Электронный архив УГЛТУ

На правах рукописи

ДУЖЕВСКИЙ

Игорь Александрович

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ГРУЗОЗАХВАТНЫХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ДРЕВЕСИНЫ

Специальность 4.3.4 – Технологии, машины и оборудование для лесного хозяйства и переработки древесины

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Екатеринбург 2025

Электронный архив УГЛТУ

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова»

Научный руководитель: **Мелехов Владимир Иванович**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Пилюшина Галина Анатольевна**
доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет», кафедра триботехнического материаловедения и технологии материалов, доцент

Яцун Ирина Валерьевна
доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», кафедра механической обработки древесины, профессор

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»

Защита диссертации состоится **03 июля 2025 года в 13.00 часов** на заседании диссертационного совета 24.2.424.01, созданного на базе ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», 620100, г. Екатеринбург, Сибирский тракт, 37, зал заседаний Ученого совета – аудитория 401.

С диссертацией можно ознакомится в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет» http://www.usfeu.ru.

Автореферат разослан «___»_____2025г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук, профессор Шишкина Елена Евгеньевна

Электронный архив УГЛТУ

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Древесина как материал, в отличие от однородных твердых материалов, обладает рядом особенностей: неоднородным строением, пластичностью, податливостью, деформативностью, меньшей прочностью, выраженной текстурной поверхностью и требует особого щадящего отношения при перемещении и транспортировке.

Деревянные конструкции изготавливают в виде объемных изделий, плит, панелей, щитов и пр.

В технологических процессах изготовления, транспортировки и монтажа крупногабаритных изделий из массивной и клееной древесины, клееных деревянных конструкций (КДК), панелей и др. предусмотрены транспортно-логистические операции, которые выполняются с помощью грузоподъемных механизмов и внутризаводского транспорта.

При перемещении изделий из древесины преимущественно производят обвязку груза мягкими стропами, после чего навешивают на крюк грузоподъемного средства и адресно перемещают, что сопряжено с усложнением операции, вероятным повреждением кромок груза и ограниченной возможностью поштучного перемещения груза.

Перемещение изделий из древесины с помощью универсальных грузозахватных устройств (ГЗУ) не позволяет полностью учесть особенностей строения древесины (анизотропия, реологические свойства, податливость, неоднородность), в результате применяют большие усилия зажатия изделия, что приводит к повреждению поверхности древесины и снижает надежность удерживания из-за ослабевания усилия предварительного зажатия на контактной поверхности, что объясняется её податливостью.

Основная область применения универсальных ГЗУ ограничивается перемещением изделий, имеющих достаточно высокую прочность контактной поверхности, которой древесина не обладает.

Для перемещения изделий из древесины применяют фрикционно-зажимные ГЗУ: винтовые, эксцентриковые, клещевые, клиновые и др. Все они имеют ограничения по применению и не обеспечивают сохранности поверхности перемещаемых изделий из древесины.

Эксцентриковые захваты для перемещения изделий из древесины практически не применяют в связи с ограниченной поверхностью контакта зажимного элемента с поверхностью изделия из древесины.

Применяются клещевые захваты, существенным недостатком которых является недостаточная надежность и вероятность самопроизвольного освобождения захвата и выпадение груза при встрече на пути препятствия.

Применение стандартных технических решений ГЗУ, предназначенных для перемещения изделий с высокой контактной прочностью поверхности (металлы, железобетон и т.п.) может привести к повреждению изделий из древесины и не обеспечить требуемого уровня надежности и безопасности при транспортировке изделий из древесины.

Тенденция роста потребления древесины, возрастающий спрос и увеличение объемов производства деревоклееных конструкций, деревянного домостроения, новых дерево-композитных материалов, панелей, древесно-стружечных плит с облицованной поверхностью, фанеры и пр. ведет к интенсификации производственных процессов на промышленных предприятиях и вызывает

Электронный архив УГЛТУ

необходимость разработки и создания новых технических и технологических решений для выполнения грузотранспортных операций перемещения с сохранением качества кромок и лицевой поверхности перемещаемого объекта – изделия из древесины.

Одним из направлений обеспечения надежного и качественного взаимодействия контактных элементов (КЭ) ГЗУ с поверхностью конструкций из древесины при перемещении может быть применение ГЗУ с ошипованными КЭ. При взаимодействии ошипованных КЭ с поверхностью перемещаемого груза происходит механическое внедрение шипов в древесину, при этом удерживание груза переходит традиционную границу триботехнических представлений. Такие ГЗУ обеспечивают высокую надежность при перемещении объекта, но оставляют следы контактного взаимодействия на поверхности – проколы, что ограничивает их применение.

Задача повышения надежности перемещения без видимых следов контактного взаимодействия на поверхности древесины является актуальной и может быть решена разработкой и созданием конструкций фрикционно-зажимных ГЗУ с самозажимными упругоподатливыми КЭ с улучшенными триботехническими характеристиками.

Степень разработанности темы исследования. Разработкой и проектированием крановых ГЗУ занимались такие ученые, как А.А. Вайнсон, А.Ф. Андреев, Ю.Т. Козлов, А.М. Обермейстер, Л.П. Протасов, Е.В. Смирнов, Я.Е. Альтшулер и др. Исследованиями фрикционно-зажимных ГЗУ для подъема и перемещения крупногабаритных конструкций занимались А.В. Руденко, А.С. Морозов, А.И. Бабкин, В.И. Мелехов.

Объект исследования – конструкция ГЗУ с самозажимными контактными элементами для перемещения КДК и изделий из древесины.

Предмет исследования – контактные элементы ГЗУ с улучшенными триботехническими характеристиками, обеспечивающие надежное перемещение изделий из древесины, с учетом реологических и анизотропных свойств древесины, без нарушения контактной прочности поверхности древесины на локальных участках взаимодействия.

Область исследования соответствует паспорту научной специальности ВАК РФ 4.3.4. «Технологии, машины и оборудование для лесного хозяйства и переработки древесины»:

п. 4. Технология и продукция в производствах: лесохозяйственном, лесозаготовительном, лесопильном, деревообрабатывающем, целлюлознобумажном, лесохимическом и сопутствующих им производствах;

п. 7. Технологические комплексы, производственные процессы, поточные и автоматические линии, машины и агрегаты в лесном хозяйстве и лесной промышленности;

п. 10. Эргономика, надежность, безопасность машин и технологического оборудования в лесном хозяйстве и лесной промышленности.

Цель работы – совершенствование конструкции фрикционно-зажимных ГЗУ для перемещения изделий из древесины, оснащенных КЭ с улучшенными триботехническими характеристиками, с учетом строения и анизотропных свойств древесины, выполненными с применением субтрактивных и аддитивных технологий.

Задачи исследования:

1. Провести аналитический обзор проведенных ранее исследований контактного взаимодействия древесины с ошипованными и упругоподатливыми КЭ

Электронный архив УГЛТУ

ГЗУ и оценить возможность применения субтрактивных и аддитивных технологий для изготовления физических моделей ГЗУ и КЭ.

2. Разработать уточненную математическую модель контактного взаимодействия древесины с ошипованными КЭ ГЗУ.

3. Разработать математическую модель контактного взаимодействия с древесиной самозажимных ГЗУ, оснащенных упругоподатливыми КЭ.

4. Создать методику проведения экспериментальных исследований определения коэффициента сцепления ошипованных КЭ и коэффициента трения упругоподатливых КЭ с лицевой поверхностью изделий из древесины с учетом анизотропных и реологических свойств древесины.

5. Создать экспериментальную установку и подготовить натурные образцы КЭ ГЗУ с различным исполнением контактной поверхности.

6. Предложить новые технические решения фрикционно-зажимных ГЗУ с улучшенными триботехническими характеристиками КЭ для перемещения КДК и изделий из древесины.

Научная новизна результатов исследований:

1. Впервые определены граничные условия несущей способности ошипованных КЭ ГЗУ из металлических и полимерных материалов при перемещении изделий из древесины.

2. Создана математическая модель определения величины коэффициента трения упругоподатливых силиконовых КЭ самозажимных ГЗУ при взаимодействии с поверхностью древесины.

3. Впервые установлены зависимости величины коэффициента трения упругоподатливых КЭ ГЗУ на основе силиконовой резины с поверхностью древесины с учетом величины контактного давления и особенностей строения древесины.

На защиту выносятся:

1. Результаты экспериментальных исследований взаимодействия ошипованных КЭ ГЗУ с древесиной.

2. Математическая модель и методика определения величины коэффициента трения КЭ ГЗУ из упругоподатливого материала на основе силиконовой резины с поверхностью древесины.

3. Результаты экспериментальных исследований взаимодействия КЭ ГЗУ из упругоподатливого материала на основе силиконовой резины с изделиями из древесины в условиях переменной нагрузки с учетом реологических и анизотропных свойств древесины.

Теоретическая и практическая значимость:

1. Предложены новые конструкции самозажимных ГЗУ с ошипованными КЭ, позволяющие качественно и надежно перемещать изделия из древесины.

2. Разработана инженерная методика определения величины коэффициента трения при взаимодействии древесины с самозажимными ГЗУ, оснащенными КЭ из упругоподатливого материала на основе силиконовой резины.

3. Предложены новые конструкции самозажимных ГЗУ с КЭ из упругоподатливого материала с улучшенными триботехническими характеристиками для перемещения изделий из древесины при выполнении логистических операций.

Методология и методы исследования. Применены методы математического моделирования, натурного эксперимента, планирования экспериментальных исследований, теории вероятностей и математической статистики, с применением

Электронный архив УГЛТУ

вычислительных программных комплексов и современного инструментального сопровождения.

Достоверность результатов исследований обеспечивается применением апробированных методик, современным инструментальным сопровождением, согласованностью и приемлемой сходимостью результатов теоретических и экспериментальных исследований с выводами работ других авторов.

Личный вклад автора состоит в проведении аналитического обзора состояния вопроса по теме исследований, постановке цели и задач исследования, разработке математических моделей взаимодействия ошипованных и упругоподатливых КЭ ГЗУ с древесиной, методики проведения исследований, создании экспериментальных установок, проведения опытов, получении, обработке и анализе результатов исследований, формулировании выводов и рекомендаций, подготовке статей по теме исследований, разработке и патентовании технических решений, создании 3D и физических моделей ГЗУ с применением аддитивных технологий на основе разработанных технических решений.

Реализация результатов работы. Предложенные новые технические решения конструкции ГЗУ рекомендованы **для практического использования в АО «ЦС «Звездочка»**, применены в учебном процессе Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова.

Апробация работы. Основные результаты исследований представлены на международной научно-практической конференции «Современные технологии в машиностроении» (г. Пенза, 2019 г.), ежегодных Всероссийских научно-практических конференциях «Актуальные вопросы инновационного развития Арктического региона РФ» (г. Северодвинск, 2020-2023 гг.).

Публикации. По результатам исследований опубликовано 12 работ, в том числе 2 в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ, получено 2 патента РФ на изобретение.

Структура и объем диссертации. Диссертация представлена на 143 страницах текста, состоит из введения, 5 глав, общих выводов и рекомендаций, списка определений, обозначений и сокращений, библиографического списка из 121 наименования, 2 приложений; содержит 77 рисунков, 21 таблицу.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** отражена актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель, задачи и научная новизна, отмечена практическая значимость и реализация результатов научных исследований, определены основные научные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** приведен аналитический обзор работ по теме исследования. Древесина применяется во многих отраслях промышленности и повседневной жизни: строительстве, производстве мебели, деревообрабатывающем производстве, создание интерьеров, производстве бумаги и картона, в качестве экологичного топлива, при производстве игрушек, спортивного инвентаря, при создании произведений искусства и т.п.

Технологические процессы деревообработки предусматривают операции перемещения заготовок и изделий из древесины и транспортно-логистические операции.

В общепринятой практике перемещение КДК и изделий из древесины осуществляют с помощью грузоподъемных кранов общего назначения, оснащенных

Электронный архив УГЛТУ

универсальным ГЗУ – крюком, закрепленным в крюковой подвеске. В результате проведенного анализа применяемой технологической оснастки для перемещения изделий из древесины установлено, что стандартные ГЗУ не обеспечивают качественного перемещения изделий (рис. 1).

а) *б)* *в)* *г)* *д)* *е)* *ж)*

Рисунок 1 – Дефекты на поверхности изделий из древесины вследствие некачественной транспортировки:
а – потертости; *б* – царапина, *в, г* – вмятины; *д, е* – трещины; *ж* – повреждение кромки.

Сделан вывод о том, что для выполнения транспортно-логистических операций в технологическом процессе производства изделий из древесины необходимо применять специальные ГЗУ с учётом особенностей строения древесины, ее реологических и анизотропных свойств в соответствии с требованиями правил безопасности при выполнении работ. В настоящее время адаптированные технические решения ГЗУ для надежного и качественного перемещения КДК и изделий из древесины практически отсутствуют.

Одним из направлений обеспечения надежного и качественного взаимодействия КЭ с поверхностью конструкций из древесины при перемещении может быть применение ГЗУ с ошипованными КЭ. При взаимодействии ошипованных КЭ с поверхностью перемещаемого груза происходит механическое внедрение шипов в древесину, при этом удерживание груза переходит границу триботехнических представлений о контактном взаимодействии. Такие ГЗУ обеспечивают высокую надежность при перемещении, но оставляют следы взаимодействия на контактной поверхности древесины, поэтому применение ГЗУ с ошипованными КЭ ограничено определенными требованиями к сохранности лицевой контактной поверхности изделий. Другим направлением, обеспечивающим высокую надежность перемещения при отсутствии видимых следов взаимодействия на контактной поверхности изделий из древесины, может быть усовершенствование конструкции ГЗУ с самозажимными упругоподатливыми КЭ и улучшенными триботехническими характеристиками.

Совершенствование конструкции фрикционно-зажимных ГЗУ для надежного и качественного перемещения изделий из древесины с учетом строения и анизотропных свойств древесины, оснащенных КЭ с улучшенными триботехническими характеристиками при выполнении транспортно-логистических операций, является актуальной задачей, требует проведения исследований и создания новых технических решений ГЗУ.

Определены цель и задачи исследования.

Во второй главе рассмотрено контактное взаимодействие ошипованных и упругоподатливых КЭ с древесиной.

Электронный архив УГЛТУ

Принято считать внешним трением явление сопротивления относительному перемещению, возникающее между двумя телами в зонах соприкосновения их поверхностей по касательным к ним (Крагельский И.В.). При этом принимают, что пластическая деформация возникает только на вершинах микронеровностей контактной поверхности, остальные деформации – упругие. При внедрении шипов в древесину возникает пластическая деформация в материале – древесине, а сопротивление относительному перемещению ошипованного элемента направлено нормально боковой поверхности шипов. При взаимодействии ошипованных КЭ с массивной древесиной корректно применен термин «усилие взаимодействия», используемый при исследовании трения контактных элементов с насечкой при взаимодействии с жестким предметом – грузом.

Рассмотрен элементарный ошипованный КЭ, представляющий собой пластину с жестко закрепленными шипами, расположенными в шахматном порядке и ориентированными нормально поверхности изделия из древесины (рис. 2).

Направление усилия сдвига – параллельно поверхности древесины. Принимаем конструкцию КЭ абсолютно жесткой, деформацию стальных элементов можно не учитывать, древесина – транстропный сплошной однородный упруго-пластичный податливый материал.

При приложении сдвигающей нагрузки F (рис. 2, *в*) сопротивление относительному перемещению включает усилие взаимодействия древесины с шипами КЭ и силу трения на контактной поверхности древесины с рабочей поверхностью КЭ:

$$F = F_{\text{вз}} + F_{\text{тр}} \qquad (1)$$

Силу трения $F_{\text{тр}}$ и величину угла $\alpha_к$ при вершине конуса не учитывали.

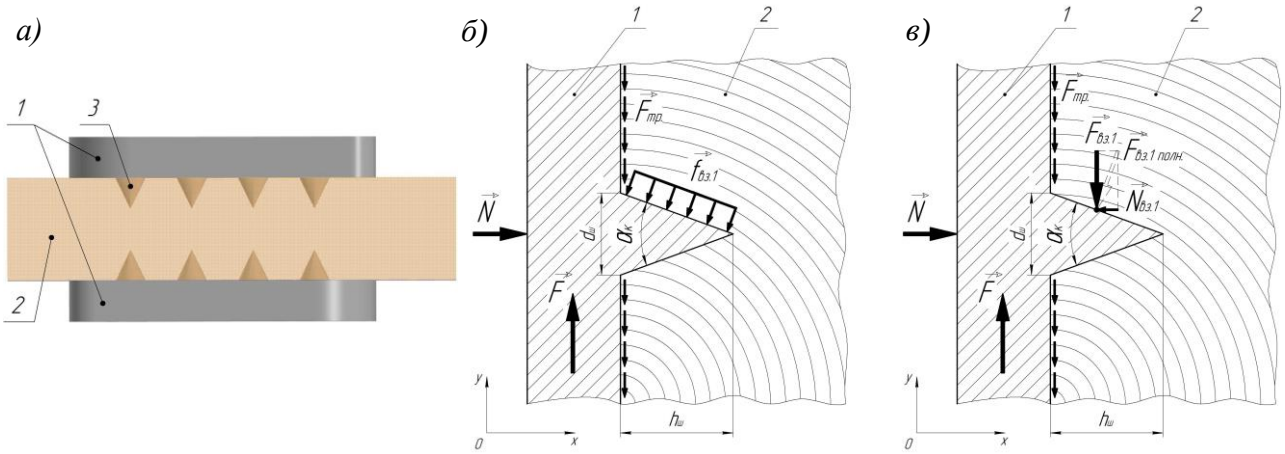

Рисунок 2 – Внедрение ошипованных КЭ в массив древесины:
а – *3D*-модель; *б* – расчетная схема с распределенным по рабочей поверхности шипа усилием взаимодействия; *в* – расчетная схема с приведенным к точке усилием взаимодействия; *1* – ошипованный КЭ; *2* – образец древесины; *3* – шип

Математическая модель взаимодействия ошипованных КЭ с древесиной:

$$Q_{\text{гр}} \le z \cdot \frac{h_{\text{ш}} \cdot d_{\text{ш}}}{k_{\text{з}}} \cdot R_{\text{см}} = \frac{2P_{\text{кэ}}}{k_{\text{з}}} \qquad (2)$$

где $P_{\text{кэ}} = \frac{z \cdot h_{\text{ш}} \cdot d_{\text{ш}}}{2} \cdot R_{\text{см}}$ – несущая способность КЭ; z – количество шипов на одном КЭ; $h_{\text{ш}}$ – высота шипа; $d_{\text{ш}}$ – диаметр шипа в основании; $R_{\text{см}}$ – расчетное сопротивление древесины на смятие в направлении усилия сдвига; $k_{\text{з}}$ – коэффициент запаса по грузоподъемности, учитывающий неоднородность контактной поверхности древесины (сучки, свилеватость, крень и т.п.), неравномерность внедрения шипов в поверхность древесины, возникающие при работе динамические усилия и др. неблагоприятные факторы; $k_{\text{з}} = 1{,}5 \ldots 2{,}0$.

Электронный архив УГЛТУ

Таким образом, надежность удерживания ошипованными КЭ деревянных конструкций определяется механическими свойствами древесины и величиной заглубления шипов, не зависит от усилия прижатия КЭ к поверхности перемещаемой конструкции, что выгодно отличает их от КЭ фрикционно-зажимных ГЗУ с клиновыми КЭ из упругоподатливого материала. Следует отметить, что ошипованные КЭ после взаимодействия оставляют допустимые следы на поверхности деревянной конструкции с учетом нормативных требований при сохранении механической прочности материала конструкции.

Рассмотрено взаимодействие упругоподатливых КЭ фрикционно-зажимных ГЗУ с древесиной и приведена математическая модель, разработанная на основе теории И.В. Крагельского.

Основными элементами, определяющими функциональность и надежность фрикционно-зажимных ГЗУ являются КЭ с покрытием рабочей поверхности из упругоподатливого материала. Такие КЭ обеспечивают постоянство коэффициента трения при изменении усилия прижатия к поверхности груза и не оставляют видимых следов взаимодействия на лицевой поверхности перемещаемых изделий из массивной и клееной древесины.

Рассмотрены вопросы трения покоя и скольжения при работе фрикционно-зажимных ГЗУ. Установлены факторы, влияющие на величину коэффициента трения.

Площадь фактического контакта взаимодействующих поверхностей может быть от 0,0001 до 0,1 номинальной площади касания, что определяется волнистостью и шероховатостью поверхностей, физико-механическими свойствами поверхностного слоя и контактной нагрузкой. При высоких нагрузках площадь фактического контакта не превышает 40% номинальной площади. При контактировании двух деталей из различных материалов площадь фактического контакта определяется физико-механическими свойствами более мягкого материала – упругоподатливого покрытия КЭ, и рельефом поверхностного слоя более твердого материала – в данном случае древесины.

Рассмотрено контактное взаимодействие клинового КЭ с покрытием из упругоподатливого материала фрикционно-зажимного ГЗУ с древесиной (рис. 3, *а*), позволяющее автоматически регулировать требуемое усилие зажатия перемещаемого груза между подвижными КЭ.

При подъеме изделия из древесины 4 под действием веса Q клиновые КЭ увлекаются вниз и прижимаются к поверхности груза, возникает усилие распора (нормальная сила) N_1, создающее силу трения.

Из условия равновесия плоской системы сил:

$$N_1 \geq \frac{Q}{2 \cdot f_1} \qquad (3)$$

где f_1 – коэффициент трения пары «упругоподатливый КЭ – поверхность древесины».

При условии, когда величина силы распора N_1 окажется недостаточной для обеспечения удерживания груза силами трения, груз начнет перемещаться вертикально вниз, вовлекая в движение клиновый КЭ дополнительно появляющейся силой P_B (рис. 3, *б*), равной:

$$P_B = \frac{Q}{2} - F_1 \qquad (4)$$

Движение происходит до момента, пока не произойдет увеличение силы N_1 до величины, обеспечивающей удерживание груза.

Электронный архив УГЛТУ

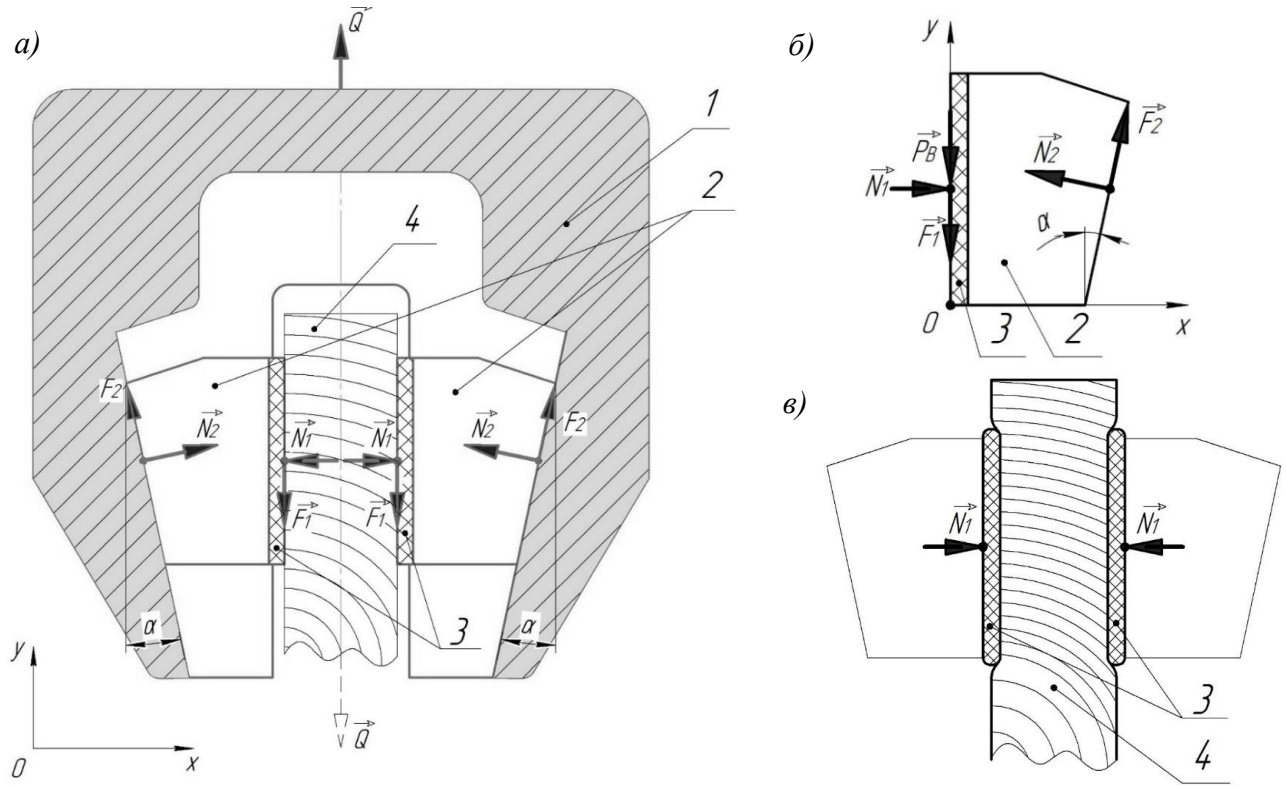

Рисунок 3 – Расчетная схема фрикционно-зажимного ГЗУ с клиновыми КЭ: *а* – общая расчетная схема; *б* – расчетная схема КЭ; *в* – развитие пластических деформаций в массиве образца древесины; 1 – корпус ГЗУ; 2 – основание КЭ; 3 – покрытие КЭ из упругоподатливого материала; 4 – изделие из древесины.

С учетом уравнений равновесия для рассматриваемой плоской системы сил и необходимых преобразований, получим:

$$sin\alpha(f_1 \cdot f_2 + 1) + cos\alpha(f_2 - f_1) = 0 \;\Rightarrow\; tg\alpha = \frac{sin\alpha}{cos\alpha} = \frac{f_1 - f_2}{f_1 \cdot f_2 + 1} \qquad (5)$$

где α – угол наклона опорной поверхности скольжения КЭ по отношению к вертикали; f_2 – коэффициент трения опорной поверхности клинового КЭ по наклонной поверхности (по направляющей корпуса) ГЗУ

Условием гарантированного отсутствия проскальзывания изделия из древесины по рабочей поверхности клинового КЭ будет соблюдение соотношения:

$$tg\alpha \le \frac{f_1 - f_2}{f_1 \cdot f_2 + 1} \qquad (6)$$

Следовательно, условие самозатягивания клинового КЭ выполняется, если величина коэффициента трения на его рабочей поверхности f_1 больше, чем на опорной наклонной поверхности f_2.

При увеличении нагрузки (рис. 3, *в*) в образце древесины развиваются деформации: в начале упругие, а затем пластические. Переход к пластическим деформациям определяется контактной прочностью древесины на смятие, которая ограничена допускаемым контактным давлением:

$$[q] = \frac{R_{см}}{n} \qquad (7)$$

где $R_{см}$ – расчетное сопротивление древесины на смятие в направлении приложения нагрузки; n – коэффициент запаса.

В этом случае, при приложении сдвигающей нагрузки F сила сопротивления сдвигу $F_{тр}$ определяется силой трения $F_{тр.пов}$ на контурной поверхности контакта, по

Электронный архив УГЛТУ

теории дискретного контактирования твердых тел Крагельского И.В., и силой дополнительного сопротивления на кромке $F_{кр}$:

$$F_{тр} = F_{тр.пов} + F_{кр} \quad (8)$$

Таким образом, в случае развития пластических деформаций на контактной поверхности древесины сила сопротивления сдвигу увеличится.

Для гарантированного обеспечения контактной прочности перемещаемых изделий из древесины разных пород с учетом расчетных сопротивлений древесины по СП 64.13330.2017, принято допускаемое значение контактного давления $[q] = 1$ МПа.

Предельная величина нормальной силы N_1 на поверхности контакта КЭ и изделия из древесины из условия обеспечения контактной прочности изделия:

$$N_{1max} = [q] \cdot S \quad (9)$$

где S – площадь контактной поверхности одного КЭ.

Математическая модель взаимодействия упругоподатливых клиновых КЭ фрикционно-зажимных ГЗУ представлена:

$$Q_{гр} \leq 2 \cdot f_1 \cdot [q] \cdot S \quad (10)$$

Таким образом, максимальная грузоподъемность фрикционно-зажимного ГЗУ с клиновыми КЭ при перемещении изделий из древесины ограничена контактным давлением на контактной поверхности $[q]$, зависит от площади контактной поверхности S и коэффициента трения f_1.

Следует отметить, что фрикционно-зажимные ГЗУ с клиновыми КЭ конструктивно автоматически увеличивают прижатие КЭ к поверхности изделий при пластической усадке древесины под нагрузкой и надежно удерживают груз длительное время, при этом видимых следов контактного взаимодействия на поверхности древесины не остается.

В третьей главе для проверки на адекватность математических моделей приведены экспериментальные исследования.

Представлена методика определения сопротивления сдвигу и несущей способности ошипованных КЭ ГЗУ при взаимодействии с древесиной. Задача исследования – установление геометрических параметров шипов.

КЭ выполнены в виде пластин с шипами конической формы из стали 45 четырех типоразмеров: *d2*x*h3, d3*x*h3, d3*x*h6, d4*x*h6* (*d* – диаметр в основании, мм; *h* – высота шипа, мм). Шипы выполнены на металлических пластинах КЭ, размером 30 х 30 мм и расположены в шахматном порядке (рис. 4).

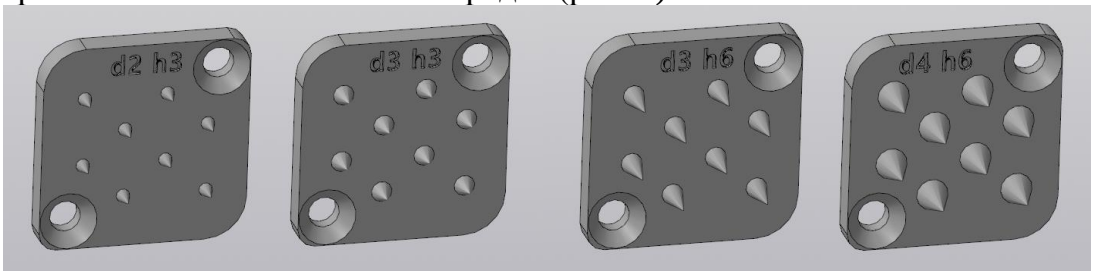

Рисунок 4 – Контактные элементы с шипами

При взаимодействии поверхности древесины с шипом во время сдвига происходит локальная деформация древесины, остается след – отпечаток на контактной поверхности древесины. Характер отпечатка на контактной поверхности древесины после внедрения шипов из стали 45 без относительного смещения и после смещения на 9…10 мм показан на рис. 5.

При перемещении вдоль волокон шипы оставляют отпечаток в виде полос (рис.

Электронный архив УГЛТУ

5, *б*); при перемещении поперек волокон – происходит деформация и разрыв волокон древесины (рис. 5, *в*).

Проведены испытания ошипованных КЭ ГЗУ из полимерных материалов. КЭ ГЗУ изготовлены с применением аддитивных технологий: *Fused Deposition Modeling* (*FDM*) и *Stereolitography* (*SLA*). Применение аддитивных технологий при изготовлении КЭ из полимерных материалов позволяет оптимизировать процесс изготовления ошипованных КЭ. Определены прочностные характеристики КЭ из полимерных материалов по ГОСТ 11262-2017.

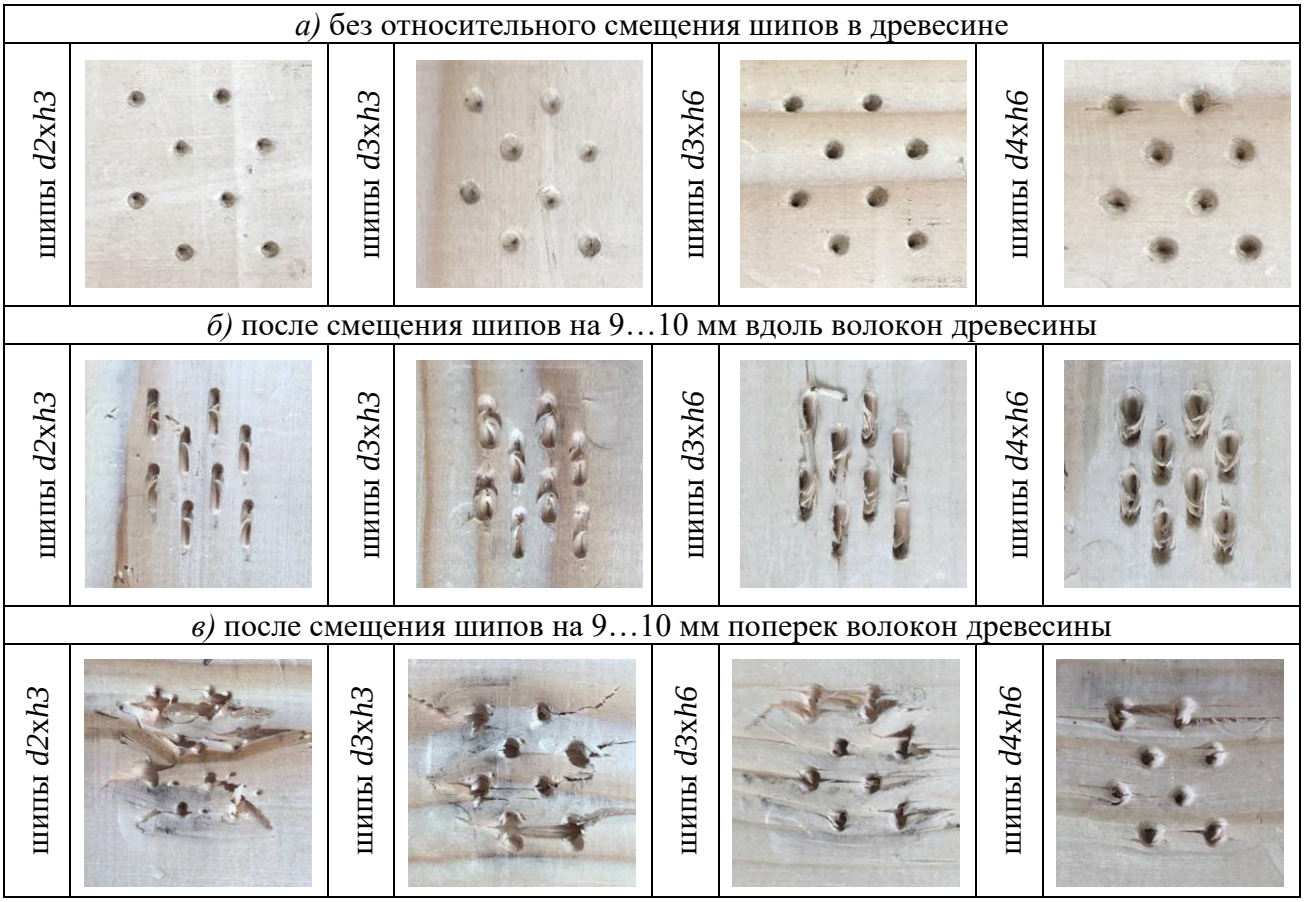

Рисунок 5 – Отпечатки на образце из древесины сосны стальных ошипованных контактных элементов

Определение коэффициента трения с учетом усилия прижатия КЭ ГЗУ к поверхности перемещаемого груза проводили на экспериментальной установке (рис. 6, *а*), в конструкции которой учтены особенности взаимодействия КЭ ГЗУ с древесиной.

Исследования выполнены на образцах древесины сосны и лиственницы с поперечным и продольным расположением волокон и ЛДСП.

Анализ результатов проведенных нами разведывательных опытов и исследований других авторов, позволил установить основные факторы, влияющие на величину коэффициента трения f_1 (табл. 1).

Электронный архив УГЛТУ

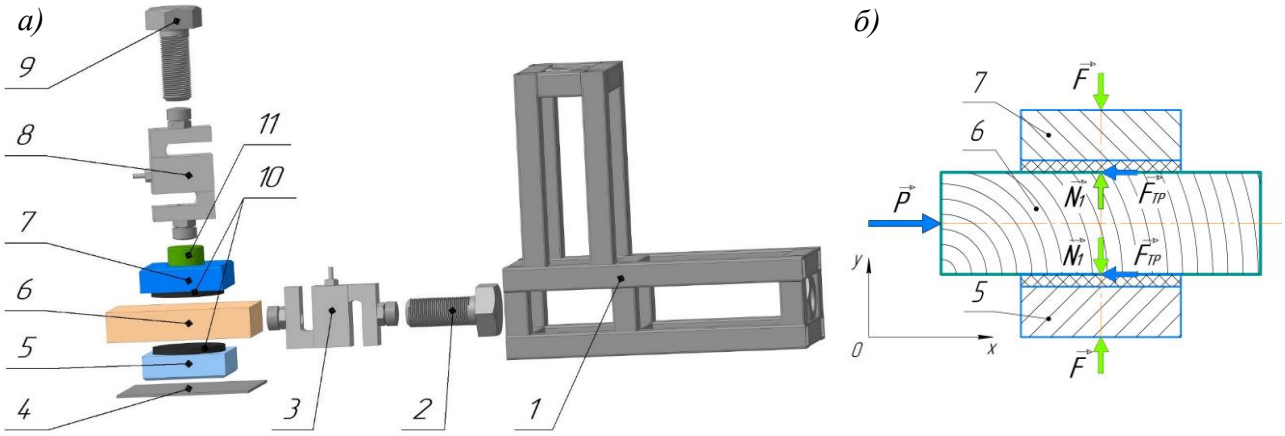

Рисунок 6 – Определение коэффициента трения упругоподатливого материала с поверхностью древесины: *а* – установка для определения коэффициента трения; *б* – расчетная схема; 1 – корпус; 2, 9 – винт М24х50; 3 – тензодатчик динамометра №1; 4 – крышка; 5, 7 – контактный элемент; 6 – образец древесины; 8 – тензодатчик динамометра №2; 10 – вкладыш из упругоподатливого материала; 11 – толкатель; P – усилие сдвига; F – сила прижатия КЭ; $F_{тр}$ – сила трения на контактной поверхности, N_1 – нормальная сила.

Определение коэффициента трения проведено по расчетной схеме (рис. 6, *б*):

$$f_1 = \frac{P}{2N_1} \qquad (11)$$

где f_1 – коэффициент трения; P – усилие сдвига; N_1 – усилие распора (усилие прижатия контактных элементов).

Таблица 1 – Факторы и связанные с ними уровни

Фактор	Тип фактора	Уровень 1	Уровень 2
A: Контактное давление (q)	непрерывный	0,1 МПа	3,5 МПа
B: Площадь контактной поверхности (S)	непрерывный	490,9 мм^2	1 963,5 мм^2
C: Направление волокон по отношению к усилию сдвига (Z)	дискретный	1 (вдоль)	2 (поперек)
D: Твердость древесины (T)	непрерывный	25 МПа (мягкая)	35 МПа (твердая)
Уравнение регрессии: $y = c \cdot A^{\alpha} \cdot B^{\beta} \cdot C^{\gamma} \cdot D^{\delta}$			(12)

Выбор степенной функции обоснован тем, что позволяет учитывать нелинейное изменение факторов в заданном диапазоне, удобен при математической обработке результатов и корректно устанавливает степень влияния факторов на искомую функциональную зависимость.

В четвертой главе приведено обсуждение результатов экспериментальных исследований.

Для оценки несущей способности ошипованных КЭ при взаимодействии с древесиной введено понятие «удельная несущая способность», характеризуемое выражением:

$$P_1^{уд.} = \frac{P_1}{S_ш} \qquad (13)$$

где: P_1 – несущая способность шипа; $S_ш$ – площадь осевого сечения шипа.

Шипы с меньшей конусностью и размерами осевого сечения имеют более высокое сопротивление нагрузке при сдвиге (рис. 7) и оставляют меньшие повреждения на поверхности древесины.

Отмечено, что прочность ошипованных КЭ из полимерных материалов, примененных в опыте, уступает прочности стальных ошипованных КЭ.

Электронный архив УГЛТУ

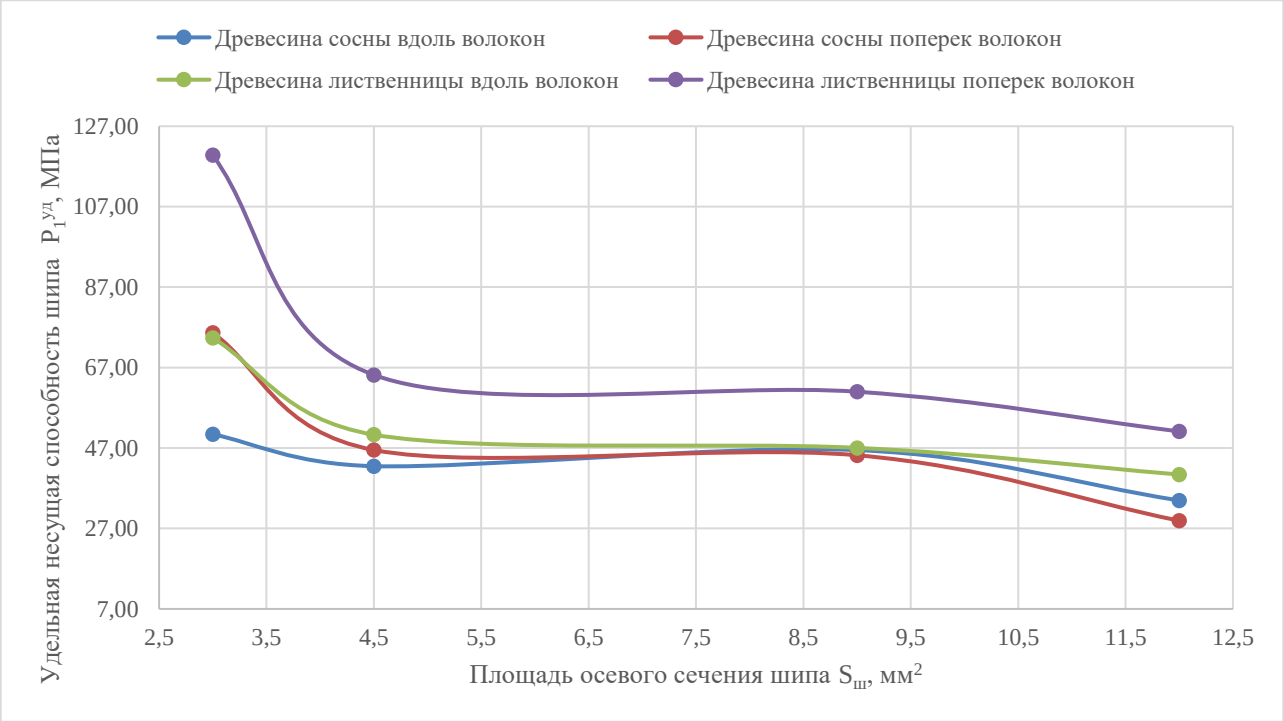

Рисунок 7 – Удельная несущая способность шипа

Получены целевые функции зависимости коэффициента трения от варьируемых факторов для разных пар трения упругоподатливых материалов с поверхностью древесины:

Пара трения	Коэффициент трения для контактной пары	Расчетное значение коэффициента трения при контактном давлении q = 1 МПа
Резина – массивная древесина	$f_1 = 0{,}0609 \cdot \frac{Z^{0,1453} \cdot T^{0,6235}}{q^{0,1452}}$	0,5
Резина – ЛДСП	$f_1 = 0{,}0088 \cdot q^2 - 0{,}1029 \cdot q + 0{,}5199$	0,4
Силикон – массивная древесина	$f_1 = 0{,}0507 \cdot \frac{Z^{0,2012} \cdot T^{0,6007}}{q^{0,2608}}$	0,4
Силикон – ЛДСП	$f_1 = \frac{0{,}2802}{q^{0,665}}$	0,26

В пятой главе на основании результатов проведенных исследований разработаны и предложены концептуальные технические решения ГЗУ для перемещения изделий из древесины.

Рассмотрена конструкция фрикционно-зажимного ГЗУ с клиновыми ошипованными КЭ для перемещения изделий из древесины (заявка в ФИПС от 20.03.2025, регистрационный № 2025106668), позволяющая повысить надежность перемещения изделий из древесины без снижения качества контактной поверхности (рис. 8, *а*).

ГЗУ устанавливают на кромку перемещаемого изделия из древесины 11 в зоне контактной поверхности 12 нормально к ней с двух сторон. Зажимным винтом 2 ползуны 4 сводят, упруго-эластичная прокладка 16 (рис. 8, *б*) прижимается к поверхности 12, в результате обеспечивается предварительное зажатие груза, при этом происходит фрикционное взаимодействие поверхности упруго-эластичной

Электронный архив УГЛТУ

прокладки 16 с зоной контактной поверхности 12, вершины шипов находятся в пограничной зоне контакта. При подъеме груза контактные элементы автоматически за счет первоначального фрикционного взаимодействия перемещаются по клиновым направляющим, дополнительно сводятся и дожимают груз, при этом объемно-эластичная прокладка 16 упруго сжимается и одновременно встречно перемещаются ошипованные модули 15, установленные на основании 14 нормально зоне контактной поверхности 12 изделия. При этом объемно-эластичная прокладка 16 упруго деформируется и утапливается, обнажая вершины шипов ошипованных модулей 15.

Каждый ошипованный модуль избирательно деформирует упруго-эластичное основание 14, внедряясь в контактную поверхность 12 перемещаемого груза 11 на глубину, определяемую плотностью локальной контактной поверхности и сопротивлением внедрению.

Предложенное техническое решение позволяет обеспечить надежное перемещение деревянных конструкций с оставлением допустимых отпечатков на контактной поверхности древесины.

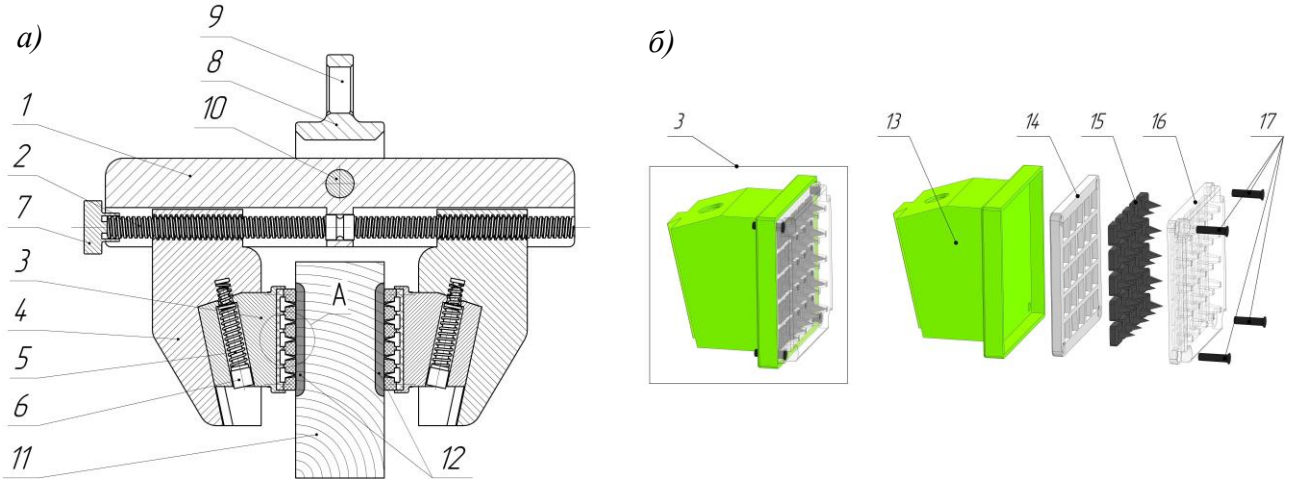

Рисунок 8 – Фрикционно-зажимное ГЗУ с клиновыми ошипованными КЭ для перемещения изделий из древесины: *а* – общий вид; *б* – *3D*-модель клинового ошипованного КЭ; 1 – корпус; 2 – зажимной винт; 3 – клиновый КЭ; 4 – ползун; 5 – возвратная пружина; 6 – крепежный винт; 7 – маховичок; 8 – скоба; 9 – проушина; 10 – ось; 11 – перемещаемое изделие из древесины; 12 – зона контактной поверхности; 13 – опорный корпус; 14 – упруго-эластичное основание; 15 – набор ошипованных модулей; 16 – объемно-эластичная прокладка; 17 – крепежные винты.

На основе технического решения (патент на изобретение RU 2714991 C1) разработана конструкция фрикционно-зажимного ГЗУ с клиновыми упругоподатливыми КЭ для перемещения листовых изделий из древесины (рис. 9). ГЗУ устанавливают на кромку груза зевом П-образного корпуса 1. Зажимным винтом 7 перемещают коромысло 4 и зажимают груз КЭ 3. За проушину 9 грузоподъемным средством поднимают ГЗУ с грузом. При подъеме груз (при условии недостаточного усилия зажатия) увлекает КЭ 3, обеспечивает необходимое и достаточное усилие зажатия груза. Снимают ГЗУ с груза после ослабления (освобождения) груза от зажатия зажимным винтом 7 вращением последнего.

Электронный архив УГЛТУ

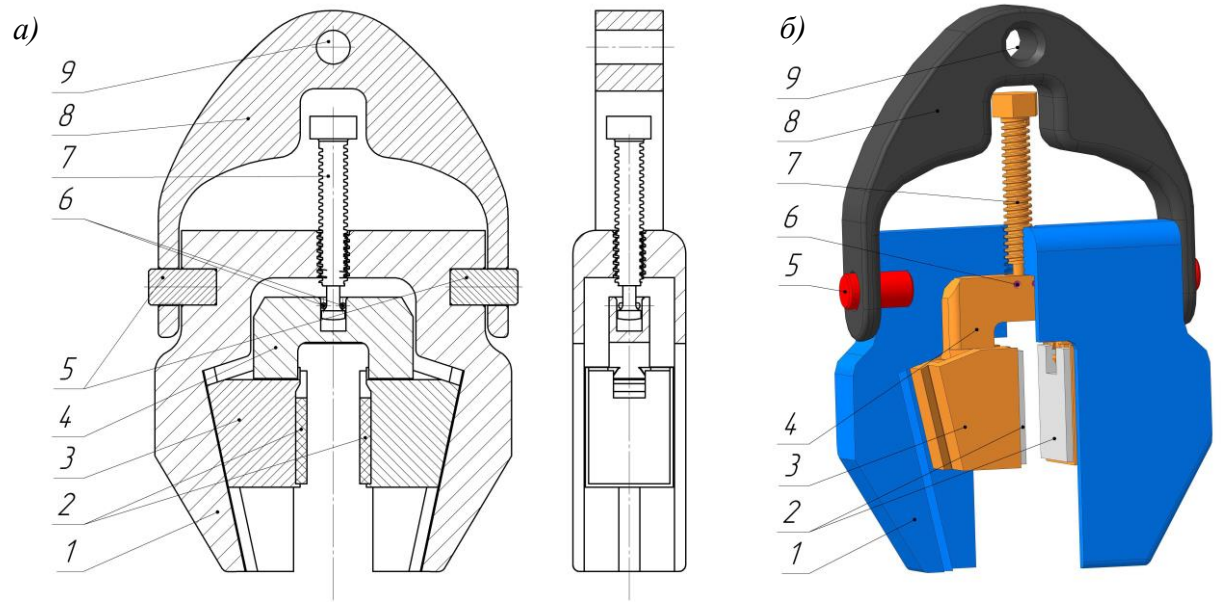

Рисунок 9 – Фрикционно-зажимное ГЗУ с клиновыми упругоподатливыми КЭ для перемещения листовых изделий из древесины толщиной до 20 мм: *а* – общий вид; *б* – 3D-модель; 1 – корпус; 2 – вкладыш из упругоподатливого материала; 3 – опорный элемент; 4 – коромысло; 5 – ось; 6 – штифт; 7 – винт; 8 – скоба; 9 – проушина.

На основе технического решения (патент на изобретение RU 2714996 C1) разработана конструкция фрикционно-зажимного ГЗУ с клиновыми упругоподатливыми КЭ для перемещения изделий из древесины размером до 200 мм (рис. 10).

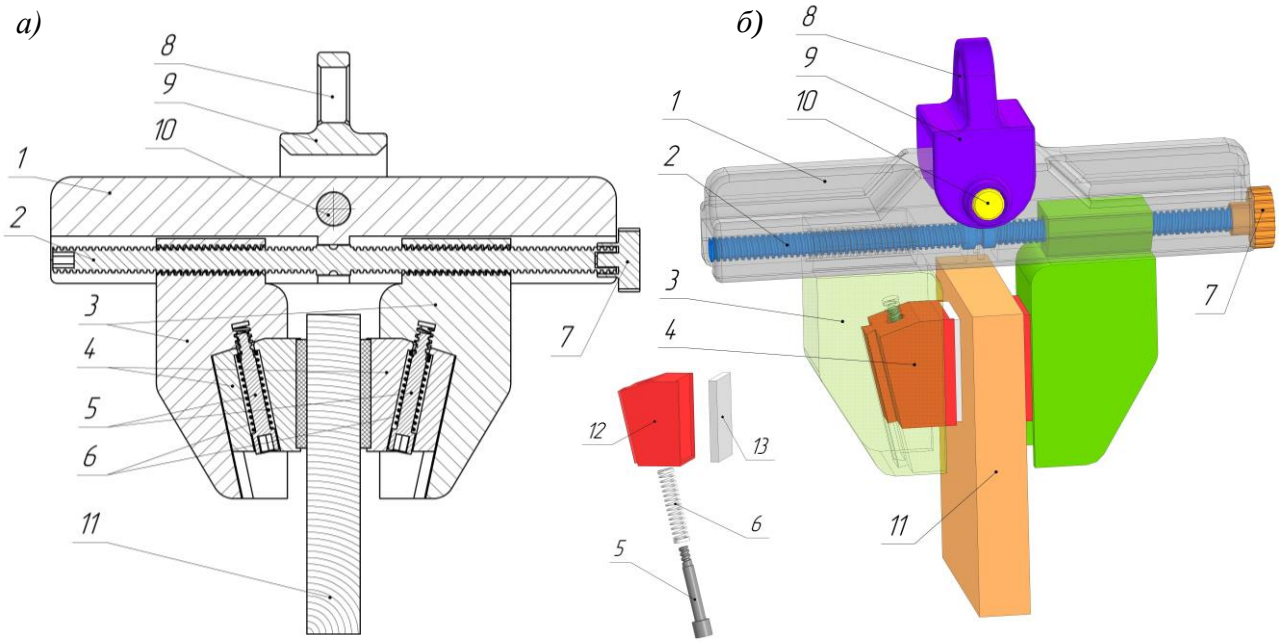

Рисунок 10 – Фрикционно-зажимное ГЗУ с клиновыми упругоподатливыми КЭ для перемещения изделий из древесины толщиной до 200 мм: *а* – общий вид; *б* – *3D*-модель; 1 – корпус; 2 – зажимной винт; 3 – ползун; 4 – клиновый контактный элемент; 5 – крепежный винт; 6 – возвратная пружина; 7 – маховичок; 8 – проушина; 9 – скоба; 10 – ось; 11 – изделие из древесины; 12 – опорный корпус; 13 – накладка из упругоподатливого материала.

ГЗУ с разведенными КЭ устанавливают на кромку перемещаемой деревянной конструкции. Зажимным винтом 2 ползуны 3 симметрично сводят и создают контакт упругоподатливой накладки 13 с поверхностью перемещаемой деревянной

Электронный архив УГЛТУ

конструкции 11, обеспечивая предварительное зажатие груза, при этом происходит фрикционное взаимодействие поверхности упругоподатливой накладки 13 с поверхностью перемещаемого груза. ГЗУ за скобу 9 через проушину 8 подвешивают на крюк грузоподъемного средства и поднимают груз.

При подъеме груза КЭ 4 автоматически за счет фрикционного взаимодействия сопрягаемых поверхностей перемещаются вниз по клиновым направляющим, дополнительно сводятся и дозажимают груз с усилием, определяемым весогабаритными характеристиками перемещаемого изделия. Производят перемещение груза, по окончании которого ползуны 3 с КЭ 4 симметрично разводят вращением зажимного винта 2 маховичком 7. При снятии нагрузки возвратные пружины 6 приводят КЭ в исходное положение, контактное взаимодействие с поверхностью груза прекращается.

Одним из основных условий функциональности и надежности фрикционно-зажимных ГЗУ является применение самотормозящейся резьбы на зажимном винте с коэффициентом запаса самоторможения $\geq 1{,}3$.

Функциональные прототипы ГЗУ в виде физических моделей, выполненные из полимерных материалов с применением аддитивных технологий, позволяют реально рассмотреть конструкцию как протитип опытных образцов.

Применение предложенных решений ГЗУ в технологических процессах деревообрабатывающих производств позволяет обеспечить надежное перемещение КДК и изделий из древесины без повреждения кромок и лицевой контактной поверхности перемещаемого груза, сохранить качество изделий и практически избежать рекламаций.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1. На основе результатов проведенных исследований разработаны принципиально новые научно-обоснованные конструктивные решения ГЗУ, оснащенные ошипованными и упругоподатливыми КЭ с улучшенными триботехническими характеристиками, позволяющие обеспечить надежное перемещение изделий из древесины с сохранением качества лицевой поверхности.

2. Определены коэффициенты трения при взаимодействии КЭ из упругоподатливых материалов (резины и силиконовой резины) с поверхностью изделий из древесины. Получены целевые функции изменения коэффициента трения в зависимости от контактного давления, направления волокон, твердости поверхности изделий из древесины.

Определены граничные условия контактного давления на поверхности древесины ≤ 1 МПа, коэффициенты трения для сочетаемых материалов: резина – массивная древесина 0,5; силиконовая резина – массивная древесина 0,4; резина – ЛДСП 0,4; силиконовая резина – ЛДСП 0,26.

3. Для перемещения изделий из древесины, требующих особого (деликатного) обращения, рекомендовано применять фрикционно-зажимные ГЗУ с КЭ с улучшенными триботехническими характеристиками на основе силиконовой резины (ТУ 2543-141-40245042-2008).

4. Установлено, что высокие адгезионные свойства резины и силикона к поверхности древесины проявляются при небольшом контактном давлении в паре трения ($\leq 0{,}5$ МПа). Особенно заметно это проявляется в паре трения «силиконовая резина – ЛДСП». При увеличении контактного давления до начала пластических деформаций древесины коэффициент трения уменьшается. При проектировании

Электронный архив УГЛТУ

фрикционно-зажимных ГЗУ для перемещения изделий из ЛДСП с оснащением КЭ силиконовой резиной рекомендуется применять величину коэффициента трения ≤ 0,26.

5. Определена несущая способность стальных и полимерных ошипованных КЭ. Несущая способность стальных ошипованных КЭ ограничена прочностью древесины на смятие с учетом анизотропных свойств древесины. Несущая способность полимерных ошипованных КЭ, изготовленных из фотополимера «*ABS-like*» ограничена сопоставимой величиной контактного смятия древесины.

6. Для надежного и качественного перемещения изделий из древесины рекомендовано применять ошипованные КЭ из стали, что позволяет перемещать груз с оставлением допустимых следов на контактной поверхности древесины без снижения прочности. Стальные ошипованные КЭ позволяют увеличить несущую способность ГЗУ в 3-5 раз по сравнению с упругоподатливыми КЭ.

7. КЭ, оснащенные шипами меньшей конусности и размерами осевого сечения обеспечивают более высокое удельное сопротивление нагрузке при сдвиге, оставляют меньший след отпечатка на контактной поверхности древесины. Рекомендовано применять стальные КЭ с коническими шипами диаметром в основании и высотой 2 и 3 мм соответственно.

8. Экспериментально подтверждена возможность упрощения изготовления ошипованных КЭ с применением аддитивных технологий из полимерных материалов.

9. Концептуальные физические модели прототипов ГЗУ, изготовленные с применением аддитивных технологий *FDM*-печати из термопластических полимеров «*PLA*+» позволяют упростить технологию изготовления и расширить область применения фрикционно-зажимных ГЗУ.

10. При отсутствии в настоящее время достаточного практического промышленного опыта применения фрикционно-зажимных ГЗУ с упругоподатливыми и ошипованными КЭ следует продолжить целенаправленные исследования и разработку новых полимерных материалов, новых технических и технологических решений по совершенствованию конструкций ГЗУ.

Основное содержание диссертации опубликовано

в изданиях, рекомендованных ВАК:

1. **Дужевский, И.А.** Экспериментальное определение несущей способности ошипованных контактных элементов при перемещении конструкций из древесины / И.А. Дужевский, В.И. Мелехов, А.И. Бабкин // Системы. Методы. Технологии. – 2024. – № 3(63). – С. 159-166.

2. **Дужевский, И.А.** Триботехнические характеристики упругоподатливых контактных элементов фрикционных грузозахватных устройств для перемещения деревянных конструкций / И.А. Дужевский, В.И. Мелехов, В.В. Прохоров, А.В. Руденко, А.И. Бабкин, Н.Г. Пономарева // Системы. Методы. Технологии. – 2025. – № 1(65). – С. 77-86.

в других изданиях:

1. **Дужевский, И. А.** Совершенствование фрикционных грузозахватных устройств для перемещения конструкций из древесины / И. А. Дужевский, А. В. Руденко // Научно-технические ведомости Севмашвтуза. – 2019. – № 2. – С. 18-22.

2. Руденко, А. В. Фрикционные грузозахватные устройства для перемещения панелей из древесины / А. В. Руденко, **И. А. Дужевский** // Современные технологии в машиностроении : сборник статей XXIII Международной научно-технической

Электронный архив УГЛТУ

конференции, Пенза, 26–27 декабря 2019 года. – Пенза: Автономная некоммерческая научно-образовательная организация «Приволжский Дом знаний», 2019. – С. 52-56.

3. **Дужевский, И. А.** Совершенствование фрикционных грузозахватных устройств для перемещения конструкций из древесины / И. А. Дужевский, А. В. Руденко // XLVII Ломоносовские чтения "Наследие М.В. Ломоносова и достижения современной науки" : Сборник материалов региональной научно-практической конференции преподавателей, аспирантов, магистрантов и студентов, специалистов организаций и предприятий, Северодвинск, 22–24 ноября 2018 года. – Северодвинск: Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, 2019. – С. 104-109.

4. **Дужевский, И. А.** Пути решения задачи сохранения поверхности конструкций из древесины при перемещении фрикционным грузозахватным устройством / И. А. Дужевский, А. В. Руденко // Актуальные вопросы инновационного развития Арктического региона РФ : Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции, Северодвинск, 18–30 ноября 2019 года. – Северодвинск: Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, 2020. – С. 15-18.

5. Бабкин, А. И. Грузозахватные устройства с шипованными контактными элементами для перемещения деревянных конструкций / А. И. Бабкин, **И. А. Дужевский** // Актуальные вопросы инновационного развития Арктического региона РФ : Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции, Северодвинск, 18–30 ноября 2019 года. – Северодвинск: Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, 2020. – С. 10-14.

6. Руденко, А. В. Динамика совершенствования конструкций фрикционных грузозахватных устройств для перемещения изделий из древесины / А. В. Руденко, **И. А. Дужевский** // Актуальные вопросы инновационного развития Арктического региона РФ : Сборник материалов II Всероссийской научно-практической конференции, Северодвинск, 16–30 ноября 2020 года / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования, Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова. – Северодвинск: Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, 2021. – С. 25-30.

7. Руденко, А. В. Повышение надежности фрикционных грузозахватных устройств при перемещении изделий из древесины / А. В. Руденко, **И. А. Дужевский** // Актуальные вопросы инновационного развития Арктического региона РФ : Сборник материалов II Всероссийской научно-практической конференции, Северодвинск, 16–30 ноября 2020 года / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования, Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова. – Северодвинск: Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, 2021. – С. 20-23.

8. **Дужевский, И. А.** О коэффициенте трения между деревянными панелями с чистовой обработкой поверхности и резиновыми контактными элементами с насечкой / И. А. Дужевский, А. В. Руденко // Актуальные вопросы инновационного развития Арктического региона РФ : Сборник материалов IV Всероссийской научно-практической конференции, Северодвинск, 14–30 ноября 2022 года / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования «Северный (Арктический)

Электронный архив УГЛТУ

федеральный университет имени М.В. Ломоносова». – Северодвинск: Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, 2023. – С. 17-20.

9. **Дужевский, И. А.** Исследование прочностных характеристик изделий, полученных методом 3D-печати из термопластических полимеров PLA+ / И. А. Дужевский, В. Л. Тарасов // Актуальные вопросы инновационного развития арктического региона РФ : Сборник статей V Всероссийской научно-практической конференции, Северодвинск, 20–30 ноября 2023 года. – Северодвинск: Северный (Арктический) федеральный университет им. М. В. Ломоносова, 2024. – С. 479-483.

10. **Дужевский, И. А.** Экспериментальное определение коэффициента трения-взаимодействия между силиконовой резиной и древесно-плитными материалами / И. А. Дужевский, А. В. Руденко // Актуальные вопросы инновационного развития арктического региона РФ : Сборник статей V Всероссийской научно-практической конференции, Северодвинск, 20–30 ноября 2023 года. – Северодвинск: Северный (Арктический) федеральный университет им. М. В. Ломоносова, 2024. – С. 473-478.

патенты:

1. Патент № 2714996 C1 Российская Федерация, МПК B66C 1/42. Струбцина с клиновым зажимом для плоских грузов : № 2019122842 : заявл. 19.07.2019 : опубл. 21.02.2020 / А. В. Руденко, **И. А. Дужевский** ; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова».

2. Патент № 2714991 C1 Российская Федерация, МПК B66C 1/00. Струбцина с клиновым зажимом для панелей : № 2019122843 : заявл. 19.07.2019 : опубл. 21.02.2020 / А. В. Руденко, **И. А. Дужевский** ; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова».

Отзывы на автореферат с указанием фамилии, имени, отчества, почтового адреса, адреса электронной почты, наименования организации, должности и Вашей научной специальности, по которой защищена диссертация, подписанные и заверенные печатью, просим направлять по адресу: **620100, г. Екатеринбург, ул. Сибирский тракт, 37, УГЛТУ, диссертационный совет 24.2.424.01, e-mail: d21228102@yandex.ru**

Подписано в печать «___»_____2025г.
Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 1,25. Тираж 100 экз.
Заказ №