УДК 691

© Е. В. Данилов, канд. техн. наук, доцент

© Т. А. Исупова, студентка

(Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, Россия)

E-mail: sleepme@mail.ru, tisupova123@mail.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2021-18-4-54-59

© Е. В. Danilov, PhD in Sci. Tech., Associate Professor

© Т. А. Isupova, student

(Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, St. Petersburg, Russia)

E-mail: sleepme@mail.ru, tisupova123@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИНЕЙНОЙ ЖЕСТКОСТИ В СОЕДИНЕНИИ LVL С КОГТЕВЫМИ ШАЙБАМИ

INVESTIGATION OF LINEAR STIFFNESS IN THE CONNECTION WITH CLAW WASHERS IN THE LVL BEAM

Была рассмотрена работа двусрезных нагельных соединений с применением когтевых шайб и LVL. Приведена методика испытаний при работе на сжатие для двусрезного соединения древесины при приложении нагрузки под 45° к волокнам. Проведено экспериментальное исследование соединения с когтевыми шайбами в брусе LVL для угла 45° между направлением волокон крайних и среднего элемента на действие сжимающей нагрузки, в результате которого определены деформации соединения и экспериментальные значения коэффициента линейной жесткости. Выполнена апробация результатов, рассмотрен характер разрушения соединения.

Ключевые слова: когтевая шайба, LVL, двусрезное соединение, коэффициент линейной жесткости, испытания.

The study considers the performance of double-cut dowel connections with the use of claw washers in the LVL beam. The authors present a method of testing the double-cut wood connection performance under compression, the angle of forces application in regard to the fibers being 45°. There has been carried out an experimental study of the connection with claw washers in the LVL beam for a 45° angle between the direction of the fibers in the outer and middle elements under the action compressive load. The testing results allow assessing the deformation value in the connection and the experimental values of the linear stiffness coefficient. There has been implemented an evaluation of results, and the nature of the connection's fracture is considered.

Keywords: claw washer, LVL, double-cut connection, linear stiffness coefficients, testing.

С развитием отрасли в деревянном строительстве широко распространилось использование LVL-бруса, так как данный материал имеет высокую прочность и жесткость. В конструкциях из LVL обосновано применение соединений, также обеспечивающих высокие прочностные и жесткостные характеристики. В качестве таких соединителей могут быть использованы нагели с когтевыми шайбами [1–4].

На сегодняшний день в зарубежных странах соединения с использованием когтевых шайб достаточно популярны. Однако в России такой тип соединений не получил большого распространения ввиду отсутствия достаточной теоретической и практической базы. Проектирование конструкций из LVL с когтевыми шайбами под-

разумевает в том числе проведение проверок по второй группе предельных состояний. При этом расчеты подразумевают использование линейной жесткости соединения для определения фактических перемещений. Такая жесткость может быть определена по формуле

$$k_x = \frac{N_x}{\delta_x}, \quad (1)$$

где N_x — величина приложенной к соединению нагрузки; δ_x — смещение элементов соединения.

В существующей нормативной литературе не учитывается ряд факторов, влияющих на изменение жесткости таких соединений и конструкций: изменение влажности, угол приложения силы к волокнам, размеры и форма нагелей, типы и габариты когтевых шайб и элементов соедине-

ний на основе древесины, поэтому определение линейной жесткости согласно Eurocode 5¹ или СТАДД 3.2–2012² требует уточнения.

В ряде работ [5–11] была освещена тема исследований соединений и конструкций из однонаправленного клееного бруса с когтевыми шайбами. Была определена методика задания упругих связей и их жесткостей в программном комплексе SCAD и проведены исследования на определение линейной жесткости для двусрезного соединения с приложением сжимающей нагрузки на средний элемент, расположенный под углом 0 и 90° к крайним. Однако для угла 45° значения жесткостей были получены теоретически и не проверены экспериментально.

Целью данной работы является определение линейной жесткости в соединениях LVL с когтевыми шайбами для угла приложения силы к волокнам образца, равного 45°. В процессе проведения эксперимента требуется определить значение линейной жесткости соединения и сравнить с полученными ранее [10–11] теоретическими значениями, а также изучить характер разрушения. Эксперимент требуется проводить согласно рекомендациям по испытанию соединений деревянных конструкций [12].

В рамках исследования был проведен эксперимент на образцах с приложением сжимающей нагрузки на средний элемент, повернутый относительно крайних на угол $\alpha = 45^\circ$, в ходе которого изучалось влияние продольного усилия на двусрезное соединение и проводилось определение коэффициента жесткости. Крепление соединения обеспечивалось при помощи стального нагеля и когтевых шайб.

Формы и размеры образцов выполнены согласно конструктивным требованиям Рекомендаций³. В качестве материалов для образцов использовались материал LVL марки *Ultralam* толщиной 51 мм, когтевые двусторонние шайбы типа C1 *Bulldog* диаметром 95 мм производства *Simpson*. Размеры образца приведены на рис. 1.

¹ Eurocode 5: Design of timber structures. Part: General rules and rules for buildings. ENV 1995-1-1. Brussels: CEN, 1993. 133 p.

² Стандарт Ассоциации деревянного домостроения СТАДД-3.2–2011. Деревянные конструкции. Соединения деревянных элементов с использованием зубчатых пластин. СПб., 2012. 59 с.

³ Рекомендации по проектированию и изготовлению деревянных конструкций с соединениями на пластинах с цилиндрическими нагелями // ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко. М.: ЦНИИСК, 1988. 77 с.

В качестве нагелей применялись гладкие стальные шпильки диаметром 16 мм по ГОСТ 9066–75, усиленные шайбами с гайками. Запрессовка когтевых шайб *Bulldog* в брус LVL обеспечивалась при помощи специального гидравлического пресса [13]. Характеристики испытываемых образцов приведены в таблице.

Было испытано три образца одинаковых габаритов. Перед испытанием на образцы были установлены индикаторы часового типа с ценой деления 0,01 мм для снятия результатов смещения среднего элемента относительно крайних. Исключение возможности возникновения трения в стыках образца обеспечивалось за счет минимальных зазоров между брусом (0,5 мм), которые в реальных конструкциях возникают из-за усушки элементов. Крепление измерительного устройства организовано таким образом, чтобы при вертикальных деформациях наконечник смещался из корпуса датчика. Такое крепление исключает возможность повреждения механизма и позволяет не демонтировать индикатор на образце в течение всего эксперимента. Во избежание поворота элементов относительно друг друга были установлены металлические планки. Крепление пластин осуществлялось при помощи шурупов к крайним элементам (рис. 2).

Испытание проводилось согласно требованиям [12] и Рекомендаций⁴ на испытательной машине *Instron 5989*. Нагрузка прикладывалась к среднему элементу ступенчато с постоянной ступенью нагружения, принятой равной 10 % от максимального разрушающего значения N_d . После каждой ступени нагружения проводилась разгрузка до значения приложенной силы, равного 0,1 N_d . Значение разрушающей нагрузки было определено согласно ранее проведенным пробным экспериментам и составило 95 кН.

⁴ Рекомендации по испытанию деревянных конструкций // ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко. М.: Стройиздат, 1976. 28 с.

Характеристики испытываемых образцов

Характеристика соединения	Значение
Угол α между направлением волокон крайних и среднего элементов	45°
Диаметр когтевой шайбы $d_{к.ш.}$, мм	95
Диаметр нагеля d_n , мм	16
Толщина элементов t , мм	51

Рис. 1. Размеры образца для испытания для угла направления волокон между крайними и средним элементом $\alpha = 45^\circ$

После полного разрушения образца все элементы соединения демонтировались, и затем исследовался характер разрушения. В результате проведенных экспериментов было обнаружено

разрушение в виде скалывания материала LVL вдоль волокон в среднем образце (рис. 3). Когтевые шайбы получили местные деформации в виде изгиба части зубьев под нагрузкой во внешнюю или внутреннюю сторону. При рассмотрении изменения формы стального нагеля наблюдается незначительный изгиб.

Для определения линейной жесткости согласно полученным данным построены графики зависимости смещений в соединении от действующей нагрузки, где определена зона упругих деформаций [12]. Согласно графикам, на начальном этапе до нагрузки 9,5 кН присутствуют рыхлые деформации, вплоть до 40 кН образец работает упруго, затем переходит в пластическую стадию и при нагрузке в 63 кН при деформациях в 12 мм происходит хрупкое разрушение. Для определения линейной жесткости необходимо исключить зону начальных рыхлых деформаций, которые возникают за счет обмятий неровностей, небольших смятий самого материала. По результатам эксперимента определялся коэффициент жесткости по формуле (1) в упругой зоне для нагрузки 19 кН. Согласно графику, среднее значение коэффициента жесткости составляет $k = 8,2 \text{ кН/мм}$ (рис. 4).

Согласно ГОСТ 16483.5-73⁵ определяется предел прочности на скалывание вдоль волокон:

⁵ ГОСТ 16483.5 73. Межгосударственный стандарт. Древесина. Методы определения предела прочности при скалывании вдоль волокон. М.: Изд-во стандартов, 1999.

Рис. 2. Испытание образца на сжатие для угла между направлением волокон крайних и среднего элемента $\alpha = 45^\circ$

Рис. 3. Характер разрушения среднего элемента в соединении: а — образец № 1; б — образец № 2; в — образец № 3

$$\tau_w = \frac{N_{\max}}{al}, \quad (2)$$

где $N_{\max}$ — максимальная нагрузка, Н; a — ширина образца, см; l — длина площадки скалывания образца, см.

Для определения предела прочности образца при влажности 12 % используют формулу

$$\tau_{12} = \tau_w [1 + \alpha(W - 12)], \quad (3)$$

где α — поправочный коэффициент на влажность, равный 0,03; W — влажность образца в момент испытания, равная 6 %.

Согласно СП 64.13330.2017⁶ нормативное значение сопротивления скалыванию вдоль волокон

в плоскости листа составляет 3,6 МПа, при этом фактическое среднее скалывающее напряжение, возникшее в образцах, составило 4,24 МПа. Данный факт говорит о том, что разрушение произошло ввиду исчерпания сопротивления скалыванию вдоль волокон вдоль плоскости листа, что исключает возможность использования в элементах соединения некачественного материала. Скалывающие напряжения являются опасными ввиду хрупкого разрушения соединений. Данный факт обязывает проводить дополнительную проверку узлов, включая данный режим разрушения.

Результаты экспериментальных исследований показали небольшое разнотечение с результатами, полученными теоретически. Для диаме-

Рис. 4. График зависимости нагрузки от деформации: а — для трех образцов; б — усредненный график

⁶ СП 64.13330.2017. Свод правил. Деревянные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-25-80. М.: Минрегион России, 2017.

тра когтевой шайбы 95 мм и нагеля 16 мм, когда угол направления волокон между средним и крайними элементами равен 45° , экспериментальное значение соответствует $k = 8,2$ кН/мм, теоретические результаты [10] — 10,15 кН/мм (рис. 5). Разница составляет 19 %, что является приемлемым. Для увеличения сходимости результатов требуется проведение большего количества повторений в исследовании. Однако полученные данные подтверждают адекватность распределения изолиний линейных жесткостей (см. рис. 5), которые могут быть рекомендованы к использованию при выполнении расчетов по второй группе предельных состояний. Также при расчете узлов необходимо учитывать возможность скалывания вдоль волокон древесины.

Рис. 5. График распределения жесткостей соединений в зависимости от диаметров когтевых шайб и угла наклона нагрузки к волокнам для диаметра нагеля $d_n = 16$ мм [9]

Библиографический список

1. Леннов В. Г. Штампованные когтевые шайбы как новый тип связей элементов деревянных конструкций // Труды Горьк. инж.-строит. ин-та. Вып. 1. Горький, 1949. С. 169–181.
2. Данилов Е. В. Развитие методов расчета соединений из однонаправленного клееного бруса с когтевыми шайбами: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2019. 186 с.
3. Римшин В. И., Лабудин Б. В., Мелехов В. И., Попов Е. В., Рощина С. И. Соединения элементов деревянных конструкций на шпонках и шайбах // Вестник МГСУ. 2016. № 9. С. 35–50.
4. Данилов Е. В., Усевич А. Б. Определение прочности и базовых величин для соединений на металлических пластинах типа «Bulldog» для цельной древесины и клееного бруса «Ultralam» // сб. докладов «Актуальные проблемы современного строительства». СПб.: СПбГАСУ, 2012. С. 107–109.
5. Черных А. Г., Данилов Е. В. Методы исследования соединений деревянных конструкций на когтевых шпонках // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 2. С. 150.
6. Черных А. Г., Коваль П. С., Данилов Е. В., Мамедов Ш. М. Расчет элементов строительных конструкций, клееных из однонаправленного шпона (LVL). СПб.: СПбГАСУ, 2019. 125 с.
7. 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.
8. Данилов Е. В., Потникова Д. И., Подболоцкая А. С. Исследование крутильной жесткости соединений с когтевыми шайбами в конструкциях из клееного бруса // сб. докладов «Актуальные проблемы современного строительства». СПб.: СПбГАСУ, 2014.
9. Черных А. Г., Данилов Е. В., Коваль П. С. Расчет жесткости соединений конструкций из LVL с когтевыми шайбами // Известия вузов. Лесной журнал. 2020. № 4 (376). С. 157–167.
10. Глухих В. Н., Черных А. Г., Данилов Е. В. Деревянные конструкции с применением когтевых шайб и учетом начальных напряжений древесины. СПб.: СПбГАСУ, 2018. 302 с.
11. Данилов Е. В. Определение линейной жесткости нагельных соединений с когтевыми шайбами в брус LVL // Вестник гражданских инженеров. 2017. № 2 (61). С. 81–85.
12. Рекомендации по испытанию соединений деревянных конструкций / сост. Ю. М. Иванов;

ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко. М.: Стройиздат, 1980. 40 с.

13. Патент на полезную модель № 146232, Российская Федерация, МПК В27F 7/09. Устройство для запрессовки когтевых шайб / Е. В. Данилов, И. А. Гимельфарб, Е. В. Крупин, А. Г. Черных. № 2014123970, приоритет полезной модели 10 июня 2014 г.

References

1. Lennov V. G. *Shtampovannyye kogtevye shayby kak noviy tip svyazey elementov derevyannykh konstruktsiy* [Pressed claw washers as a new type of elements' connections of wooden structures]. *Trudy Gor'k. inzh.-stroit. in-ta – Bulletin of the Gorky Institute of Civil Engineering*, 1949, iss. 1, pp. 169–181.

2. Danilov E. V. *Razvitiye metodov rascheta soedineniy iz odnonapravlennoy kleenogo brusa s kogtevyimi shaybami. Diss. kand. tekhn. nauk* [Development of methods for calculating joints made of unidirectional glued beams with claw washers. PhD in Sci. Tech. diss.]. St. Petersburg, 2019, 186 p.

3. Rimshin V. I., et al. *Soedineniya elementov derevyannykh konstruktsiy na shponkakh i shaybakh* [Dowel type connections of elements of wooden structures with dowels and claw washers]. *Vestnik MGSU – Bulletin of MGSU*, 2016, no. 9, pp. 35–50.

4. Danilov E. V., Usievich A. B. *Opreделение prochnosti i bazovykh velichin dlya soedineniy na metallicheskiykh plastinakh tipa «Bulldog» dlya tsel'noy drevesiny i kleenogo brusa «Ultralam»* [Assessing the strength and basic values for joints on metal plates of the “Bulldog” type for the “Ultralam” solid wood and glued beams]. *Trudy nauchnoy konferentsii «Aktual'nye problemy sovremennogo stroitel'stva»* [Proceedings of the scientific conference “Actual problems of modern construction”]. St. Petersburg, SPbGASU Publ., 2012, pp. 107–109.

5. Chernykh A. G., Danilov E. V. *Metody issledovaniya soedineniy derevyannykh konstruktsiy na kogtevykh shponkakh* [Methods of studying the dowel type connections of wooden structures on claw dowels]. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya – Modern problems of science and education*, 2013, no. 2, 150 p.

6. Chernykh A. G., Koval' P. S., Danilov E. V., Mamedov Sh. M. *Raschet elementov stroitel'nykh konstruktsiy, kleenykh iz odnonapravlennoy shpona (LVL)*

[Method for calculating cross laminated timber panels (LVL)]. St. Petersburg, SPbGASU Publ., 2019, 125 p.

7. Popov E. V., Labudin B. V., Melekhov V. I. *Ispytaniye na sdvig elementov derevyannykh konstruktsiy, soedinenennykh s primeneniem zubchatykh shayb «Bulldog»* [Shear testing of elements of wooden structures connected with the use of “Bulldog” gear washers]. *Trudy Mezhdunar. Akadem. Chteniy «Bezopasnost' stroitel'nogo fonda Rossii. Problemy i resheniya»* [Proceedings of the International Conference, International Academy of Readings, “Safety of the construction fund of Russia. Problems and solutions”]. Kursk, Kursk State University Publ., 2015, pp. 189–198.

8. Danilov E. V., Potnikova D. I., Podbolotskaya A. S. *Issledovaniye krutit'noy zhestkosti soedineniy s kogtevyimi shaybami v konstruktsiyakh iz kleenogo brusa* [Investigation of the torsion stiffness of connections with claw washers in structures made of glued beams]. *Sb. dokladov «Aktual'nye problemy sovremennogo stroitel'stva»* [Collection of reports “Actual problems of modern construction”]. St. Petersburg, SPbGASU Publ., 2014.

9. Chernykh A. G., Danilov E. V., Koval' P. S. *Raschet zhestkosti soedineniy konstruktsiy iz LVL s kogtevyimi shaybami* [Calculation of the stiffness of joints of LVL structures with claw washers]. *Izvestiya vuzov. Lesnoy zhurnal – Bulletin of Higher Schools. Forestry Journal*, 2020, no. 4 (376), pp. 157–167.

10. Glukhikh V. N., Chernykh A. G., Danilov E. V. *Derevyannyye konstruktsii s primeneniem kogtevykh shayb i uchetom nachal'nykh napryazheniy drevesiny* [Wooden structures with the use of claw washers and taking into account the initial stresses of wood]. St. Petersburg, SPbGASU Publ., 2018, 302 p.

11. Danilov E. V. *Opreделение lineynoy zhestkosti nagel'nykh soedineniy s kogtevyimi shaybami v bruse LVL* [Determination of the linear stiffness of the nail joints with claw washers in the LVL beam]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2017, no. 2 (61), pp. 81–85.

12. *Rekomendatsii po ispytaniyu soedineniy derevyannykh konstruktsiy* [Recommendations for testing joints of wooden structures]. Compl. by Ivanov Yu. M. Moscow, TSNIISK named after V. A. Kucherenko Proc., Stroyizdat Publ., 1980, 40 p.

13. Danilov E. V., Gimel'farb I. A., Krupin E. V., Chernykh A. G. *Ustroystvo dlya zapressovki kogtevykh shayb* [Device for pressing claw washers]. Patent RF, no. 146232, 2014.