

Экспериментальное определение несущей способности ошипованных контактных элементов при перемещении конструкций из древесины

И.А. Дужевский^{1a}, В.И. Мелехов^{2b}, А.И. Бабкин^{1c}

¹ Институт судостроения и морской арктической техники Северного (Арктического) федерального университета им. М.В. Ломоносова, ул. Капитана Воронина, 6, Северодвинск, Россия

² Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, 17, Архангельск, Россия

^a i.duzhevskiy@narfu.ru, ^b v.melekhov@narfu.ru, ^c a.babkin@narfu.ru

^a<https://orcid.org/0009-0002-8296-3064>, ^b<https://orcid.org/0000-0002-2583-3012>, ^c<https://orcid.org/0009-0000-7977-1200>

Статья поступила 13.08.2024, принята 10.09.2024

Изделия из древесины широко распространены во многих отраслях промышленности. На деревообрабатывающих предприятиях в технологическом процессе изготовления крупногабаритных изделий из массивной и клееной древесины, клееных деревянных конструкций предусмотрены транспортно-логистические операции. Для этого используются грузоподъемные механизмы и внутризаводской транспорт. Универсальные грузозахватные устройства не обеспечивают надежность и безопасность при выполнении работ. Древесина обладает рядом особенностей: пластичностью, деформативностью, сравнительно небольшой прочностью, требующей щадящего отношения при перемещении и транспортировке изделий из древесины. Фрикционные грузозахватные устройства, удерживающие груз за счет сил трения, ограничены в применении из-за сложности контроля усилия зажатия и возможности выскользывания груза из захвата. Впервые рассмотрены вопросы применения грузозахватных устройств с ошипованными контактными элементами для перемещения изделий из древесины, которые обеспечивают высокую надежность и безопасность грузотранспортных операций. Приведены варианты технологии изготовления ошипованных контактных элементов из металлических и полимерных материалов. Введено понятие и экспериментально определена удельная несущая способность ошипованных контактных элементов грузозахватных устройств при перемещении изделий из древесины и дерево-композитных материалов, позволяющая определить количество, форму и размеры ошипованных контактных элементов в соответствии с особенностями строения древесины и формой поверхности перемещаемого изделия. Показан характер поврежденной контактной поверхности древесины после взаимодействия с ошипованными контактными элементами. Шипы с меньшими геометрическими размерами обладают большей удельной несущей способностью, оставляют меньший след на контактной поверхности древесины. Результаты исследования позволяют обозначить перспективы применения грузозахватных устройств с ошипованными контактными элементами для перемещения клееных деревянных конструкций и изделий из древесины.

Ключевые слова: ошипованные контактные элементы; грузозахватные устройства для дерево-композитных панелей; несущая способность; перемещение деревянных конструкций.

Experimental determination of the bearing capacity of studded contact elements when moving structures made of wood

I.A. Duzhevskiy^{1a}, V.I. Melekhov^{2b}, A.I. Babkin^{1c}

¹ Institute of Shipbuilding and Marine Arctic Technology of Northern Arctic Federal University named after M.V. Lomonosov; 6, Captain Voronin St., Severodvinsk, Russia

² Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, 17, Severnaya Dvina Emb., Arkhangelsk, Russia

^a i.duzhevskiy@narfu.ru, ^b v.melekhov@narfu.ru, ^c a.babkin@narfu.ru

^a<https://orcid.org/0009-0002-8296-3064>, ^b<https://orcid.org/0000-0002-2583-3012>, ^c<https://orcid.org/0009-0000-7977-1200>

Received 13.08.2024, accepted 10.09.2024

Wood products are widely used in many industries. At woodworking enterprises, transport and logistics operations are provided in the technological process of manufacturing large-sized products from solid and glued wood, glued wooden structures. Lifting mechanisms and in-house transport are used for this purpose. Universal lifting devices do not provide reliability and safety when performing work. Wood has a number of features: plasticity, deformability, comparatively low strength, requiring a gentle attitude when moving and transporting wood products. Friction gripping devices that hold the load due to friction forces are limited in use due to the difficulty of controlling the clamping force and the possibility of the load slipping out of the grip. For the first time, the issues of using cargo-handling devices with pinned contact elements for moving wood products, which ensure high reliability and safety of cargo transportation operations, are considered. The variants of the technology for the manufacture of studded contact elements from metal and polymer

materials are presented. The concept is introduced and the "specific bearing capacity" of the studded contact elements of load-lifting devices is experimentally determined when moving wood products and wood composite materials, which makes it possible to determine the number, shape and size of the studded contact elements in accordance with the features of the structure of wood and the shape of the surface of the transferred product. The nature of damage to the contact surface of the wood after interaction with the pinned contact elements is shown. Spikes with smaller geometric dimensions have a higher specific load-bearing capacity and leave a smaller footprint on the contact surface of the wood. The results of the study allow one to identify the prospects for the use of lifting devices with studded contact elements for moving glued wooden structures and wood products.

Keywords: studded contact elements; load-grabbing devices for wood composite panels; load-bearing capacity; displacement of wooden structures.

Введение. На деревообрабатывающих предприятиях в технологическом процессе изготовления крупногабаритных изделий из массивной и клееной древесины, клееных деревянных конструкций (КДК), панелей и др. предусмотрены транспортно-логистические операции [1; 2]. Они выполняются с помощью грузоподъемных механизмов и внутризаводского транспорта. Используют универсальные грузозахватные устройства (ГЗУ) [3], в конструкциях которых не учтены реологические свойства древесины, что не позволяет обеспечить надежность и безопасность при выполнении работ.

Древесина как материал, в отличие от однородных твердых материалов, обладает рядом особенностей: пластичностью, деформативностью, меньшей прочностью, требующей щадящего отношения [4]. Это ограничивает применение фрикционных ГЗУ (рис. 1) [5], удерживающих груз за счет сил трения, так как при перемещении изделий из древесины сложно контролировать усилие зажатия и возможно выскальзывание груза из захвата.

Перемещение деревянных конструкций с помощью мягких строп сопряжено с усложнением операции и ограниченной возможностью поштучного перемещения по сравнению с фрикционными ГЗУ. Основным недостатком фрикционных ГЗУ, как отмечено, является невозможность обеспечить при взаимодействии древесины с контактными элементами (КЭ) ГЗУ надежный зажим из-за особенностей свойств древесины и требований к сохранности лицевой поверхности изделия.

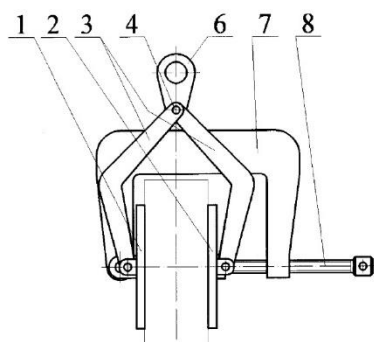


Рис. 1. Фрикционное грузозахватное устройство: 1 — опорный контактный элемент; 2 — прижимной контактный элемент; 3 — рычаг; 4 — ось; 6 — проушина; 7 — зажимное устройство; 8 — зажимной винт

Надежное удерживание груза из массивной и клееной древесины может быть осуществлено применением ГЗУ с ошипованными КЭ. При этом не обеспечивается выполнения жестких требований к сохранности качества поверхности перемещаемых дерево-композитных панелей.

В Северном (Арктическом) федеральном университете разработаны конструкции ГЗУ с ошипованными КЭ, применение которых позволяет обеспечить высокую надежность грузотранспортных операций, сохранность поверхности перемещаемых изделий из древесины и практически исключить возможность срыва и падения груза (рис. 2) [6]. Это направление является новым, изучено недостаточно и требует продолжения исследований. Устройство позволяет исключить влияние эластических деформаций древесины в процессе удерживания груза ГЗУ [7].

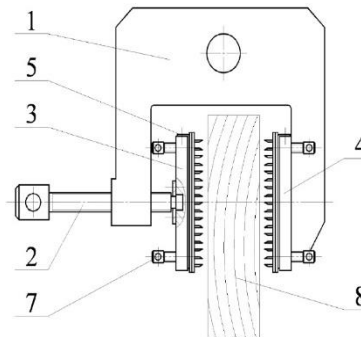


Рис. 2. Грузозахватное устройство с ошипованными контактными элементами для перемещения деревянных конструкций: 1 — П-образный корпус; 2 — зажимной винт; 3 — подвижный контактный элемент; 4 — неподвижный контактный элемент; 5 — металлическая зубчатая пластина; 7 — отжимной винт; 8 — перемещаемая деревянная конструкция

Ошипованные КЭ обычно изготавливают из стали. Предложено изготовить КЭ из полимерных материалов с использованием аддитивных технологий. Аддитивные технологии, называемые также 3D-печатью, в современном понимании предполагают создание изделия на основе САД-данных (трехмерной компьютерной модели) методом послойного добавления материала. Эта технология применяется для быстрого изготовления изделий любой сложной формы [8].

Аддитивное производство предполагает несколько последовательных этапов: создание САД-модели;

создание STL-файла; разделение модели на слои в специальной компьютерной программе, называемой «слайсером»; 3D-печать; постобработка. Исходные материалы могут быть жидкие (фотополимерные смолы, воски), сыпучие (пески, порошковые полимеры, металлопорошковые композиции), в виде тонких листов (полимерные пленки, листы бумаги), в виде полимерной нити или металлической проволоки, расплавляемой непосредственно перед формированием слоя построения. Использовать аддитивные технологии можно не только для создания прототипов, но и для получения готовых функциональных изделий.

Для изготовления ошпикованных КЭ из полимерных материалов рассмотрены два вида аддитивных технологий: *Fused Deposition Modeling* (FDM) и *Stereolithography* (SLA).

Технология FDM состоит в послойном наплавлении расплавляемых нитевидных полимеров, чаще всего термопластов. Нить пластика выдавливается через подогреваемое сопло на стол 3D-принтера и наносится в определенных координатах слой за слоем, в результате чего получается объемное изделие.

В технологии SLA, или стереолитографии, используются смолы, отверждаемые воздействием ультрафиолетового света. Стол 3D-принтера погружается в специальную ванну с находящейся там жидкой фотополимерной смолой. На поверхность стола направляют ультрафиолетовый лазерный луч, который точно фокусируется в заданных координатах. В результате воздействия ультрафиолета слой фотополимера становится твердым. Таким образом, происходит «засветка» слой за слоем, и формируется изделие. Технология SLA позволяет получить изделия сложной формы с мелкими элементами и гладкими поверхностями. Точность деталей, изготовленных по технологии SLA, в десятки раз выше точности деталей, изготовленных по технологии FDM. Одной из модификаций технологии SLA-печати является масочная стереолитография (MSLA), отличающаяся использованием вместо лазерного луча LED лампы, проецирующей ультрафиолетовый свет на стол принтера через жидкокристаллический дисплей. Технология MSLA обеспечивает более высокую скорость печати по сравнению с SLA [9–12].

Проведены сравнительные испытания новых конструкции ГЗУ с ошпикованными КЭ из стали и полимерных материалов.

Методы и методология исследования. *Задачи исследования* — выбор профиля, размеров шипов и способа их фиксации на поверхности КЭ.

Были изготовлены КЭ в виде пластин с шипами конической формы из стали 45 [13] и полимерных материалов. Применение аддитивных технологий при изготовлении КЭ из полимерных материалов позволяет оптимизировать процесс проектирования и изготовления ошпикованных КЭ. Ошпикованные КЭ, изготовленные по технологии FDM, получились невысокого качества и требовали дополнительной механической обработки, поэтому в испытаниях не

использовались. Ошпикованные КЭ, изготовленные по технологии MSLA (фотополимерные смолы, аналог пластика ABS — *ABS-like* и нейлона — *Nylon-like* российского производства) отвечали предъявляемым требованиям по качеству. Шипы разместили на пластинах КЭ 30x30 мм в шахматном порядке по 8 шт. (рис. 3).

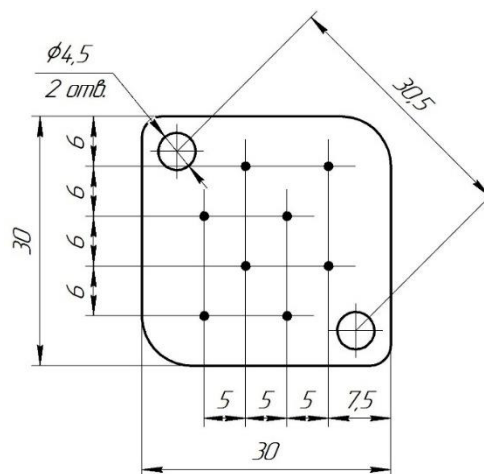


Рис. 3. Расположение шипов на контактном элементе

Из каждого вида материалов изготовили КЭ с шипами четырех типоразмеров: $d2 \times h3$, $d3 \times h3$, $d3 \times h6$, $d4 \times h6$ (рис. 4).

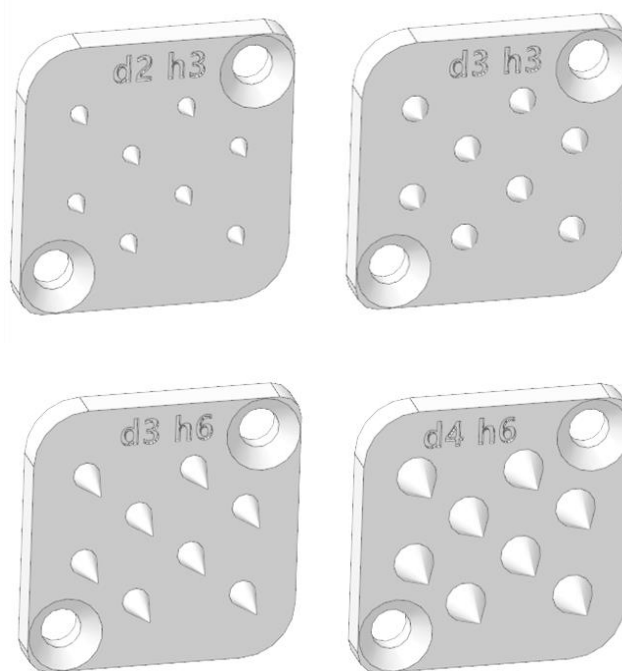


Рис. 4. Контактные элементы с шипами для испытаний (d — диаметр шипа в основании, мм; h — высота шипа, мм)

Пластины КЭ с шипами размещали в приспособлении попарно с двух сторон образца древесины. Ошпикованные пластины сводили в приспособлении и запрессовывали шипы в древесину образца до полного внедрения в древесину на испытательной машине WDW-100 с регистрацией

нагрузки. Диаграмма, полученная при определении древесины сосны, представлена на рис. 5. Усилия запрессовки шипов $d4xh6$ при внедрении в



Рис. 5. Диаграмма «усилие – перемещение», полученная при внедрении стальных шипов $d4xh6$ в древесину сосны

Приспособление с запрессованными в образец древесины шипами устанавливали в испытательную машину WDW-100 и прикладывали нагрузку для обеспечения сдвига образца по поверхности КЭ на величину 10 мм (рис. 6).



Рис. 6. Экспериментальная установка на базе испытательной машины WDW-100

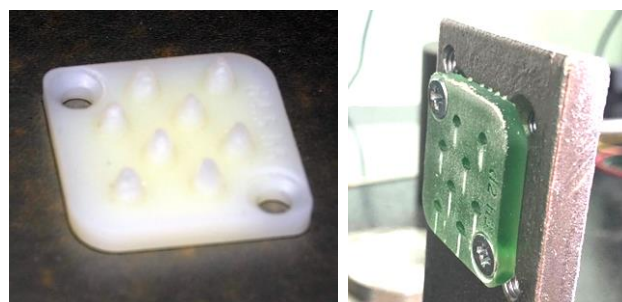
Одновременно фиксировали динамику изменения нагрузки при перемещении образца с записью процесса через компьютерную программу испытательной машины. Проводили испытания на сдвиг на образцах из массивной древесины сосны и лиственницы $100 \times 50 \times 20$ мм с учетом расположения волокон древесины. Предварительно определили прочностные характеристики древесины — пределы прочности и модули упругости при сжатии образцов вдоль и поперек волокон в соответствии с ГОСТ [14–18] и с учетом опыта отечественных и зарубежных исследователей [19–23]. Условия проведения испытаний: влажность образцов из древесины сосны — 12 %, лиственницы — 16 %, относительная влажность

окружающей среды — 40 %, температура — 24 °С. Результаты испытаний приведены в табл. 1, 2.

Результаты исследования. Ошипованные КЭ из стали в процессе испытаний не получили пластической деформации и механических повреждений. КЭ из полимерных материалов разрушились: КЭ, изготовленные из фотополимерной смолы *Nylon-like*, пластически деформировались и изменили форму при погружении в древесину (рис. 7, а), изготовленные из *ABS-like* — хрупко разрушились при сдвиге (рис. 7, б).

Таблица 1. Усилия внедрения и извлечения шипов в древесину сосны

Размеры шипов: d — диаметр в основании, мм; h — высота, мм	Расположение волокон древесины	Усилия внедрения шипов, Н	Усилия извлечения шипов, Н
d2xh3	радиальное	1 040	27,0
	тангенциальное	860	47,4
	осевое	640	67,5
d3xh3	радиальное	1 300	32,0
	тангенциальное	1 370	41,0
	осевое	1 320	64,9
d3xh6	радиальное	1 700	304,4
	тангенциальное	1 500	319,3
	осевое	1 080	260,9
d4xh6	радиальное	2 400	358,3
	тангенциальное	2 250	186,9
	осевое	1 600	226,5



а) б)
Рис. 7. Ошипованные контактные элементы из полимерных материалов: *a* — фотополимер *Nylon-like* после запрессовывания в древесину; *b* — фотополимер *ABS-like* после сдвига

При взаимодействии с шипом во время сдвига происходит деформация древесины, которая оставляет след — отпечаток на контактной поверхности древесины. Характер отпечатка на контактной поверхности древесины после внедрения шипов из стали 45 без относительного смещения показан на рис. 8, после смещения на 10 мм — на рис. 9.

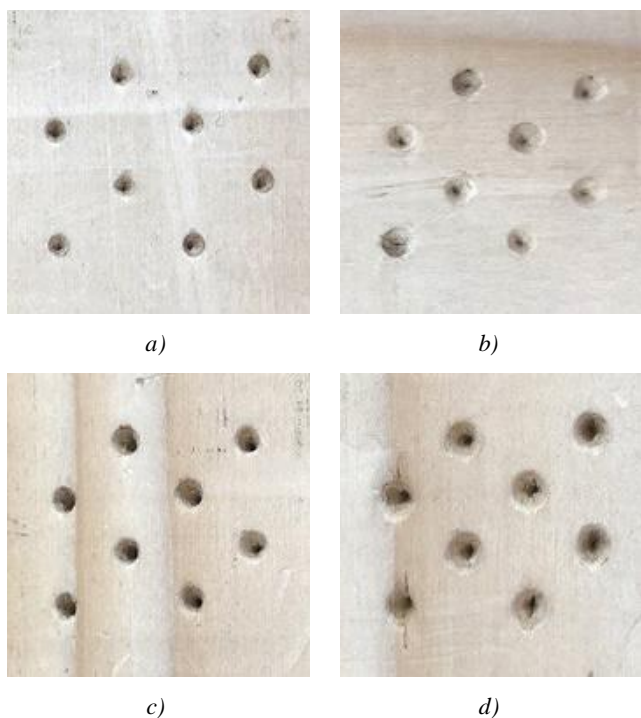


Рис. 8. Отпечатки на поверхности древесины из сосны после взаимодействия с ошипованными контактными элементами: *a* — шипы *d2xh3*; *b* — шипы *d3xh3*; *c* — шипы *d3xh6*; *d* — шипы *d4xh6*

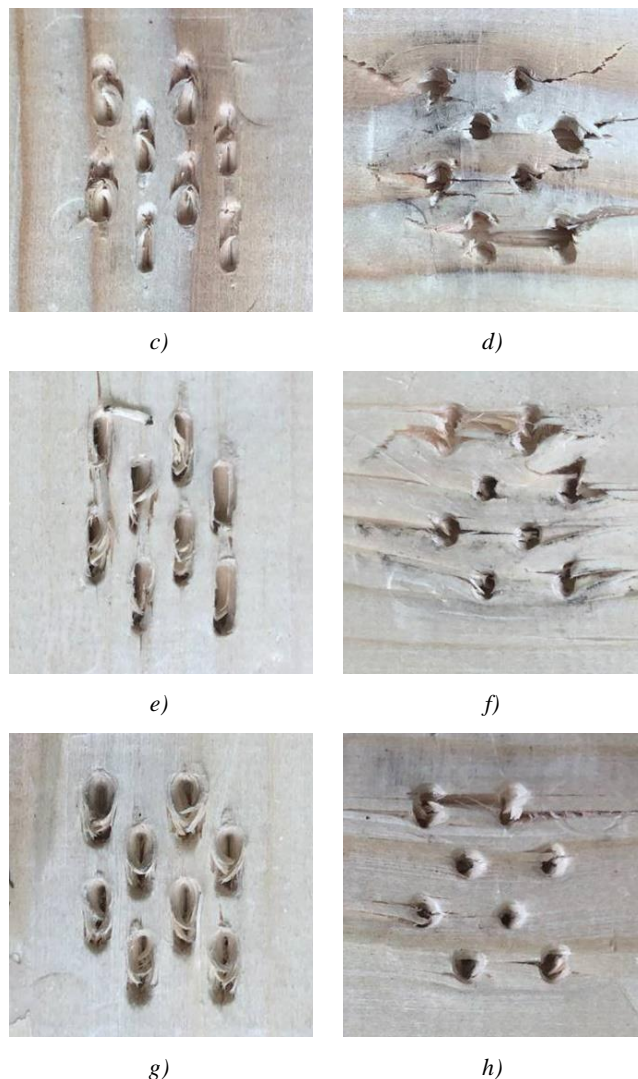
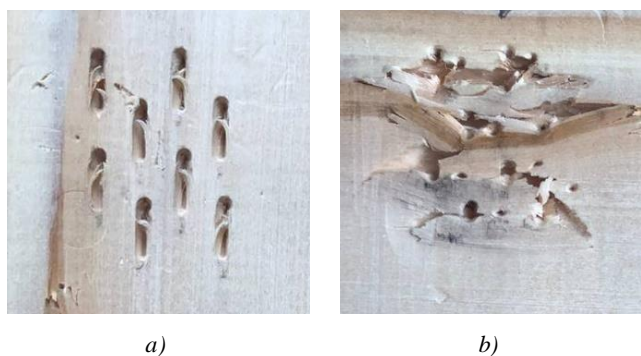


Рис. 9. Следы на поверхности образцов из древесины сосны стальных ошипованных контактных элементов после сдвига на 10 мм: *a, b* — шипы *d2xh3* вдоль и поперек волокон; *c, d* — шипы *d3xh3* вдоль и поперек волокон; *e, f* — шипы *d3xh6* вдоль и поперек волокон; *g, h* — шипы *d4xh6* вдоль и поперек волокон

При перемещении шипов вдоль волокон остается след в виде продольной канавки — полосы (рис. 9, *a, c, e, g*); при перемещении шипов поперек волокон происходит разрыв волокон и локальная деформация с разрушением древесины (рис. 9, *b, d, f, h*).

При обсуждении результатов испытаний принят термин «удельная несущая способность шипа», характеризующий отношение несущей способности шипа P_1 к площади поверхности осевого сечения шипа A (рис. 10):

$$P_1^{уд.} = \frac{P_1}{A}$$

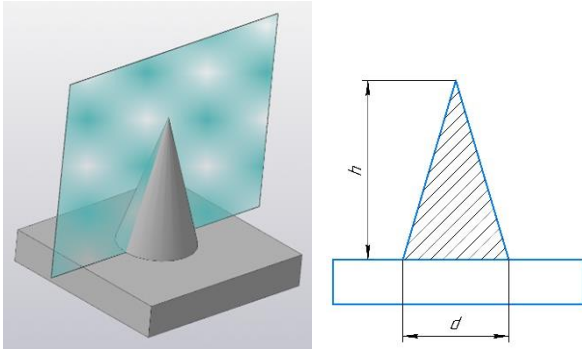


Рис. 10. Осевое сечение шипа (d — диаметр шипа в основании; h — высота шипа)

Отмечено, что шипы с меньшими конусностью и размерами осевого сечения оказывают более высокое сопротивление нагрузке при сдвиге (рис. 11), такие шипы оставляют меньший след на контактной поверхности древесины. Так, удельная несущая способность шипа с площадью проекции осевого сечения 3 мм^2 ($d2xh3$) при взаимодействии с древесиной лиственницы поперек волокон составляет $119,79 \text{ Н/мм}^2$, а при увеличении площади до 12 мм^2 ($d4xh6$) уменьшается до $51,14 \text{ Н/мм}^2$ (табл. 2).

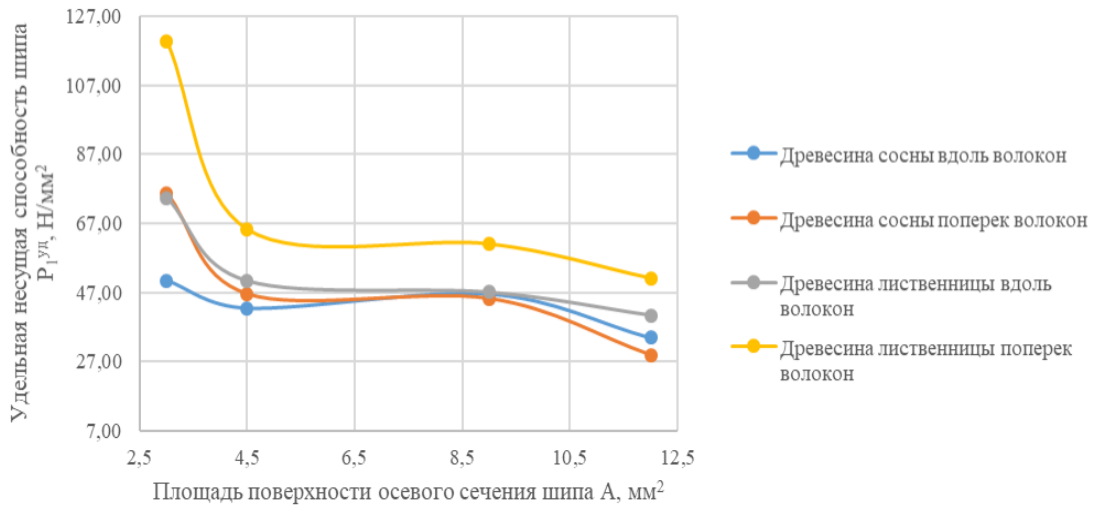


Рис. 11. Удельная несущая способность шипа

Таблица 2. Прочностные характеристики древесины при взаимодействии с ошпиганными контактными элементами из стали 45

Материал образца	Направление приложения нагрузки	Предел прочности образцов при сжатии вдоль волокон, МПа	Условный предел прочности образцов при сжатии поперек волокон, МПа	Модуль упругости E, МПа	Площадь проекции осевого сечения шипа A, мм ²	Максимальная нагрузка при сдвиге, Н	Удельная несущая способность P _{1^y} шипа, Н/мм ²
Древесина сосны	Вдоль волокон	38,7	—	12 360	3	2 420,00	50,42
					4,5	3 059,50	42,49
					9	6 694,30	46,49
					12	6 522,50	33,97
	Поперек волокон	—	3,3	375	3	3 632,00	75,67
					4,5	3 348,90	46,51
					9	6 509,40	45,20
					12	5 554,90	28,93
Древесина лиственницы	Вдоль волокон	43,1	—	9 930	3	3 570,00	74,38
					4,5	3 622,70	50,32
					9	6 774,00	47,04
					12	7 759,40	40,41
	Поперек волокон	—	4,9	230	3	5 750,00	119,79
					4,5	4 692,50	65,17
					9	8 784,30	61,00
					12	9 818,90	51,14

Как следует из табл. 2, удельная несущая способность шипа $d2xh3$ при перемещении изделий из древесины вдоль волокон в 1,3...1,6 раза меньше, чем поперек волокон, что необходимо учитывать при проектировании ГЗУ с ошипованными КЭ.

Заключение

1. Применение ошипованных КЭ при перемещении изделий из древесины увеличивает удерживающую и несущую способность ГЗУ без повреждения древесины в месте контакта.

2. Шипы с меньшими геометрическими размерами обладают большей удельной несущей способностью, оставляют меньший след на контактной поверхности древесины.

3. КЭ с шипами из стали 45 обеспечивают надежное перемещение груза с оставлением допустимых следов на контактной поверхности древесины.

4. КЭ с шипами из фотополимерных материалов при рабочих нагрузках разрушаются и не обеспечивают надежного перемещения деревянных конструкций.

5. При динамично развивающемся уровне применения конструкций из древесины, деревянного домостроения вопросы грузотранспортных технологических операций перемещения изделий из древесины и дерево-композитных материалов без повреждения контактной поверхности древесины в месте контакта с КЭ приобретают большую актуальность.

6. Недостаточный практический опыт применения ГЗУ с ошипованными контактными элементами вызывает необходимость продолжения целенаправленных исследований и разработки новых технических и технологических решений по совершенствованию конструкций ГЗУ.

Литература

1. Шишло С.В. Формирование эффективно функционирующих логистических систем на лесопромышленных предприятиях // Труды БГТУ. № 7. Экономика и управление. 2010. № 7. С. 244-249.
2. Кравченко П.П., Бурцев Д.С. Цифровые технологии в лесной промышленности: перспективы и барьеры // Вопросы инновационной экономики. 2022. Т. 12, № 2. С. 1029-1050.
3. Вайнсон А.А., Андреев А.Ф. Крановые грузозахватные устройства: справ. М.: Машиностроение, 1982. 304 с.
4. Ашкенази Е.К., Ганов Э.В. Анизотропия конструкционных материалов. Л.: Машиностроение, 1980. 247 с.
5. Бабкин А.И., Мелехов В.И., Руденко А.В., Морозов А.С. Фрикционное грузозахватное устройство: пат. на полезную модель № RU174604 U1 / № 2017107622; заявл. 07.03.2017; опубл. 23.10.2017. Бюл. № 30.
6. Мелехов В.И., Бабкин А.И. Грузозахватное устройство для перемещения деревянных конструкций: пат. № RU2659669 C1 / № 2017133224; заявл. 25.09.2017; опубл. 03.07.2018. Бюл. № 19.
7. Бабкин А.И., Дужевский И.А. Грузозахватные устройства с шипованными контактными элементами для перемещения деревянных конструкций // Актуальные вопросы инновационного развития Арктического региона РФ: сб. материалов Всерос. науч.-практической конф. (Северодвинск, 18-30 нояб. 2019 г.). Архангельск, 2020. С. 10-14.
8. Palinkaš Ivan, Desnica Eleonora, Pekez Jasmina, Rajic Aleksandar, Rackov Milan. 3D Printing Technology: Materials, Application and Current Trends in Process Improvement. In book: 32nd International Conference on Organization and Technology of Maintenance (OTO 2023). P. 259-268.
9. Snyder T.J., Andrews M., Weislogel M., Moeck P., Stone-Sundberg J., Birkes D., Hoffert M.P., Lindeman A., Morrill J., Fercak O. 3D Systems' Technology Overview and New Applications in Manufacturing, Engineering, Science, and Education. 3D Print. Addit. Manuf. 2014. № 1. P. 169-176.
10. Waleed Ahmed, Essam Zaneldin. The Innovation of Using 3D Printing Technology in Mechanical and Manufacturing Engineering. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2020. 938. P. 012002.
11. Elvis Hozdi c. Characterization and Comparative Analysis of Mechanical Parameters of FDM - and SLA-Printed ABS Materials. Appl. Sci. 2024. 14. P. 649.
12. Tiba Raed Mhmood, Nazar Kais Al-Karkhi. A Review of the Stereo lithography 3D Printing Process and the Effect of Parameters on Quality // Al-Khwarizmi Engineering Journal. 2023. V. 19, № 2. P. 82-94.
13. ГОСТ 1050-2013. Металлопродукция из нелегированных конструкционных качественных и специальных сталей. Общие технические условия. Введ. 01.01.2015. М.: Стандартинформ, 2014. 32 с.
14. ГОСТ 16483.0-89. Древесина. Требования к физико-механическим испытаниям. Введ. 01.07.1990. М.: ИПК Изд-во стандартов, 1999. 11 с.
15. ГОСТ 16483.10-73. Древесина. Методы определения предела прочности при сжатии вдоль волокон. Введ. 01.07.1974. М.: ИПК Изд-во стандартов, 1999. 7 с.
16. ГОСТ 16483.11-72. Древесина. Метод определения условного предела прочности при сжатии поперек волокон. Введ. 01.01.1973. М.: ИПК Изд-во стандартов, 1999. 6 с.
17. ГОСТ 16483.24-73. Древесина. Метод определения модуля упругости при сжатии вдоль волокон. Введ. 01.01.1975. М.: ИПК Изд-во стандартов, 1999. 4 с.
18. ГОСТ 16483.25-73. Древесина. Метод определения модуля упругости при сжатии поперек волокон. Введ. 01.01.1975. М.: ИПК Изд-во стандартов, 1999. 6 с.
19. Lyashenko I.A., Pham T.H., Popov V.L. Transition between Friction Modes in Adhesive Contacts of a Hard Indenter and a Soft Elastomer: An Experiment. Lubricants. 2024. 12. P. 110.
20. Doyle J., Walker J.C.F. Indentation hardness of wood. Wood and Fiber Science. 1985. № 17 (3). P. 369-376.
21. Marko Petrič, Jaka Levanič, Dabosmita Paul. Investigations of surface-treated wood by a micro-indentation approach: a short review and a case study. Bulletin of the Transilvania University of Brasov Series II: Forestry Wood Industry Agricultural Food Engineering. 2023. V. 16 (65). P. 177-190.
22. Kunwei Li. Brief Introduction to Properties of Wood and Application of Wood in Architectural Structures. Highlights in Science, Engineering and Technology. 2022. V. 28. P. 415-421.
23. Караваева М.С., Шлычков С.В. Экспериментальное определение физико-механических свойств древесины // Науч. прогрессу - творчество молодых. 2022. № 1. С. 71-73.
24. Доровских Н.Я., Кравцов С.Р., Полетаев П.А. Определение механических характеристик дерева при растяжении и сжатии вдоль волокон // Наука. Промышленность. Оборона: тр. XIX Всерос. науч.-технической конф. В 4-х т. (18-20 апр. 2018 г.). Новосибирск: Новосиб. гос. технический ун-т, 2018. Т. I. С. 36-39.

25. Головин Ю.И., Головин Д.Ю., Самодуров А.А. Корреляции механических и теплофизических характеристик древесины сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) // Изв. РАН. Серия физическая. 2021. Т. 85, № 7. С. 942-947.

References

- Shishlo S.V. Formation of effectively functioning logistics systems at timber enterprises // Trudy BGTU. № 7. Ekonomika i upravlenie. 2010. № 7. P. 244-249.
- Kravchenko P.P., Burcev D.S. Digital technologies in the forestry industry: prospects and barriers // Voprosy innovacionnoj ekonomiki. 2022. V. 12, № 2. P. 1029-1050.
- Vajnsjon A.A., Andreev A.F. Crane lifting devices: sprav. M.: Mashinostroenie, 1982. 304 p.
- Ashkenazi E.K., Ganov E.V. Anisotropy of structural materials. L.: Mashinostroenie, 1980. 247 p.
- Babkin A.I., Melekhov V.I., Rudenko A.V., Morozov A.S. Friction gripping device: pat. na poleznuyu model' № RU174604 U1 / № 2017107622; zayavl. 07.03.2017; opubl. 23.10.2017. Byul. № 30.
- Melekhov V.I., Babkin A.I. Load-lifting device for moving wooden structures: pat. № RU2659669 C1 / № 2017133224; zayavl. 25.09.2017; opubl. 03.07.2018. Byul. № 19.
- Babkin A.I., Duzhevskij I.A. Load-grabbing devices with studded contact elements for the displacement of wooden structures // Aktual'nye voprosy innovacionnogo razvitiya Arkticheskogo regiona RF: sb. materialov Vseros. nauch.-prakticheskoy konf. (Severodvinsk, 18-30 noyab. 2019 g.). Arhangel'sk, 2020. P. 10-14.
- Palinkaš Ivan, Desnica Eleonora, Pekez Jasmina, Rajic Aleksandar, Rackov Milan. 3D Printing Technology: Materials, Application and Current Trends in Process Improvement. In book: 32nd International Conference on Organization and Technology of Maintenance (OTO 2023). P. 259-268.
- Snyder T.J., Andrews M., Weislogel M., Moeck P., Stone-Sundberg J., Birkes D., Hoffert M.P., Lindeman A., Morrill J., Fercak O. 3D Systems' Technology Overview and New Applications in Manufacturing, Engineering, Science, and Education. 3D Print. Addit. Manuf. 2014. № 1. P. 169-176.
- Waleed Ahmed, Essam Zaneldin. The Innovation of Using 3D Printing Technology in Mechanical and Manufacturing Engineering. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2020. 938. P. 012002.
- Elvis Hozdić. Characterization and Comparative Analysis of Mechanical Parameters of FDM - and SLA-Printed ABS Materials. Appl. Sci. 2024. 14. P. 649.
- Tiba Raed Mhmoed, Nazar Kais Al-Karkhi. A Review of the Stereo lithography 3D Printing Process and the Effect of Parameters on Quality // Al-Khwarizmi Engineering Journal. 2023. V. 19, № 2. P. 82-94.
- GOST 1050-2013. Metal products made of non-alloy structural high-quality and special steels. General technical conditions. Vved. 01.01.2015. M.: Standartinform, 2014. 32 p.
- GOST 16483.0-89. Wood. Requirements for physical and mechanical tests. Vved. 01.07.1990. M.: IPK Izd-vo standartov, 1999. 11 p.
- GOST 16483.10-73. Wood. Methods for determining the compressive strength along the fibers. Vved. 01.07.1974. M.: IPK Izd-vo standartov, 1999. 7 p.
- GOST 16483.11-72. Wood. A method for determining the conditional compressive strength across fibers. Vved. 01.01.1973. M.: IPK Izd-vo standartov, 1999. 6 p.
- GOST 16483.24-73. Wood. A method for determining the modulus of elasticity in compression along the fibers. Vved. 01.01.1975. M.: IPK Izd-vo standartov, 1999. 4 p.
- GOST 16483.25-73. Wood. A method for determining the modulus of elasticity in compression across fibers. Vved. 01.01.1975. M.: IPK Izd-vo standartov, 1999. 6 p.
- Lyashenko I.A., Pham T.H., Popov V.L. Transition between Friction Modes in Adhesive Contacts of a Hard Indenter and a Soft Elastomer: An Experiment. Lubricants. 2024. 12. P. 110.
- Doyle J., Walker J.C.F. Indentation hardness of wood. Wood and Fiber Science. 1985. № 17 (3). P. 369-376.
- Marko Petrič, Jaka Levanič, Dabosmita Paul. Investigations of surface-treated wood by a micro-indentation approach: a short review and a case study. Bulletin of the Transilvania University of Brasov Series II: Forestry Wood Industry Agricultural Food Engineering. 2023. V. 16 (65). P. 177-190.
- Kunwei Li. Brief Introduction to Properties of Wood and Application of Wood in Architectural Structures. Highlights in Science, Engineering and Technology. 2022. V. 28. P. 415-421.
- Karavaeva M.S., Shlychkov S.V. Experimental determination of the physico-mechanical properties of wood // Nauch. progressu - tvorchestvo molodyh. 2022. № 1. P. 71-73.
- Dorovskih N.Ya., Kravcov S.R., Poletaev P.A. Determination of the mechanical characteristics of wood under tension and compression along the fibers // Nauka. Promyshlennost'. Oborona: tr. XIX Vseros. nauch.-tekhnicheskoy konf. V 4-h t. (18-20 apr. 2018 g.). Novosibirsk: Novosib. gos. tekhnicheskij unt, 2018. V. I. P. 36-39.
- Golovin Yu.I., Golovin D.Yu., Samodurov A.A. Correlations of mechanical and thermophysical characteristics of scots pine wood (*Pinus sylvestris* L.) // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2021. V. 85, № 7. P. 942-947.