B 1/49. Приспособление для соединения деревянных частей в конструкциях: заявл. 18.03.1931; опубл. 31.05.1932 / Кабаков Н.П. [Kabakov N.P. *A Device for Connecting Wooden Parts in Structures*. Certificate of Authorship USSR no. SU 26424 A1, 1932].

2. А. с. № 29009. МПК E04B 1/49. Шпонка из листового металла для деревянных конструкций: заявл. 05.05.1931; опубл. 31.01.1933 / Хорьков М.М. [Khor'kov M.M. *Sheet Metal Dowel for Wooden Structures*. Certificate of Authorship USSR no. SU 29009 A1, 1933].

3. А. с. № 1807185. МКИ E04B 1/38. Узловое соединение стержней деревянных несущих конструкций: № 4930924/33: заявл. 23.04.91; опубл. 07.04.93 / Б.В. Лабудин, В.Д. Попов, В.В. Яковлев, А.В. Вешняков. [Labudin V.V., Popov V.D., Yakovlev V.V., Veshnyakov A.V. *Nodal Connection of the Rods of Wooden Supporting Structures*. Certificate of Authorship USSR no. SU 1807185 A1, 1993].

4. Агафонов С.А., Герман А.Д., Муратова Т.В. Дифференциальные уравнения / под ред. В.С. Зарубина, А.П. Крищенко. 3-е изд., стер. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. 352 с. [Agafonov S.A., German A.D., Muratova T.V. *Differential Equations*. Ed. by V.S. Zarubina, A.P. Krishchenko. Moscow, MSTU Publ., 2004. 352 p.].

5. Ашкенази Е.К., Ганов Э.В. Анизотропия конструкционных материалов: справ. Л.: Машиностроение, 1980. 247 с. [Ashkenazi E.K., Ganov E.V. *Anisotropy of Structural Materials: Handbook*. Leningrad, Mashinostroyeniye Publ., 1980. 247 p.].

6. Вдовин В.М., Мухаев А.И., Арискин М.В. К оценке напряженно-деформированного состояния деревянных элементов, соединенных центровыми клееными шпонками // Региональная архитектура и строительство. 2013. № 2. С. 81–90. [Vdovin V.M., Muhaev A.I., Ariskin M.V. To the Estimation of Stress-Strain State of Wooden Elements Connected by Pivot Glued Dowels. *Regional'naya arkhitektura i stroitel'stvo* [Regional Architecture and Engineering], 2013, no. 2, pp. 81–90].

7. Галахов М.С. Соединения деревянных конструкций на клеенных кольцевых шпонках: дис. ... канд. техн. наук. Пенза, 2002. 176 с. [Galakhov M.S. *Connections of Wooden Structures on Glued Shearing Rings*: Cand. Eng. Sci. Diss. Penza, PGUAS, 2002. 176 p.].

8. Данилов Е.В., Черных А.Г. Методы исследования соединений деревянных конструкций на когтевых шпонках // Науч. обозрение. Техн. науки. 2014. № 1. С. 133–134. [Danilov E.V., Chernykh A.G. Methods of Joinery Timber Construction with the Claw Dowels. *Nauchnoye obozreniye. Tekhnicheskiye nauki* [Scientific Review. Technical science], 2014, no. 1, pp. 133–134].

9. Дмитриев П.А. Экспериментальные исследования соединений элементов деревянных конструкций на металлических и пластмассовых нагелях и теория их расчета с учетом упруговязких и пластических деформаций: дис. ... д-ра техн. наук. Новосибирск, 1975. 529 с. [Dmitriyev P.A. *Experimental Studies of Connections of Elements of Wooden Structures on Metal and Plastic Dowels and the Theory of Their Calculation Allowing for Visco-Elastic and Plastic Deformations*: Dr. Eng. Sci. Diss. Novosibirsk, 1975. 529 p.].

10. Ишмаева Д.С. Жесткие узловые соединения на клеенных стальных шайбах в балочных структурах из клееных деревянных элементов: дис. ... канд. техн. наук. Пенза, 2014. 171 с. [Ishmayeva D.S. *Rigid Joint Connections on Glued Steel Washers in Beam Structures of Glued Wooden Elements*: Cand. Eng. Sci. Diss. Penza, 2014. 171 p.].

11. Карельский А.В., Лабудин Б.В., Мелехов В.И. Испытание на сдвиг элементов деревянных конструкций, соединенных металлическими зубчатыми пластинами // Строительство и реконструкция. 2015. № 1(57). С. 11–16. [Karelskiy A., Labudin B., Melekhov V. Shear Test Elements of Wooden Structures, United Punched Metal Plate Fasteners. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya* [Building and reconstruction], 2015, no. 1(57), pp. 11–16].

12. Крицин А.В. Расчет сквозных деревянных конструкций на металлических зубчатых пластинах с учетом упруго-вязких и пластических деформаций: дис. ... канд. техн. наук. Н. Новгород, 2004. 180 с. [Kritsin A.V. *Calculation of Open Wooden Structures on Metal Connector Plates Allowing for Visco-Elastic and Plastic Deformations*: Cand. Eng. Sci. Nizhny Novgorod, 2004. 180 p.].

13. Кузнецов Г.Ф. Деревянные конструкции. Справочник проектировщика промышленных сооружений. М.; Л.: Гл. редакция строит. лит-ры, 1937. 955 с. [Kuznetsov G.F. *Wooden Structures. Handbook for the*

Designers of Industrial Facilities. Moscow, Glavnaya redaktsiya stroitel'noy literatury Publ., 1937. 955 p.].

14. *Лабудин Б.В.* Совершенствование клееных деревянных конструкций с пространственно-регулярной структурой: моног. Архангельск: АГТУ, 2007. 267 с. [Labudin B.V. *Improving Laminated Wood Structures with a Spatially Regular Structure*. Arkhangelsk, ASTU Publ., 2007. 267 p.].

15. *Леннов В.Г.* Штампованные когтевые шайбы, как новый тип связей элементов деревянных конструкций // Тр. Горьк. инж.-строит. ин-та. Горький, 1949. Вып. 1. С. 169–181. [Lennov V.G. Stamped Claw Washers as a New Type of Connection of Wooden Structures Elements. *Proceedings of the Gorkovkiy Engineering and Construction Institute*. Gorky, 1949, iss. 1, pp. 169–181].

16. *Попов Е.В., Лабудин Б.В., Мелехов В.И.* Испытание на сдвиг элементов деревянных конструкций, соединенных с применением зубчатых шайб «Bulldog» // Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения: материалы Междунар. академ. чтений. Курск: Курск. гос. ун-т, 2015. С. 189–198. [Popov E.V., Labudin B.V., Melekhov V.I. Shear Test of Elements of Wooden Structures Connected with the Use of Toothed Bulldog Washers. *Safety of the Building Fund of Russia. Problems and Solutions: Proceedings of the International Academic Readings*. Kursk, Kursk State University Publ., 2015, pp. 189–198].

17. *Попов Е.В., Филиппов В.В., Мелехов В.И., Лабудин Б.В., Тюрикова Т.В.* Влияние жесткости связей сдвига при расчете ребристых панелей на деревянном каркасе // Изв. вузов. Лесн. журн. 2016. № 4. С. 123–134. [Popov E.V., Filippov V.A., Melekhov V.I., Labudin B.V., Tyurikova T.V. Effect of Shear Connections Rigidity in Calculating the Ribbed Panels. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2016, no. 4, pp. 123–134]. DOI: [10.17238/issn0536-1036.2016.4.136](https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2016.4.136), URL: http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/101/popov_ispr._.pdf

18. *Римшин В.И., Лабудин Б.В., Мелехов В.И., Попов Е.В., Рощина С.И.* Соединения элементов деревянных конструкций на шпонках и шайбах // Вестн. МГСУ. 2016. № 9. С. 35–50. [Rimshin V.I., Labudin B.V., Melekhov V.I., Popov E.V., Roshchina S.I. Connections of Wooden Structural Elements on Dowels and Washers. *Vestnik MGSU*. 2016, no. 9, pp. 35–50].

19. СП 64.13330.2017. Деревянные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-25–80 (с Изменением № 1). Введ. 28-7–2017 // Техэксперт: электронный фонд правовой и нормативно-технической документации. Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/456082589> (дата обращения:

15.11.19). [Code of Practice SP 64.13330.2017. Timber Structures. Tekhekspert: Electronic Fund of Legal and Regulatory Technical Documentation, 2017].

20. СТАДД-3.2–2011. Деревянные конструкции. Соединения деревянных элементов с использованием зубчатых пластин. СПб.: НП «Ассоциация деревянного домостроения», 2012. 40 с. [Association Standard of Wooden House Construction StADD–3.2–2011. Wooden Structures. Joining Wooden Elements Using Connector Plates. Saint Petersburg, Assotsiatsiya derevyannogo domostroyeniya Publ., 2012. 40 p.].

21. Сюй Юнь, Черных А.Г., Глухих В.Н. Моделирование и расчет несущей способности односрезного шурупа на металлической накладке с использованием металлической зубчатой пластины // Строительная механика и расчет сооружений. 2015. № 4(261). С. 17–23. [Xu Yun, Chernykh A.G., Glukhikh V.N. Modeling and Calculation of the Shear Bearing Capacity of Screw on the Metal Plate with Nail Plate. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy* [Structural Mechanics and Analysis of Constructions], 2015, no. 4(261), pp. 17–23].

22. Blaß H.J., Schädle P. Ductility Aspects of Reinforced and Non-Reinforced Timber Joints. *Engineering Structures*, 2011, vol. 33, iss. 11, pp. 3018–3026. DOI: [10.1016/j.engstruct.2011.02.001](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.02.001)

23. Čechavičius R. Slip of “Bulldog”-Type Toothed-Plate Connectors in Steel-Timber Joints of Open-Web Girders. *Journal of Civil Engineering and Management*, 2004, vol. X, suppl. 1, pp. 23–29.

24. Karadelis J.N., Brown P. Punched Metal Plate Timber Fasteners under Fatigue Loading. *Construction and Building Materials*, 2000, vol. 14, iss. 2, pp. 99–108. DOI: [10.1016/S0950-0618\(00\)00015-5](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(00)00015-5)

25. Meghlat E.-M., Oudjene M., Ait-Aider H. Load-Slip Behaviour of Timber-to-Concrete Connections Reinforced with Punched Metal Plate. *Proceedings of the World Conference on Timber Engineering (WCTE 2014), Quebec City, Canada, August 10–14, 2014*. Quebec, Canada, Curran Associates, Inc., 2014, pp. 813–821.

26. *Product Catalog of the Company Bova Březnice spol. sro.* Available at: <http://bova-nail.cz/kategorie-produktu/kovani-drevene-konstrukce/hmozdinky/> (accessed 15.11.19).

27. Rimshin V., Labudin B., Morozov V., Orlov A., Kazarian A., Kazaryan V. Calculation of Shear Stability of Conjugation of the Main Pillars with the Foundation in Wooden Frame Buildings. *International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies*

EMMFT 2018. Cham, Switzerland, Springer, 2019, vol. 2, pp. 867–876. DOI: [10.1007/978-3-030-19868-8_85](https://doi.org/10.1007/978-3-030-19868-8_85)

28. Rimshin V.I., Labudin B.V., Melekhov V.I., Orlov A.O., Kurbatov V.L. Improvement of Strength and Stiffness of Components of Main Struts with Foundation in Wooden Frame Buildings. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2018, vol. 13, no. 11, pp. 3851–3856.

CONTACT INTERACTION OF A CLAW WASHER WITH WOOD AT LIMITING SHEAR

E.V. Popov¹, *Candidate of Engineering*; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8950-7558>

A.V. Ruslanova¹, *External PhD Student*; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0298-9129>

V.V. Sopilov¹, *Postgraduate Student*; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1236-5950>

N. Zdravovic², *Chief Engineer, Coordinator of Projects*; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0997-5130>

S.M. Mamedov³, *Candidate of Economics, Assoc. Prof.*; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0366-1085>

B.V. Labudin¹, *Doctor of Engineering, Prof.*; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2547-3096>

¹Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 22, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; e-mail: EPV1989@yandex.ru, sopilov.v@edu.narfu.ru, kalipso64@gmail.com, sevned@mail.ru

²Fylkesmannen i Troms og Finnmark, Statens hus, Vadsø, Troms og Finnmark County, 9811, Norway; e-mail: fmfinzd@fylkesmannen.no

³Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, 2-aya Krasnoarmeyskaya ul., 4, Saint Petersburg, 190005, Russian Federation; e-mail: mamedov_am@bk.ru

When designing, manufacturing and maintaining of woodworks and elements of wooden structures it is necessary to solve the problem of providing the calculation of strength, stiffness and their bearing capacity. This problem becomes particularly relevant while reconstructing and new wooden house building, as the correct choice of connection type influences the technical possibility to use wood in the

elements of structures. Such types of special connectors as claw washers, gang nails, dowel connections, etc. are used for these purposes. The existing range of claw washers implies different diameters, thicknesses, and claw configurations depending on the required bearing capacity and cross-sectional dimensions of sawn timber. The accepted physical model of wood is a transtropic body. The forces transmitted in the joints of the elements of wooden structures are perceived by the total contact surface of the mating elements. However, the work of individual teeth of claw washers has been poorly studied: research on influence of geometrical characteristics of the tooth on the bearing capacity of the connector is absent; variation in thickness of the connector is not assessed. A double-sided claw washer of the Bulldog type (prototype) with the diameter of 50 mm was adopted as the object of study. Various schemes of cutting of the claw washer with predetermined dimensions (width and height) of a triangular tooth are considered. The influence of dimensions on the bearing capacity of the thickness of claw washers is estimated within 1–1.5 mm. The main criterion for the selected cutting patterns is the ability to produce the washers by single-impact stamping without additional trimming. Double-sided claw washers of 5 different types with the number of cog-teeth from 8 to 12 items on each side were studied. A differential equation of the 4th order is accepted as a mathematical model of cog-tooth action. The equation describes the behavior of a dowel on an elastic base with a fixed value of bending stiffness EI . The transition to which was carried out from the variable value $EI = f(x)$ by searching for the equivalent width of the cross-section from the bending conditions of the element of the triangular section of a variable directed normal to the frontal surface and a constant directed normal to the lateral surface.

For citation: Popov E.V., Ruslanova A.V., Sopilov V.V., Zdravovic N., Mamedov S.M., Labudin B.V. Contact Interaction of a Claw Washer with Wood at Limiting Shear. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2020, no. 4, pp. 178–189. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-4-178-189

Keywords: wood, wooden structures, anisotropy of wood, strength, deformability, claw washers, gang nails.

Поступила 15.11.19 / Received on November 15, 2019