

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова»

На правах рукописи



Дужеvский 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

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
профессор Мелехов Владимир Иванович

Архангельск 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА, ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	13
1.1 Транспортные операции в технологических процессах обработки древесины	13
1.1.1 Транспортные операции в технологических процессах производства инженерных конструкций из древесины	13
1.1.2 Характеристика изделий из древесины как перемещаемого груза	19
1.2 Древесина как конструкционный материал.....	23
1.2.1 Классификация лесных материалов и продукции из древесины ...	25
1.2.2 Особенности строения древесины.....	37
1.3 Технологическая оснастка и грузозахватные устройства для перемещения конструкций из древесины	39
1.3.1 Строповка груза обвязкой	41
1.3.2 Вилочные захваты	42
1.3.3 Винтовые захваты	43
1.3.4 Клещевые захваты.....	44
1.3.5 Эксцентриковые захваты.....	45
1.3.6 Клиновые захваты	45
1.3.7 Вакуумные захваты.....	46
1.3.8 Роботизированные захваты	47
1.4 Контактные элементы фрикционно-зажимных грузозахватных устройств.....	48
1.4.1 Жесткие контактные элементы.....	49
1.4.2 Упругоподатливые контактные элементы.....	50
1.4.3 Контактные элементы с повышенной удерживающей способностью	52

1.5 Применение субтрактивных и аддитивных технологий для производства грузозахватных устройств	55
1.6 Особые требования к конструкции грузозахватных устройств для перемещения изделий из древесины.....	60
1.7 Цель и задачи исследования.....	62
ГЛАВА 2. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ КОНТАКТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ФРИКЦИОННО-ЗАЖИМНЫХ ГРУЗОЗАХВАТНЫХ УСТРОЙСТВ С ДРЕВЕСИНОЙ	64
2.1 Математическая модель взаимодействия ошипованных контактных элементов грузозахватных устройств с древесиной	64
2.2 Математическая модель взаимодействия упругоподатливых контактных элементов самозажимных грузозахватных устройств с древесиной	68
ГЛАВА 3. МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	80
3.1 Методика проведения экспериментальных исследований взаимодействия ошипованных контактных элементов грузозахватных устройств с древесиной	80
3.1.1 Экспериментальная установка, подготовка образцов.....	80
3.1.2 Определение сопротивления сдвигу и несущей способности стальных ошипованных контактных элементов грузозахватных устройств при взаимодействии с древесиной	83
3.1.3 Определение несущей способности ошипованных контактных элементов из полимерных материалов, выполненных с применением аддитивных технологий.....	86
3.2 Методика проведения экспериментальных исследований взаимодействия упругоподатливых контактных элементов самозажимных грузозахватных устройств с древесиной	88
3.2.1 Экспериментальная установка для определения коэффициента трения.....	88

3.2.2 План проведения исследований. Методическая сетка опытов. Подготовка образцов древесины и контактных элементов грузозахватных устройств с различным оснащением контактной поверхности.....	91
3.2.3 Определение коэффициента трения при взаимодействии упругоподатливых контактных элементов с поверхностью массивной древесины.....	98
3.2.4 Определение коэффициента трения при взаимодействии упругоподатливых контактных элементов с ламинированной поверхностью древесной плиты.....	101
ГЛАВА 4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ	103
4.1 Взаимодействие ошипованных контактных элементов грузозахватных устройств с древесиной	103
4.1.1 Сопротивление сдвигу и несущая способность металлических ошипованных КЭ при взаимодействии с древесиной	103
4.1.2 Сопротивление сдвигу и несущая способность ошипованных КЭ из полимерных материалов при взаимодействии с древесиной	105
4.2 Взаимодействие упругоподатливых контактных элементов самозажимных грузозахватных устройств с древесиной	106
4.2.1 Адгезионные свойства и коэффициент трения контактных элементов из вулканизированной резины с поверхностью древесины	106
4.2.2 Характер изменения адгезионных свойств и коэффициента трения контактных элементов из силиконовой резины при взаимодействии с древесиной	107
ГЛАВА 5. КОНСТРУКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ ГРУЗОЗАХВАТНЫХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ДРЕВЕСИНЫ.....	110
5.1 Грузозахватное устройство с самозажимными ошипованными контактными элементами.....	110
5.2 Фрикционно-зажимное грузозахватное устройство с клиновыми упругоподатливыми контактными элементами	113

5.3 Концептуально-технологические решения грузозахватных устройств для перемещения изделий из древесины на основе аддитивных технологий	119
5.4 Эффективность совершенствования логистических операций в деревообрабатывающем производстве.....	120
ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ	123
ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ.....	126
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	130
ПРИЛОЖЕНИЕ А	144
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	161

ВВЕДЕНИЕ

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 [1].

Деревянные конструкции изготавливают в виде объемных изделий, плит, панелей, щитов и пр. [2].

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 [3, 4].

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) [5, 6] 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 ослабления 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, эксцентрики, клещевые, клиновые и др. Все они имеют ограничения по применению и не обеспечивают сохранности поверхности перемещаемых изделий из древесины.

Эксцентрик 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, древесностружечных плит с облицованной поверхностью, фанеры и пр. ведет к интенсификации производственных процессов на промышленных предприятиях и вызывает 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. [7, 8].

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 [9]. При взаимодействии ошипованных КЭ с поверхностью перемещаемого груза происходит механическое внедрение шипов в древесину, при этом удержание 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 [10].

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 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 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.

ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА, ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Транспортные операции в технологических процессах обработки древесины

1.1.1 Транспортные операции в технологических процессах производства инженерных конструкций из древесины

Древесина используется в различных сферах жизни человека: строительство, изготовление мебели, создание интерьеров, производство бумаги и картона, в качестве экологичного топлива, при производстве спортивного инвентаря, при создании произведений искусства и т.п.

Объемы переработки древесины возрастают, интенсивно развивается производство деревоклееных конструкций, деревянного домостроения, новых дерево-композитных материалов, панелей, дерево-стружечных плит с облицованной поверхностью, фанеры и др.

Прежде чем готовое изделие из древесины попадает к конечному потребителю, оно проходит множество различных технологических операций в процессе производства и подготовки к эксплуатации.

Современное предприятие, занимающееся заготовкой и переработкой лесной продукции, представляет собой сложную, многоуровневую систему. Организация эффективного функционирования таких предприятий в значительной мере зависит от ритмичной и взаимоувязанной работы на всех этапах производственного процесса (рис. 1.1), важнейшим из которых является транспортный [11].

Транспортно-логистические процессы деревообрабатывающего производства включают следующие операции:

- вывозка лесных сортиментов, поперечный и продольный раскрой;

- технологическая и гидротермическая обработка пиломатериалов, формирование, разборка, перемещение сушильных штабелей и транспортных пакетов;
- технологические операции на участках формирования товарной продукции;
- внутризаводское перемещение пакетов полуфабрикатов и готовой продукции;
- погрузка изделий на внешний транспорт и доставка конечному потребителю.

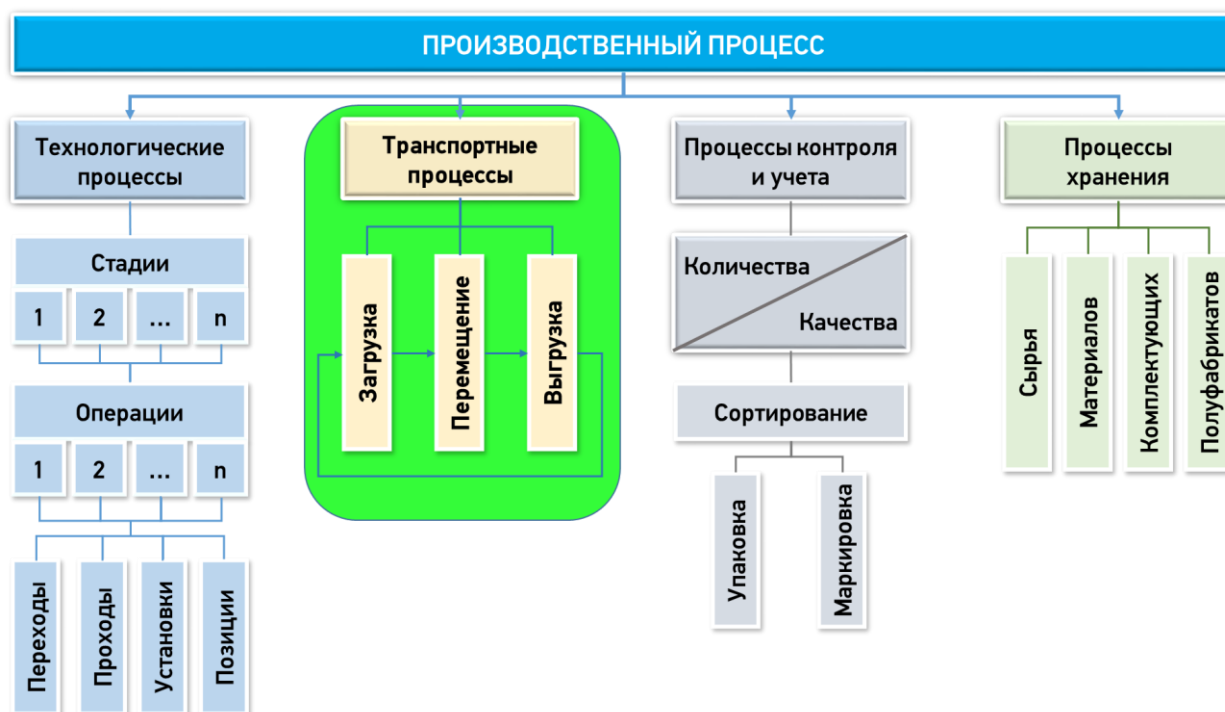


Рисунок 1.1 – Производственный процесс изготовления изделий из древесины

Подъемно-транспортное оборудование применяется для комплексной механизации и автоматизации основных и вспомогательных производственных процессов и предназначено для исключения ручных работ, повышение производительности и качества продукции [12]. Операции по подъему, перемещению и кантованию элементов конструкций из древесины являются вспомогательными и предназначены для обеспечения основных технологических процессов [13].

Грузотранспортные операции являются источником опасности, поэтому их выполнение регламентируется правилами Ростехнадзора [14].

При выполнении погрузочно-разгрузочных работ и размещении грузов действуют правила по охране труда [15], согласно которым в целях сохранения здоровья работающих, установлены предельно допустимые нормы разового подъема (без перемещения) тяжестей: мужчинами – не более 50 кг; женщинами – не более 15 кг. Погрузка и разгрузка грузов массой от 50 кг до 500 кг должна производиться с применением грузоподъемного оборудования и устройств (тельферов, лебедок, талей, блоков).

При этом, правилами по охране труда в лесозаготовительном, деревообрабатывающем производствах и при выполнении лесохозяйственных работ [16] предусмотрено:

п. 779. Производственные процессы перемещения сырья, продукции, подачи лесоматериалов, хлыстов, бревен, бруса, кряжей, чураков, древесных плит, фанеры, клееных конструкций большого габарита в обработку, приготовление рабочих растворов, загрузка и выгрузка материалов в емкости для пропитки, открывание и закрывание емкостей **должны быть механизированы.**

XCIV. Требования охраны труда при производстве деревянных панелей домов

п. 1282. Для подъема и переворачивания панелей должны применяться **грузоподъемные механизмы, оборудованные быстродействующими захватами.**

Таким образом, если в производственном процессе изготовления изделий из древесины при выполнении транспортно-логистических операций возникает необходимость в подъеме и перемещении грузов массой более 50 кг, то необходимо использовать грузоподъемные механизмы и оборудование.

Грузотехнологические операции являются составной частью технологического процесса, выполняются при заготовке древесины, доставке её на деревообрабатывающее предприятие водным или сухопутным транспортом,

производстве конструкций из древесины, складировании продукции, транспортировке, монтаже на строительной площадке и т.п.

Конструкция ГЗУ – важное звено технологической оснастки, обеспечивающее надежность и безопасность при проведении погрузочно-разгрузочных и монтажных работ на всех этапах производственного процесса изделий из древесины.

Начальным этапом транспортно-логистических процессов производства изделий из древесины является транспортировка лесных сортиментов с мест заготовки на нижний склад лесозаготовительного предприятия.

Сухопутным транспортом леса (или вывозкой леса) принято называть перемещение древесины от места ее погрузки на лесовозный подвижной состав до нижнего склада лесозаготовительного предприятия или потребителя (деревообрабатывающего предприятия) по лесовозным дорогам или дорогам общего пользования.

Нижний склад лесозаготовительного предприятия представляет собой производственный цех для приёма древесных хлыстов или сортиментов, их временного хранения, первичной обработки, временного хранения готовой продукции и отгрузки. На нижнем складе производится также переработка древесины (шпало- и лесопиление, переработка низкокачественной древесины, производство щепы и т.д.). Для валки деревьев, обрубки сучьев, подтрелёвки, раскряжёвки и сортировки применяют лесозаготовительные комбайны (харвестеры). Вывозка сортиментов с лесосеки осуществляется лесными машинами, оборудованными крано-манипуляторной установкой (КМУ) с грейферным захватом (рис. 1.2).

Такой способ транспортировки не требует применения дополнительного грузоподъемного оборудования при погрузке и разгрузке лесных машин.

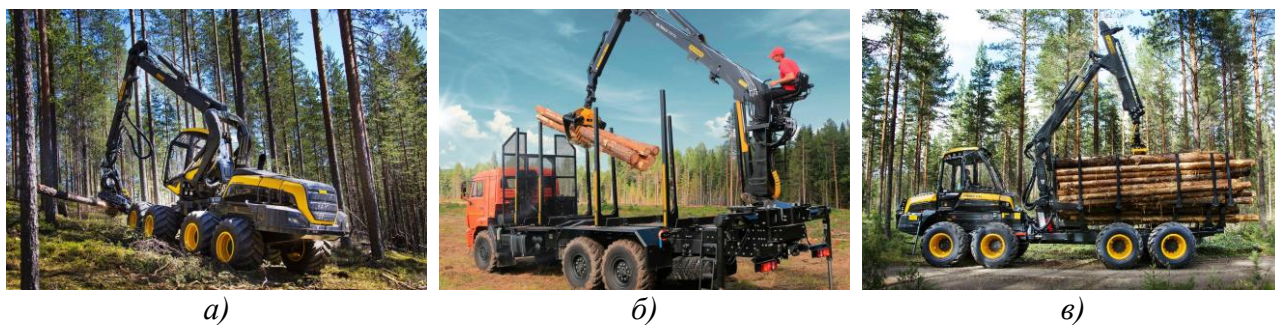


Рисунок 1.2 – Лесозаготовительные и лесные машины с крано-манипуляторной установкой: *а* – харвестер; *б* – сортиментовоз; *в* – форвардер.

Для погрузочно-разгрузочных работ на нижних складах применяются мостовые, козловые (рис. 1.3, *а*), кабельные (рис. 1.3, *б*), башенные и др. типы грузоподъемных кранов общего назначения, самоходные вилочные погрузчики. Учитывая специфику перемещаемых грузов применяют вилочные захваты для перемещения груза в таре (пакетом) или грейферные захваты для перемещения круглых сортиментов.



Рисунок 1.3 – Грузоподъемные краны, применяемые на нижних складах: *а* – козловой кран; *б* – кабельный кран.

Заготовленные лесные сортименты поступают на лесопильное предприятие, на котором производят раскрой на пиломатериалы различного назначения, из которых в результате сложных технологических операций производят деревоклеенные панели, несущие строительные конструкции и многие другие изделия из древесины. На этом этапе высоких требований к сохранности поверхности сортиментов при транспортировке не предъявляется.

Особый вопрос и интерес представляют логистические операции при перемещении строительных конструкций и клееной древесины в технологических процессах деревообрабатывающих производств, внутризаводской транспортировки, погрузки готовой продукции на внешний транспорт и доставки конечному потребителю.

В технологических процессах производства, внутризаводской транспортировки, складирования и хранения изделий из древесины применяют технологическую оснастку для подъема и перемещения груза, предусмотренную технологическими процессами и не всегда обеспечивающую сохранность изделий.

От правильного выбора технологической оснастки, применяемой для подъема и перемещения, во многом зависит сохранность груза – изделия из древесины (рис. 1.4).



Рисунок 1.4 – Монтаж крупногабаритной ферменной конструкции из древесины

При проведении погрузочно-разгрузочных работ изделий из древесины возможно образование на их лицевой поверхности дефектов: потертостей, сколов, вмятин, трещин, царапин и т.п. (рис. 1.5). По требованию нормативных документов перечисленные дефекты недопустимы и заказчиком поврежденный товар принят не будет, поставщику потребуются заменить поврежденный товар на товар надлежащего качества, что потребует дополнительных затрат.

В процессе перемещения конструкций из древесины необходимо избегать повреждения и деформации изделий, что не всегда обеспечивается при

перемещении крупногабаритных конструкций с недостаточной жесткостью, которая зависит от применяемых схем строповки и возникающих динамических усилий, поэтому задача перемещения изделий из массивной и клееной древесины с сохранением их качества в процессе транспортировки на предприятиях является актуальной, требует решения путем проведения целенаправленных исследований и создания новых технических решений.

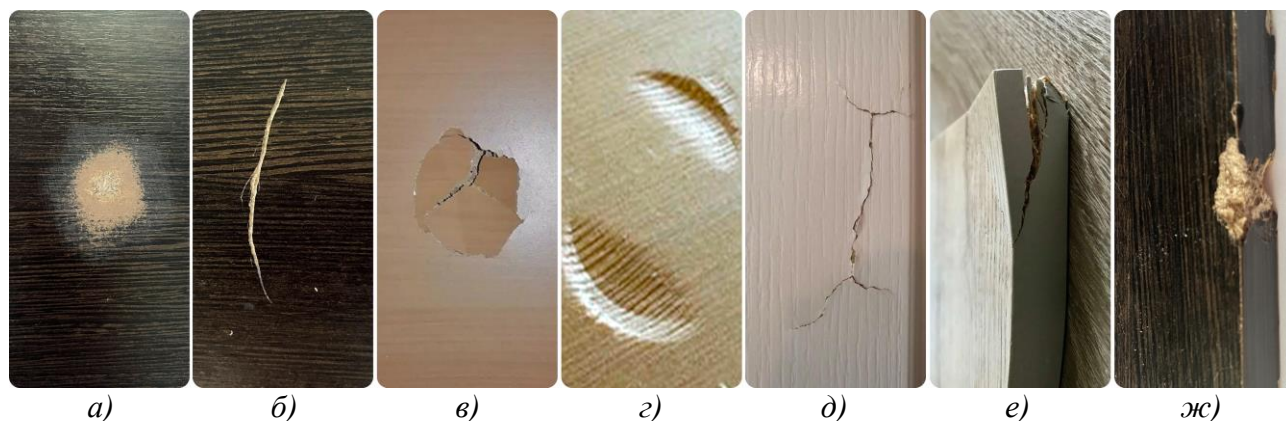


Рисунок 1.5 – Дефекты поверхности изделий из древесины вследствие некачественной транспортировки:

а – потертости; *б* – царапина, *в*, *г* – вмятины; *д*, *е* – трещины; *ж* – повреждение кромки.

1.1.2 Характеристика изделий из древесины как перемещаемого груза

Груз – это продукт производства (сырье, полуфабрикаты, готовая продукция), принятый тем или другим видом транспорта к перевозке [17]; объект перемещения подъемными сооружениями. Перемещение груза на короткие расстояния возможно при помощи подъемно-транспортного оборудования, которое также используется для погрузки и разгрузки транспортных средств, перевозящих грузы на большие расстояния.

Груз характеризуется режимом хранения, способами упаковки, перегрузки и перевозки, физико-химическими свойствами, размерами, объемом, массой и формой предъявления к перевозке [17].

На транспорте грузы подразделяются по ряду обобщенных признаков. Отдельную группу составляют лесные грузы.

Лесные грузы – продукция, полученная при заготовке и переработке древесины механическим и химическим способом и предназначенная для перевозки (древесное сырье и изделия из древесины).

Выделяют три группы транспортируемых лесных грузов:

- 1) круглые лесоматериалы – материалы, сохранившие природную структуру и химический состав древесины;
- 2) пиломатериалы – материалы, полученные путем обработки и раскря круглых сортиментов;
- 3) изделия из древесины – изделия, полученные механической обработкой и склеиванием.

Лесные грузы классифицируются по размерам, форме, признакам специфических свойств, степени опасности при перевозках, полноте загрузки подвижного состава и т.д. Лесозаготовительные предприятия отгружают на перерабатывающие комбинаты хлысты, круглые лесоматериалы, технологическую щепу и опилки.

Пакетирование тарно-штучных грузов с применением поддонов, контейнеров и других пакетирующих средств упрощает технологию транспортировки и позволяет применять универсальные ГЗУ.

Наиболее значимые физико-механические свойства древесины, которые необходимо учитывать при транспортировке изделий: твёрдость, прочность, деформативность, удельная масса (плотность), влажность, цвет (окраска), запах, наличие различных пороков.

На показатели механических свойств влияет анизотропия древесины, ориентация годичных слоев, сердцевинных лучей, направление внешних механических сил, а также влажность древесины. Механические свойства древесины определяют при стандартной влажности (12%) и при полном насыщении клеточных оболочек (30%) [18].

Клееная древесина, как и массивная, обладает определенной степенью анизотропии. Прочность клееной древесины при сжатии вдоль волокон выше, чем у массивной древесины, т.к. отсутствуют дефекты в виде сучков и

неоднородной структуры. При сжатии поперек волокон массивной древесины механические характеристики могут быть выше чем у клееной древесины в связи с наличием кососрезных волокон в слоях и формирования ламелей по скосам.

Плотность зависит от строения древесины, содержания в ней экстрактивных веществ (смол) и влажности. Значения плотности изменяются в пределах древесной породы, внутри одного ствола дерева. Виды древесины по плотности (при влажности 12%) приведены в таблице 1.1 [19].

Таблица 1.1 – Классификация пород древесины по плотности

№ группы	Вид древесины	Плотность, кг/м³	Породы древесины
1	малой плотности	≤ 540	ель, сосна, тополь, бальса, пихта, кедр, можжевельник, осина, ива, липа, ольха, каштан
2	средней плотности	540...740	лиственница, берёза, бук, дуб, клён, ясень, орех грецкий, рябина, яблоня, груша, вяз, лещина
3	высокой плотности	≥ 750	акация, граб, берёза железная, ясень, керуинг, самшит, фисташка

Прочность древесины характеризует ее способность сопротивляться разрушению под действием механических нагрузок и характеризуется пределами ее прочности при сжатии, растяжении, статическом изгибе, скалывании. Прочность древесины зависит от породы дерева, средней плотности, наличия пороков и влажности. Древесина обладают высокой прочностью на растяжение вдоль волокон (65 - 170 МПа), сопоставимой с прочностью металлических сплавов. При растяжении поперек волокон прочность древесины примерно в 20 раз ниже предела прочности вдоль волокон. Сопротивление древесины сжатию вдоль волокон (30 - 80 МПа) значительно больше (в 8 - 10 раз) сопротивления поперек волокон [18].

Твердостью называется способность древесины сопротивляться внедрению в неё более твердых тел. Виды древесины по твердости (на торце, при влажности 12 %) приведены в таблице 1.2.

Деформативность – способность древесины изменять свои размеры и форму при внешних воздействиях нагрузки, влажности, температуры. Поперечное коробление связано с различной усушкой (разбуханием) древесины в радиальном и тангенциальном направлениях. Его характер зависит от расположения годичных слоев, обусловленных формой поперечного сечения сортамента, а также местом выпилки его из бревна. Продольное коробление связано с некоторыми пороками древесины, например, крупные сучки, кренью, наклоном волокон. Следствием коробления является порок древесины – покоробленность (поперечная, продольная по пласти и по кромке, крыловатость) [18].

Таблица 1.2 – Классификация пород древесины по твердости

№ группы	Вид древесины	Значение твердости, МПа	Породы древесины
1	мягкая	≤ 40	сосна, ель, кедр, пихта, можжевельник, тополь, липа, осина, ольха, каштан
2	твердая	40,1...80	лиственница, береза сибирская, бук, дуб, вяз, платан, рябина, клен, лещина, орех грецкий, хурма, яблоня, ясень
3	очень твердая	> 80	акация белая, граб, кизил, самшит, фисташка, тисс

При транспортировке изделий из древесины не должны изменяться их физико-механические свойства и нарушаться качество лицевой поверхности, что обеспечивается разработкой технологии транспортных процессов с учетом свойств древесины.

Государственными стандартами определяются требования к качеству лицевой поверхности изделий из древесины.

ГОСТ 2140-81 [20] распространяется на профильные изделия из древесины влажности 8 - 16% и устанавливает, что в древесине не допускаются пороки, превышающие определённые нормы. Например, для сорта «А» не допускаются сухие выпадающие и гнилые сучки, частично сросшиеся и несросшиеся (сухие)

сучки. Для сорта «В» не допускаются гнилые сучки диаметром более 15 мм и сухие выпадающие сучки.

ГОСТ 16371-2014 [21] устанавливает, что на лицевых поверхностях изделия мебели может быть одновременно не более трёх видов нормируемых пороков. Размер каждой из заделок должен быть не более 5 см² для облицованных деталей и 1,5 см² – для деталей из массивной древесины. На лицевых поверхностях, облицованных декоративным облицовочным материалом (плёнкой, пластиком и др.), заделки не допускаются.

ГОСТ 7016-2013 [22] устанавливает значения параметров шероховатости поверхностей материалов и изделий из древесины.

ГОСТ Р 20850-2014 [23] определяет требования к размерам, форме, геометрии, физическим свойствам, механическим свойствам и другим параметрам КДК.

1.2 Древесина как конструкционный материал

Древесина, как конструкционный материал природного происхождения, применяется во многих отраслях промышленности и повседневной жизни (рис. 1.6) [24-30].



Рисунок 1.6 – Основные направления применения древесины

Современные технологические процессы обработки древесины позволяют получать изделия и материалы по прочности сопоставимые с металлоконструкциями, а по некоторым характеристикам превосходящие их [31].

Основные достоинства древесины, обеспечивающие её применение как конструкционного материала, приведены на рис. 1.7.

В строительстве изделия из массивной и клееной древесины могут служить несущим каркасом (промышленные и спортивные сооружения, многоэтажные жилые и общественные здания), применяться для наружной и внутренней отделки помещений (полы, стены, потолок) и др. Из массивной и клееной древесины создают практичные и эстетически привлекательные элементы декора и мебель. Применяемые технологии изготовления изделий из древесины позволяют защитить их от воздействия влаги и других неблагоприятных воздействующих факторов, обеспечивая заданные механические характеристики и долговечность.



Рисунок 1.7 – Характеристика древесины, как конструкционного материала

КДК используются при строительстве огромных сооружений (стадионов) и успешно выполняют свои функции, обеспечивая прочность, жесткость и долговечность конструкции.

Для изготовления КДК применяют пиломатериалы хвойных пород (сосна, ель) [23]. Допускается применение пиломатериалов из кедра, пихты, лиственницы и других пород, если специфика их применения оговорена в проектной документации.

Увеличение объемов производства деревоклееных конструкций, деревянного домостроения, новых дерево-композитных материалов, панелей, древесно-стружечных плит с облицованной поверхностью, фанеры и пр. сопряжены с выполнением транспортно-логистических операций с учетом особенностей перемещаемого груза – древесины.

1.2.1 Классификация лесных материалов и продукции из древесины

Профессор Уголев Б.Н. отмечает, что лесными товарами принято называть материалы и продукты, получаемые путем механической, механико-химической и химической переработки ствола, корней и кроны дерева. Все лесные материалы можно разделить на 7 групп (рис. 1.8) [32].



Рисунок 1.8 – Классификация лесоматериалов (по Уголеву Б.Н.)

Клееная древесина

При строительстве зданий и других архитектурных сооружений, при изготовлении мебели, в качестве декоративных элементов внутренней и наружной отделки помещений преимущественно применяется клееная древесина [35].

Существует большое разнообразие классификаций изделий из клееной древесины.

Клееную древесину, с учетом сырья из которого она изготовлена, классифицируют следующим образом (рис. 1.9) [36]:

1) Клееная массивная древесина. Эта группа включает изделия, полученные из пиломатериалов, склеенных чаще всего по длине, такие как доски пола, вагонка, плинтусы и т.п. Ещё один вариант – это склеивание по ширине реек, таким образом изготавливают клееные реечные щиты. При использовании склеивания по длине, ширине и толщине можно получить весьма габаритные изделия из клееной массивной древесины, поперечное сечение которых составляет по площади до 10^6 мм^2 , а длина до 50 м.



Рисунок 1.9 – Классификация клееных древесных материалов (по Волынскому В.Н.)

2) Клееная слоистая древесина. Эта группа клееных древесных материалов изготавливается из лущеного шпона (лиственных пород древесины), толщина

которого может составлять от 0,6 до 3 мм. В результате получают фанеру, изделия из древесно-слоистых пластиков, гнутоклеёные и плоскоклеёные детали, применяемые во многих отраслях промышленности, начиная от автомобилестроения и заканчивая производством тары.

3) Клееные материалы из измельченной древесины. Из измельченной древесины путем добавления связующего вещества получают древесностружечные и древесноволокнистые плиты.

4) Клееная комбинированная древесина. Это изделия, сочетающие в себе несколько выше рассмотренных вариантов клееной древесины, например, столярная плита, или мебельный щит (измельченная и слоистая древесина).

Клееная древесина, применяемая в строительной отрасли может быть классифицирована следующим образом (табл. 1.3) [37].

Таблица 1.3 – Классификация клееной древесины, применяемой в строительной отрасли

Составные элементы	Ориентация элементов изделий из клееной древесины		
	ОДНООСНАЯ	ДВУХОСНАЯ	ПРОИЗВОЛЬНАЯ
Шпон лущеный	LVL-брус, доски и бруски, изготовленные при склеивании шпона	Фанера общего и специального назначения	—
Полоса шпона лущеного	PSL-доски, бруски, изготовленные при склеивании параллельно расположенных полос шпона	OSL-доски, бруски, изготовленные при склеивании послойно ориентированных полос шпона	—
Стружка	—	OSB (ориентированно-древесно-стружечная плита)	ДС-П общего и специального назначения
Волокно	—	OMDF (ориентированно-древесно-волоконная плита средней плотности)	MDF (древесно-волоконная плита средней плотности)

По форме поверхности слоистая клееная древесина: плоская и профильная [38-40].

В зарубежной литературе представлены аналогичные классификации клееной древесины и композитных материалов из древесины [41].

Классификация конструкций из цельной и клееной древесины, применяемых в общественной, жилищной, промышленной и других отраслях строительства в новых, эксплуатируемых и реконструируемых зданиях и сооружениях представлена в своде правил СП 64.13330.2017 [42].

Конструкций из цельной и клееной древесины классифицируют по следующим основным признакам: функциональному назначению; условиям эксплуатации; сроку службы.

По функциональному назначению деревянные конструкции подразделяют на классы с учетом уровня ответственности зданий и сооружений по ГОСТ 27751 [43] и вида и пролета конструкций.

В зависимости от условий эксплуатации конструкции относят к классам эксплуатации, учитывающим эксплуатационные параметры относительной влажности, температуры воздуха в зоне расположения конструкций, характерные условия эксплуатации (в закрытых или открытых условиях). Учет классов условий эксплуатации осуществляют для назначения коэффициентов условия работы к расчетным сопротивлениям древесины, выбора типа клеев и защитных материалов при проектировании конструкций, а также для выбора системы контроля качества при изготовлении конструкций.

Срок службы зданий и сооружений массового строительства в обычных условиях эксплуатации (здания жилищно-гражданского и производственного строительства) должен составлять не менее 50 лет.

Из цельной и клееной древесины изготавливают арки, своды, балки, фермы, рамы, опоры воздушных линий электропередач и др. Пролеты несущих конструкций из древесины могут составлять более 100 м, высота – более 60 м.

Продукция из клееной древесины

1) Клееный брус

Клееный брус (табл. 1.5) прост и эффективен в использовании, что позволяет его применять для строительства домов (несущие стены, перегородки, оконные и дверные проёмы); монтажа сложных кровель, ледовых катков, торговых центров, аквапарков, мостов, вокзалов; для производства дверей,

лестниц, перил, подоконников, мебели и других столярных изделий; для строительства религиозных сооружений (церкви), школьных зданий и библиотек; для обустройства лаг пола и стропильных систем покатых крыш [44].

Таблица 1.5 – Основные характеристики клееного бруса

Полное название	клееный брус
Внешний вид	
Технология изготовления	массивная древесина (ель, пихта, сосна, пихта Дугласа и лиственница) нарезается на ламели (деревянные планки), которые склеиваются вместе под высоким давлением
Достоинства	• высокая прочность; • долговечность; • разнообразие размеров (более 40 м в длину); • разнообразие и оригинальность форм; • не подвержен деформации и растрескиванию; • устойчив к влаге и различным погодным условиям; • теплоизоляция и энергоэффективность; • экологичность.
Недостатки	• относительно высокая стоимость; • требует строго соблюдения технологии при производстве.
Область применения	• строительство зданий и сооружений • производство окон, дверей, лестниц, перил, подоконников; • производство мебели.
Особенности транспортировки	• возможна транспортировка пакетом; • требуется защита кромок груза от повреждения; • требуется защита от негативного воздействия факторов внешней среды (влаги, механические воздействия).

2) Фанера

Фанера (табл. 1.6) является одним из наиболее применяемых строительных материалов.

Таблица 1.6 – Основные характеристики фанеры

Полное название	фанера
Внешний вид	
Технология изготовления	заготовки из массивной древесины (чаще хвойных пород или березы) нарезают на тонкие листы, которые пропариваются и прессуются вместе с клеем, образуя тонкие слои, эти слои затем склеиваются в одно цельное изделие, образуя листовой материал
Достоинства	• невысокая стоимость; • высокая прочность; • малый вес; • повышенная влагостойкость; • легкости монтажа; • износостойкость; • простота механической обработки
Недостатки	• в состав некоторых видов фанеры входят вредные для человека вещества (формальдегид); • низкая долговечность; • склонность к деформации при длительном воздействии влаги.
Область применения	• мебельное производство; • строительство (перегородки, полы, крыши и отделка); • автомобилестроение, судостроение, вагоностроение; • производство тары
Особенности транспортировки	• возможна транспортировка пакетом; • требуется защита кромок груза от повреждения; • требуется защита от негативного воздействия факторов внешней среды (влаги, механические воздействия).

3) Мебельный щит

Таблица 1.7 – Основные характеристики мебельного щита

Полное название	Мебельный щит
Внешний вид	
Технология изготовления	древесина (береза, дуб, ясень, сосна и др.) подвергается обработке для удаления коры, сучков и других дефектов, затем она распиливается на тонкие листы, которые склеиваются вместе, образуя плоский лист
Достоинства	• высокая прочность; • долговечность; • устойчивость к деформациям; • простота механической обработки
Недостатки	• относительно высокая стоимость; • ограниченность в выборе пород древесины, из которых может быть изготовлен
Область применения	• мебельное производство (столов и столешниц, комодов, шкафов, кухонных фасадов, спальных гарнитуров и кроватей, декоративных элементов); • строительство (изготовление лестничных ступеней и пролетов, перегородок, подоконников, откосов, стеновых панелей, дверных полотен)
Особенности транспортировки	• возможна транспортировка пакетом; • требуется защита кромок груза от повреждения; • требуется защита от негативного воздействия факторов внешней среды (влаги, механические воздействия).

4) LVL-брус

Таблица 1.8 – Основные характеристики LVL-бруса

Полное название	<i>Laminated Veneer Lumber</i> – клееный брус из шпона
Внешний вид	
Технология изготовления	тонкие листы лущеного шпона древесины хвойных пород с параллельным расположением волокон в смежных слоях склеиваются в слои при помощи специального клеевого состава, выравниваются, упаковываются в пресс, под воздействием давления и температуры формируется лист
Достоинства	• стабильность линейных размеров, отсутствие деформаций и коробления при действии влаги; • высокие физико-механические показатели при изгибе, растяжении вдоль волокон, сжатии вдоль волокон, сдвиге; • невысокая плотность (550 кг/м³); • возможность изготавливать конструкции большой длины (до 18 м); • хорошие тепло- и шумоизоляционные свойства; • высокая огнестойкость; • легкость обработки в условиях производства и на строительных площадках; • возможность изготовления криволинейных изделий и элементов отделки любых радиусов изгибов; • простота и надежность соединений элементов.
Недостатки	• высокая стоимость; • невозможность ремонта в случае повреждения или гниения.

Область применения	• кровельные конструкции; • несущие конструкции (стены, перекрытия для крыш и полов, и пр.); • несущие балки мостов, шпалы, брус для профилирования и т.д.; • отделка внутреннего интерьера (лестницы, арки, любые декоративные элементы); • изготовление мебели; • балки, перемычки оконных и дверных проемов и элементы конструкций; • пояса двутавровых балок; • комбинированные балки; • конструкции пола; • стеновые конструкции; • диагональные связки и стропильные фермы; • балки пролетов и колонны; • элементы бетонной опалубки.
Особенности транспортировки	• возможна транспортировка пакетом; • требуется защита кромок груза от повреждения; • требуется защита от негативного воздействия факторов внешней среды (влага, механические воздействия).

5) CLT-панели

CLT-технология разработана в Европе, широко применяется с 2008 г. CLT-панели заменяют самые разные строительные материалы [45].

Таблица 1.9 – Основные характеристики CLT-панелей

Полное название	<i>Cross Laminated Timber</i> – перекрестно-клееная древесина (по российской нормативно-технической базе – древесина перекрестно-клееная (ДПК))	
Внешний вид		
Технология изготовления	массивная древесина (ель и сосна) в виде бревен распиливается на доски, которые склеиваются в панели, каждый следующий слой располагается перпендикулярно предыдущему	

Достоинства	• высокая прочность (сопоставима с характеристиками железобетона); • малый вес; • высокая надежность и долговечность; • высокие тепло- и шумоизоляционные свойства; • быстрая скорость монтажа; • могут применяться для создания больших пролетов; • экологическая безопасность.
Недостатки	• высокая стоимость; • ограниченный выбор в контексте дизайна и отделки; • склонность к деформации при высокой влажности и температуре.
Область применения	• стеновые панели; • перекрытия; • балки; • несущие опоры.
Особенности транспортировки	• возможна транспортировка пакетом; • требуется защита кромок груза от повреждения; • требуется защита от негативного воздействия факторов внешней среды (влаги, механические воздействия).

6) Древесностружечные плиты

Таблица 1.10 – Основные характеристики древесностружечных плит

Полное название	Древесностружечная плита (ДСтП) ГОСТ 10632-2014 [46]	
Внешний вид		
Технология изготовления	древесные частицы (стружка) смешиваются со связующим веществом неминерального происхождения и путем горячего прессования формируется плита, при необходимости вводятся специальные добавки	

Достоинства	• простота в обработке (плиты легко режутся, красятся и склеиваются); • невысокая стоимость.
Недостатки	• ДСтП класса эмиссии E2, E3, E4 являются токсичными для производства мебели: связующие смолы, которые применяются при его производстве, выделяют вредный для человека формальдегид; • ограниченная влагостойкость; • низкая прочность
Область применения	• изготовление корпусной, мягкой и другой мебели; • производство строительных элементов (в качестве опалубок, перегородок в помещениях, сухой штукатурки, в каркасно-панельном деревянном строительстве); • производство тары.
Особенности транспортировки	• возможна транспортировка пакетом; • требуется защита кромок груза от повреждения; • требуется защита от негативного воздействия факторов внешней среды (влага, механические воздействия).

ДСтП могут быть облицованы шпоном, бумагой, полимерными плёнками, пластиком.

Применяются ДСтП, облицованные пленками на основе термореактивных полимеров (ЛДСП), которые выгодно отличаются своей влагостойкостью, долговечностью и красивой текстурой при доступной цене и простоте в обработке.

Классификация ЛДСП по ГОСТ 32289-2013 [47] представлена в табл. 1.11.

Таблица 1.11 – Классификация ЛДСП

№ п/п	Критерий классификации	Виды ЛДСП
1	по физико-механическим свойствам	группы качества «А», «Б», «У» (плиты с улучшенными эксплуатационными свойствами)
2	в зависимости от выделения формальдегида в воздух	два класса эмиссии формальдегида – E1 и E2
3	в зависимости от показателей внешнего вида покрытия плиты	I и II сорт
4	по степени блеска покрытия	глянцевые (Г) и матовые (М)
5	по виду печати покрытия	одноцветные (Оц) и с печатным рисунком (Пр)
6	в зависимости от фактуры поверхности покрытия	гладкие (Гл) и рельефные (Р)

ГОСТ 32289 – 2013 [47] регламентирует размеры ЛДСП в длину от 1830 до 5680 мм, в ширину от 1220 до 1830 мм. Типовыми для российского рынка являются ЛДСП с габаритами: 2500x1850, 2620x1830, 2800x2070, 3060x1830, 3060x1220. Минимальная толщина составляет 3 мм с градацией в сторону увеличения в 1 мм. Оборудование большинства российских компаний настроено на выпуск ЛДСП толщиной 8, 10, 12, 16, 18, 20, 22, 25, 30, 32, 38 мм. По требованию заказчика некоторые производители готовы поставлять ЛДСП и большей толщины до 100 мм. Такая толщина требуется только для узкоспециализированных целей и не подходит для производства мебели. Чаще применяются плиты из ЛДСП средней толщины от 10 до 20 мм. По статистике чаще покупают ЛДСП толщиной 16 мм.

Масса плиты ЛДСП зависит от её размеров. ГОСТ 10632 – 2014 [46] устанавливает плотность (удельный вес) ЛДСП 550...820 кг/м³. Разброс значений плотности объясняется тем, что на массу плиты влияют не только размеры, но и другие факторы: качество и сорт сырья; плотность прессования, соединительные составы для склейки сырья и геометрия; влажность плиты.

Таким образом, одна плита ЛДСП размером 3060x1830x16 мм имеет массу от 49,3 до 73,5 кг, что превышает нормы разового подъема тяжестей для одного человека и требует применения средств механизации.

В результате приведенного анализа можно сделать вывод, что продукция из древесины в виде **листов, плит, панелей и щитов** имеет большую массу и транспортируется с применением стандартных ГЗУ.

Как отмечено во всех характеристиках продукции, при перемещении изделий из древесины необходимо учитывать особенности транспортировки с учетом защиты кромок от механического воздействия, защиты от воздействия факторов окружающей среды (повышенной влажности, дождя, открытого солнечного света и т.п.).

1.2.2 Особенности строения древесины

Древесина – материал растительного происхождения, непрерывно возобновляемый в природе, который с древних времен используется в разнообразных отраслях человеческой деятельности [48].

Дерево (рис. 1.10) – многолетнее растение с корнями, одревесневшим стволом, сохраняющимся в течение всей его жизни, и ветвями, образующими крону, высотой от 2 до 100 м, с продолжительностью жизни до 3,5 тыс. лет. При жизни каждая часть дерева выполняет свою определенную функцию, а в срубленном дереве имеет различное промышленное применение [49].

Промышленное использование кроны: из листьев (хвои) получают лекарственные препараты и витаминную муку – ценный продукт для животноводства и птицеводства; из ветвей производят технологическую щепу для производства тарного картона и древесноволокнистых плит [49].

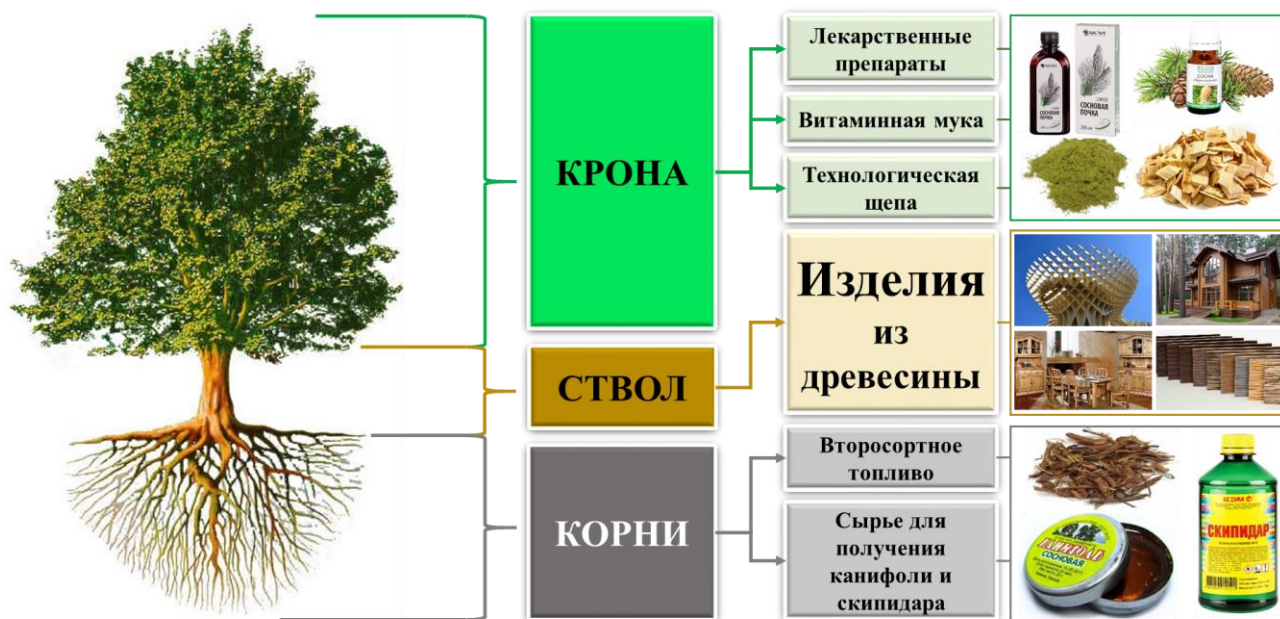


Рисунок 1.10 – Структура дерева и промышленное применение его частей

Ствол – часть дерева от корней до вершины, несущая на себе ветви. Строение ствола древесины показано на рисунке 1.11. Верхнюю тонкую часть ствола называют вершиной, нижнюю утолщенную часть – комлем. Ствол является основным источником сырья для производства изделий из древесины и имеет главное промышленное значение [49].

Корни применяются как второсортное топливо. Пни и крупные корни сосны через некоторое время после валки деревьев служат сырьем для получения канифоли и скипидара [49].

Древесина – материал неоднородного строения, что является результатом роста дерева. Каждый год происходит нарастание новых слоев клеток ранней (весенней) и поздней (летней) древесины, которые образуют годичные слои [49].

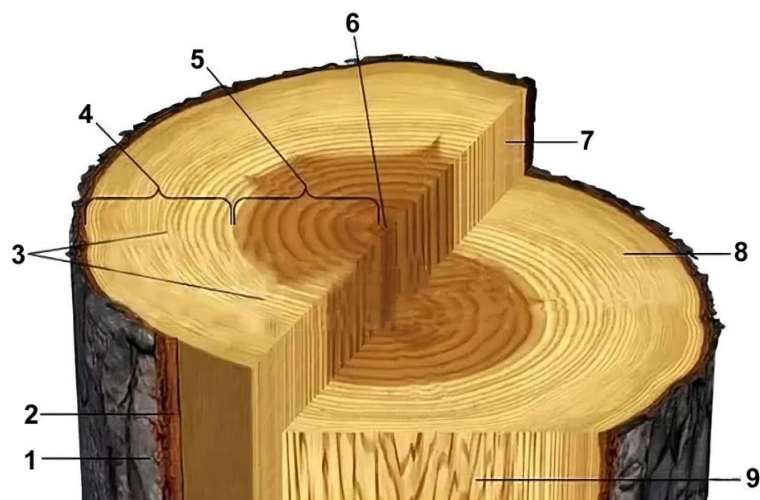


Рисунок 1.11 – Строение ствола дерева:

1 – кора; 2 – камбий; 3 – годичные кольца; 4 – заболонь; 5 – ядро; 6 – сердцевина;
7 – радиальный разрез; 8 – поперечный (торцовый) разрез; 9 – тангенциальный разрез.

Древесина в поперечном, радиальном и тангенциальном разрезах (рис. 1.11) значительно отличается по своему строению. Поперечный разрез образован перерезанием трахеид (волокон хвойных пород) и волокон либриформа и сосудов (у лиственных пород) нормально к их длине. Тангенциальный разрез получен перерезанием смоляных ходов и сердцевинных лучей нормально к их длине и частичным перерезанием волокон и сосудов параллельно их оси. Радиальный разрез образован перерезанием волокон и сосудов параллельно их длине [49].

Древесина является анизотропно-ортотропным материалом волокнисто-слоистого, разноклеточного строения с пустотами. Анизотропия древесины заключается в неодинаковости физических свойств (прочность, модуль упругости, теплопроводность, обрабатываемость резанием и др.) в разных направлениях. При этом механические свойства древесины различны по

главным взаимно перпендикулярным направлениям – продольном, радиальном и тангенциальном, – что называют ортотропией [50].

Таким образом, физико-механические свойства древесины различаются в разных направлениях, что необходимо учитывать при выполнении транспортно-логистических операций заготовок и готовых изделий из древесины.

Исследованием конструкционных свойств древесины и деревокомпозитных материалов занимались Е.К. Ашкенази, В.Л. Баженов, Ф.П. Белянкин, А.М. Иванов, Ю.М. Иванов, Л.М. Ковальчук, В.А. Куликов, Б.В. Лабудин, Н.Л. Леонтьев, В.И. Мелехов, В.В. Памфилов, Ю.С. Соболев, Ю.Ю. Славик, А.А. Тамби, Б.Н. Уголев, П.Н. Хухрянский, А.Н. Чубинский, В.А. Шамаев и др.

1.3 Технологическая оснастка и грузозахватные устройства для перемещения конструкций из древесины

В общепринятой практике перемещение КДК и изделий из древесины осуществляют с помощью грузоподъемных кранов общего назначения, оснащенных универсальным ГЗУ – крюком, закрепленным в крюковой подвеске. Подвеска связана с механизмом подъема груза грузоподъемного крана посредством системы подвижных и неподвижных блоков, огибаемых стальным канатом – полиспастом (рис. 1.12). Для подъема и перемещения конструкций из древесины применяют автомобильные, консольно-поворотные, мостовые, козловые, башенные и другие грузоподъемные краны.

При перемещении изделий из древесины преимущественно производят обвязку груза мягкими стропами, после чего навешивают на крюк грузоподъемного крана и адресно перемещают.



Рисунок 1.12 – Крюковая подвеска и полиспаст автомобильного крана

При применении специализированного ГЗУ взаимодействие с грузом осуществляется подхватом – КДК опираются на выступающие элементы ГЗУ, зажимом – удерживание груза происходит силами трения при зажатии между КЭ ГЗУ, подвесом – удерживание груза происходит за счет создания вакуума между элементами захвата и грузом в зоне контакта (рис. 1.13). В зависимости от формы и массы перемещаемых изделий применяют специализированные ГЗУ: вилочный, фрикционный или вакуумный захват [10].

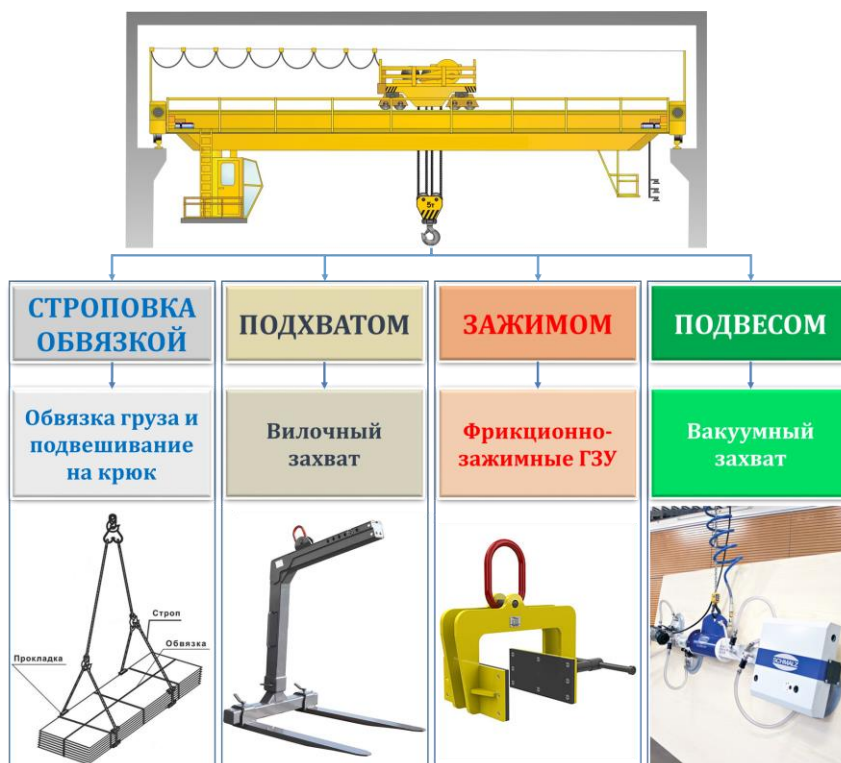


Рисунок 1.13 – Классификация способов крепления плоских грузов к крюку

Одновременно можно отметить, что в отечественной практике транспортно-технологические операции конструкций из древесины выполняют с применением универсальных ГЗУ для металлоизделий без учета особенностей строения и упруго-вязких характеристик древесины. В результате возможно нарушение целостности фасадной поверхности и кромок изделий при перемещении.

Для перемещения изделий из массивной и клееной древесины применяются фрикционно-зажимные грузозахватные устройства [5] различных конструкций (рис. 1.14).

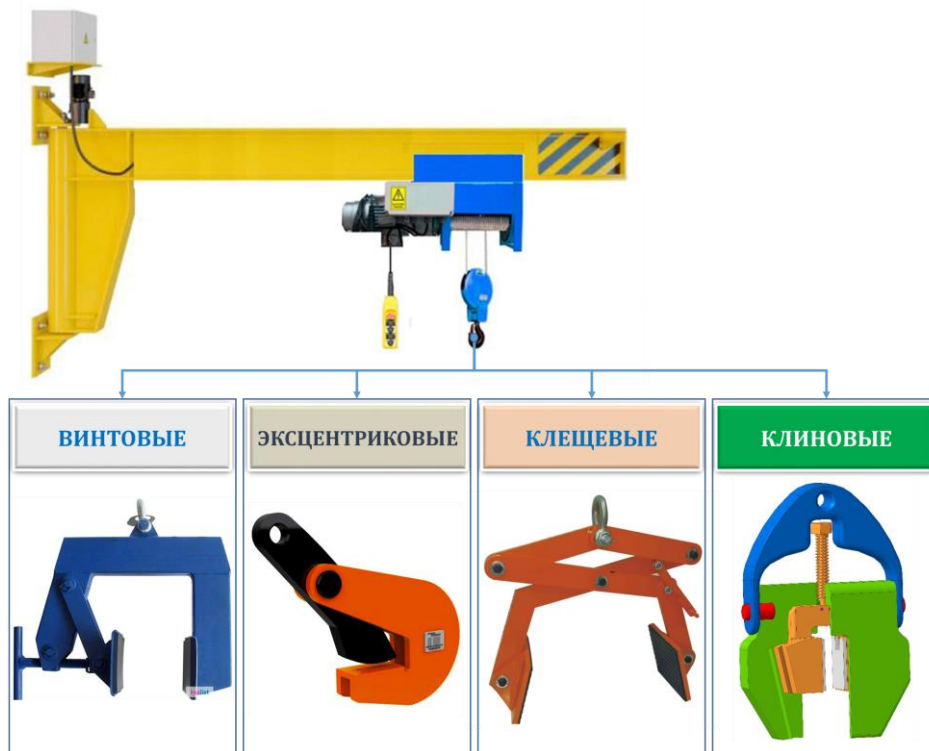


Рисунок 1.14 – Классификация фрикционно-зажимных ГЗУ для перемещения изделий из древесины

1.3.1 Строповка груза обвязкой

Перемещение КДК и панелей из массивной и клееной древесины осуществляется подвешиванием к грузоподъемному средству или технологическим захватам обвязкой стальными канатами или жесткими и мягкими обвязками (рис. 1.15). Существенный недостаток этого способа – повреждение кромок изделий из древесины (рис. 1.5). Для предохранения

кромок от повреждения применяют специальные подкладки под строп, что усложняет операцию и не гарантирует полную защиту груза от повреждения [51-53].

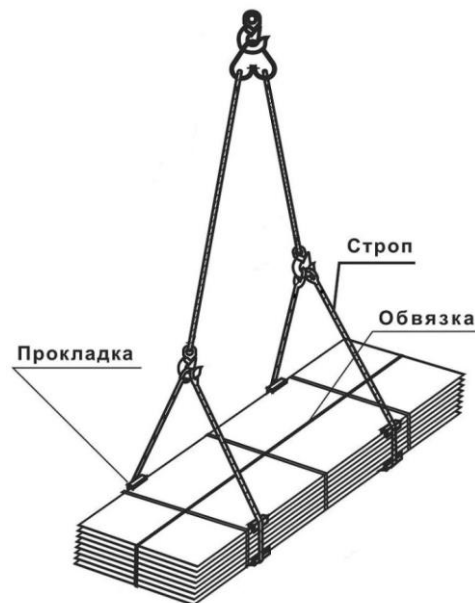


Рисунок 1.15 – Строповка КДК и панелей из массивной и клееной древесины обвязкой

1.3.2 Вилочные захваты

КДК и изделия из массивной и клееной древесины можно перемещать подхватом вилочным захватом (рис. 1.16), кантовка изделия при таком способе затруднена и изделия возможно перемещать только пакетом, а не поштучно. Рекомендовано применять поддоны и паллеты для размещения на них деревянных панелей.



Рисунок 1.16 – Вилочные захваты для навешивания на крюк крана

1.3.3 Винтовые захваты

Применяются фрикционные винтовые ГЗУ – такелажные струбцины (рис. 1.17). Принцип работы такелажной струбцины заключается в зажатии перемещаемого изделия винтом и удерживании его силами трения между КЭ и поверхностью изделия из древесины [54].



Рисунок 1.17 – Такелажная струбцина

К достоинствам струбцин следует отнести универсальность применения, к недостаткам – создание большого неконтролируемого усилия зажатия изделий из древесины, что сопряжено с повреждением их поверхности. Поэтому основная область их применения ограничивается перемещением грузов, имеющих достаточно высокую контактную прочность. Это изделия плоской формы из металла, железобетона и др. [55].

Для перемещения КДК применяют винтовые струбцинные захваты с резиновыми контактными элементами, которые обеспечивают надежный контакт с поверхностью деревянных панелей [55, 56]. Конструкция таких ГЗУ расширяет диапазон размеров (толщины) зажимаемого груза (рис. 1.18).

К недостаткам относятся: невысокая надежность удерживания в связи с ослабеванием усилия предварительного зажатия изделия из древесины струбциной, что объясняется реологическими свойствами древесины; более массивная конструкция, необходимая для жесткости корпуса, что обеспечивает усилие предварительного зажатия груза. Для перемещения длинномерных изделий из древесины применяют траверсы с несколькими струбцинами [55].

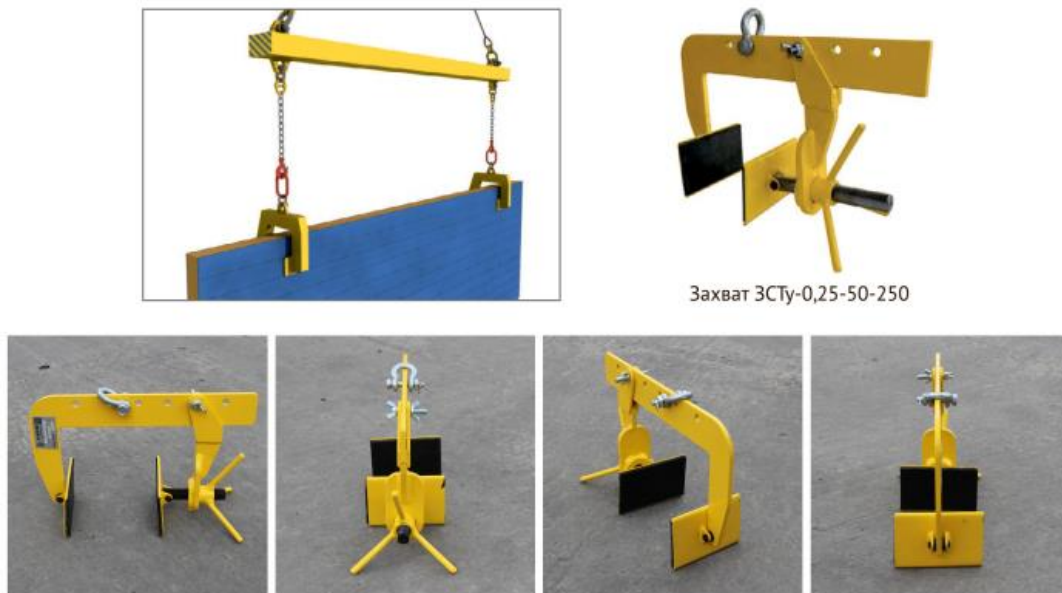


Рисунок 1.18 – Винтовой захват для панелей из древесины

1.3.4 Клещевые захваты

Клещевые захваты (рис. 1.19) выполняются как рычажные системы в виде ножниц, рычаги которых имеют свободные концы, захватывающие груз. К преимуществам такого типа захватов относятся конструктивная простота и надежность в работе [55]. Существенным недостатком является то, что при встрече на пути перемещения препятствия груз может самопроизвольно выпасть. Для предотвращения этого необходимо дополнительно оснастить захват предохранительными и запорными устройствами, что усложнит конструкцию.



Рисунок 1.19 – Клещевые захваты ножничного типа для панелей

1.3.5 Эксцентрикoвые захваты

Эксцентрикoвые захваты (рис. 1.20) – универсальные грузозахватные устройства. Прижим и закрепление перемещаемого груза происходит между одним или двумя контактными элементами, выполненными в форме эксцентриков [55].

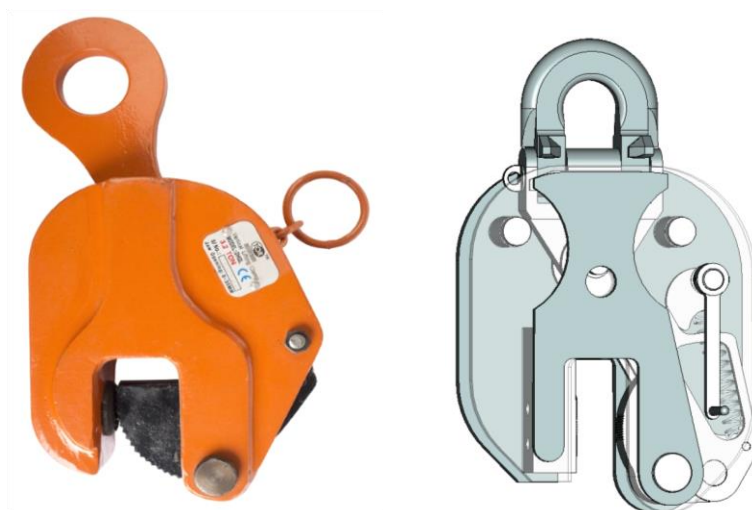


Рисунок 1.20 – Эксцентрикoвые захваты для панелей

Основная область применения – транспортирование металлических листовых материалов. Перемещаемые листы или панели могут находиться в горизонтальном или вертикальном положении [51]. Небольшая площадь контакта эксцентрика с лицевой поверхностью изделия из древесины ведет к образованию на ней характерного отпечатка, что ограничивает применение эксцентрикoвых ГЗУ для перемещения КДК.

1.3.6 Клиновые захваты

Клиновые ГЗУ [5] преимущественно применяются для подъема и транспортирования грузов, имеющих полость, выполненную в виде круглого отверстия необходимого диаметра для взаимодействия с распорными элементами (рис. 1.21, а). Реже клиновые ГЗУ применяются для подъема изделий за выступающие элементы (рис., 1.21, б). Для бетонных и железобетонных изделий применяют клиновое стержневое ГЗУ (рис., 1.21, в).

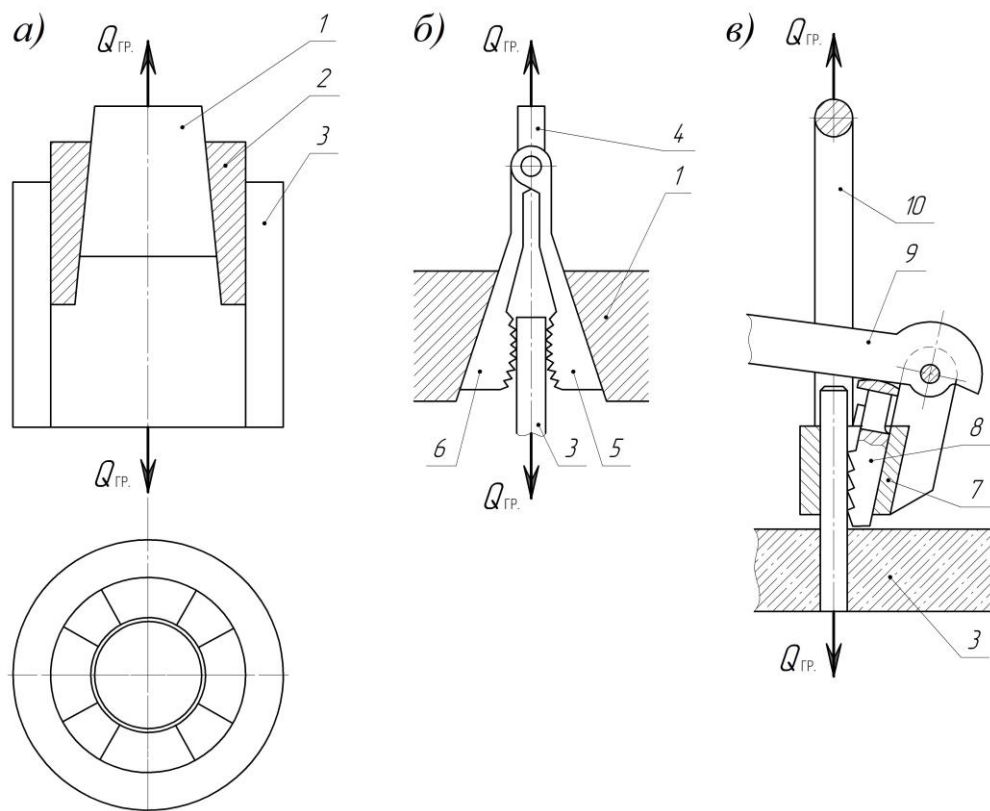


Рисунок 1.21 – Клиновые ГЗУ: а) для захвата за стенки цилиндрических отверстий; б) рычажно-клиновое для захвата за выступающие элементы; в) для захвата за стержни (штыри) для бетонных и железобетонных изделий; 1 – конусообразный клин; 2 – конический сегмент; 3 – груз; 4 – подъемное звено; 5, 6 – распорные элементы; 7 – полый корпус; 8 – зубчатый клин; 9 – рычаг; 10 – петля.

Захват осуществляется за стержни (штыри), заделанные в изделие. Стоит отметить, что представленные конструкции клиновых ГЗУ практически не применяются при транспортировке изделий из древесины.

1.3.7 Вакуумные захваты

Вакуумные захваты (рис. 1.22) удерживают груз за счет разрежения в специальной камере, которая плотно прилегает к плоской поверхности перемещаемого изделия. В основном такие захваты используются на изделиях с относительно гладкой поверхностью и воздухонепроницаемостью – при производстве стекла и в деревообрабатывающей промышленности. По принципиальной схеме устройства вакуумные ГЗУ бывают: безнасосные, эжекторные и насосные [55].

При сравнении с рассмотренными выше ГЗУ, вакуумные захваты имеют достоинства: быстрота захвата и освобождения груза, отсутствие повреждения перемещаемых изделий. К недостаткам вакуумных ГЗУ относятся: сложность конструкции, наличие сопровождающей аппаратуры, ограниченная грузоподъемность, повышенные требования к контактной поверхности с захватом перемещаемых изделий, большие габариты и масса захвата.



а)



б)

Рисунок 1.22 – Применение вакуумных ГЗУ:

а – вакуумный подъемник VacuMaster HHVM; б – применение вакуумных захватов в деревообрабатывающих цехах

1.3.8 Роботизированные захваты

Роботизированные (автоматические) захваты (рис. 1.23) позволяют существенно повысить производительность труда при выполнении однотипных операций в производственном процессе. Такие захваты удерживают груз за счет сил трения или за счет специальных конструктивных элементов. Привод захвата может быть пневматический, электрический и гидравлический.



Рисунок 1.23 – Применение роботизированных захватов

1.4 Контактные элементы фрикционно-зажимных грузозахватных устройств

В фрикционно-зажимных ГЗУ груз удерживается силами трения между контактной поверхностью груза и КЭ, поэтому КЭ являются важными ответственными изделиями.

КЭ фрикционно-зажимных ГЗУ выполняют в виде прижимных лап, башмаков, пластин или эксцентриков.

Эксцентрики применяются в эксцентриковых ГЗУ, конструкция которых рассмотрена выше (п. 1.3.5).

КЭ прикрепляют к ГЗУ жестко (рис. 1.24, *а*), шарнирно на цилиндрических (рис. 1.24, *б*) и шаровых (рис. 1.24, *в*) шарнирах. Применяют и другие способы крепления КЭ [5]. Шарнирное крепление обеспечивает самоустановку и плотное прилегание КЭ к контактной поверхности перемещаемого изделия, компенсируя неточности изготовления, монтажа ГЗУ и возникающие в процессе работы упругие деформации.

По конструкции, в зависимости от транспортируемого груза, применяются жесткие, полужесткие и мягкие КЭ.

Конструкцию КЭ выбирают в зависимости от формы, размеров и способа перегрузки захватываемого груза. Основными требованиями к форме и материалу КЭ являются обеспечение высокого коэффициента трения между

контактирующими поверхностями, сохранности поверхности поднимаемого груза, длительного срока службы и неповреждаемости поверхности КЭ.

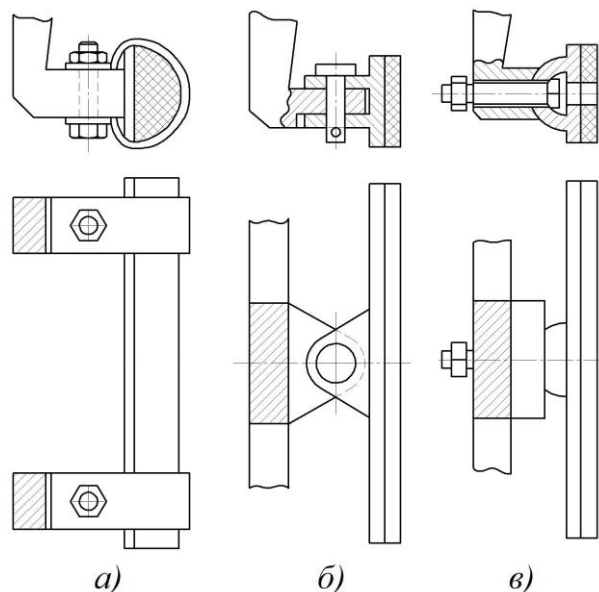


Рисунок 1.24 – Крепление контактных элементов:
а – жесткое; б – балансирное; в – шаровое.

1.4.1 Жесткие контактные элементы

Жесткие КЭ (рис. 1.25) изготавливают из конструкционной высокоуглеродистой стали и подвергают термообработке.

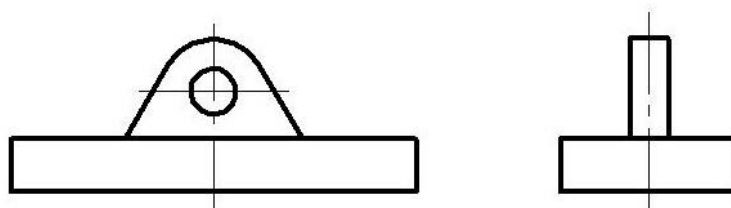


Рисунок 1.25 – Конструкция гладких металлических КЭ

В Северном (Арктическом) федеральном университете имени М.В. Ломоносова разработана конструкция фрикционно-зажимного ГЗУ с жесткими КЭ, закрепленными шарнирно на цилиндрических шарнирах (рис. 1.26). Основная весовая нагрузка с КЭ передается через рычаги 3 на поперечную балку 5 с проушиной 6 для навешивания на крюк грузоподъемной машины. ГЗУ освобождено от действия весовой нагрузки, поэтому на винт не действуют изгибающие нагрузки. Это позволяет применять длинные винты,

обеспечивающие большой диапазон размеров сечения элементов перемещаемых деревянных конструкций [57].

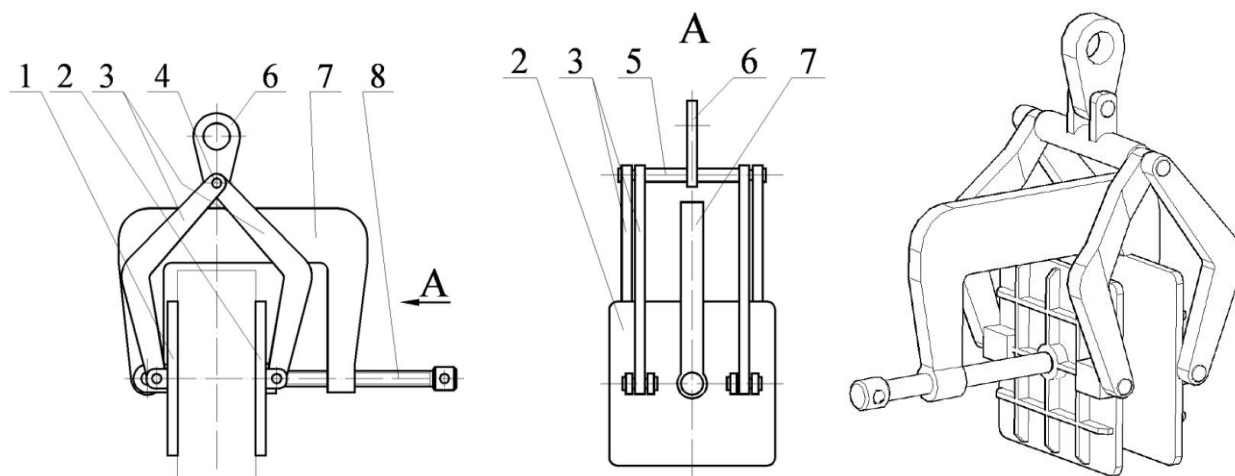


Рисунок 1.26 – Фрикционное грузозахватное устройство с жесткими КЭ:

- 1 – опорный контактный элемент; 2 – прижимной контактный элемент; 3 – рычаг; 4 – ось; 5 – поперечная балка; 6 – проушина, 7 – зажимное устройство; 8 – зажимной винт

1.4.2 Упругоподатливые контактные элементы

Полужесткие КЭ выполняют из металла с накладкой из толстой резины или конвейерной ленты (рис. 1.27), мягкие – из металла с накладкой из пористой резины и других аналогичных материалов.

Резина (от латинского "resina", в переводе означает "смола") – эластичный материал, получаемый методом температурной стабилизации (вулканизации) натурального и синтетического каучука.

При воздействии высокой температуры на каучук в присутствии серы (вулканизатор) происходит «сшивание» молекул каучука в единую пространственную сетку, в результате получается эластичный полимер – резина.

При отсутствии нагрузки цепочки углерода в резине имеют скрученный вид. При приложении нагрузки происходит еще большее скручивание цепочек (сжатие) или раскручивание (при растяжении). После снятия нагрузки изделие приобретает прежнюю форму. Поэтому резина широко применяется во многих отраслях промышленности.

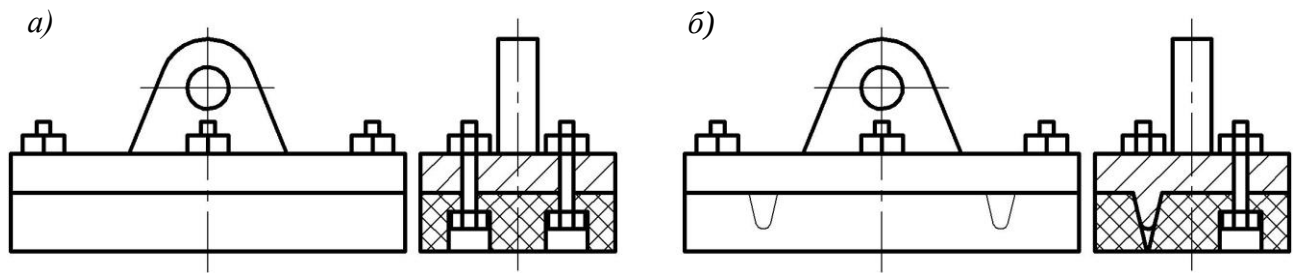


Рисунок 1.27 – Конструкция КЭ: *а* – с накладкой из толстой резины; *б* – то же, с шипами внутри.

Применение резины для накладок на КЭ ГЗУ при взаимодействии с массивной или клееной древесиной связано с рядом достоинств этого материала: высокий коэффициент трения в паре резина-древесина, эластичность, износостойкость, высокие прочностные качества, невысокая стоимость и доступность. В большинстве случаев резина имеет черный цвет («черная» резина), что объясняется содержанием сажи и диоксида кремния. Эти вещества армируют резину и повышают эксплуатационные свойства: упругость, износостойкость, долговечность и др. При этом проявляется существенный недостаток резины – на контактной фасадной поверхности изделий из древесины остаются следы – темные отпечатки (рис. 1.28).



Рисунок 1.28 – Отпечаток на контактной поверхности после взаимодействия обрешиненного контактного элемента с образцом из древесины сосны

Применение обрешиненных КЭ ограничено жесткими требованиями к изменению внешнего вида лицевой поверхности перемещаемых изделий из массивной и клееной древесины.

ГОСТ 7338-90 [58] установлены 3 степени твердости резиновых пластин: М – мягкая; С – средняя; Т – повышенная.

Силиконовая резина

Альтернативой «черной» резине может быть силикон – материал без применения в составе сажи, который не оставляет следов на контактной поверхности. Силиконовые резины получают на основе силоксановых (силиконовых, кремнийорганических) каучуков [59]. В качестве наполнителя для армирования и повышения эксплуатационных характеристик в силиконовые резины вводят различные формы кремнезема: аэросилы; белая сажа (силика, осажденный диоксид кремния); диатомиты. Эти наполнители имеют белый или светлый оттенок, который и определяет окраску силиконовой резины. Такая резина не оставляет отпечатков на контактных поверхностях при взаимодействии с древесиной. К достоинствам силиконовой резины дополнительно следует отнести высокие адгезионные свойства и коэффициент трения в паре с древесиной, долговечность, теплостойкость. К недостаткам – более низкие, по сравнению с «черной» резиной, нестабильные прочностные характеристики и высокая стоимость.

Пластины из силиконовых резин поставляются: силиконовые пластины пищевые (ТУ 2500-281-00152106-98); вакуумные силиконовые пластины (ТУ 2534-022-00152106-00) силиконовые пластины для авиационной техники (ТУ 38 1051959-2020), силиконовые пластины (ТУ 2543-141-40245042-2008).

Применение в КЭ ГЗУ силиконовой резины позволяет избежать появления окраски на поверхности древесины. В конструкциях ГЗУ накладки из силиконовой резины практически не применяются, свойства их изучены недостаточно, требуется проведения дополнительных целенаправленных исследований.

1.4.3 Контактные элементы с повышенной удерживающей способностью

Древесина, как материал, в отличие от однородных твердых материалов, обладает рядом особенностей: пластичностью, деформативностью, меньшей прочностью, требующей щадящего отношения [9].

Это ограничивает применение фрикционно-зажимных ГЗУ (рис. 1.26), удерживающих груз за счет сил трения, т.к. при перемещении древесины сложно контролировать усилие зажатия и возможно выскальзывание груза из захвата [9].

Применение гладких и упругоподатливых КЭ в фрикционно-зажимных ГЗУ требует создания большого усилия прижатия КЭ к поверхности перемещаемого груза, обеспечивающего достаточные для надежного удерживания груза силы трения, но и это не дает 100% гарантии от выскальзывания груза из захвата. Способы повышения удерживающей способности КЭ приведены в табл. 1.12.

Основное преимущество применения насечки и шипов – это значительно больший коэффициент взаимодействия, по сравнению с коэффициентом трения, применяемым при расчетах ГЗУ с гладкими контактными элементами. Силы, удерживающие ГЗУ на зажимаемой конструкции, с применением КЭ с насечкой или шипами, значительно выше, чем силы трения, а значит выше надежность удерживания, меньше усилия распора и, следовательно, меньше вес и габариты проектируемых ГЗУ [60]. Недостатком применения таких КЭ является технологический след после взаимодействия КЭ с поверхностью перемещаемого изделия.

Для изготовления КЭ с насечкой применяют малоуглеродистую качественную конструкционную сталь 15 или легированную 15Х с цементацией на глубину 0,8 мм, среднеуглеродистую качественную конструкционную сталь 45 или легированную 45Х с поверхностной или объемной закалкой и низкотемпературным отпуском.

Известны конструкции ГЗУ с ошипованными КЭ, применение которых позволяет обеспечить высокую надежность грузотранспортных операций и практически исключить возможность срыва и падения груза. Это направление является новым и недостаточно изучено. В САФУ имени М. В. Ломоносова проведены исследования по совершенствованию конструкции ГЗУ, оснащенных ошипованными КЭ (рис. 1.29) [57]. Предложенное устройство позволяет исключить негативное влияние эластических деформаций древесины на процесс

удерживания груза, повысить надежность и безопасность работы ГЗУ при перемещении деревянных конструкций [61].

Таблица 1.12 – Основные направления повышения удерживающей способности КЭ для надежного перемещения изделий из древесины

	Направление повышения удерживающей способности КЭ	Конструкция КЭ
1	Насечка (рифления) на контактной поверхности КЭ	
2	Шипы на контактной поверхности КЭ	
3	Кулачки на пружине	
4	Создание вакуума	

Ошипованные КЭ разного профиля, выполненные из стали, имеют ограниченное применение из-за сложности конструкции и способа крепления шипов [9].

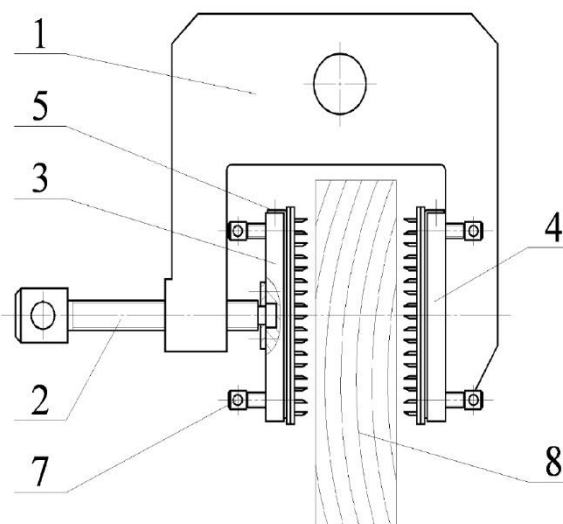


Рисунок 1.29 – Грузозахватное устройство с ошипованными контактными элементами для перемещения деревянных конструкций: 1 – П-образный корпус; 2 – зажимной винт; 3 – подвижный контактный элемент; 4 – неподвижный контактный элемент; 5 – металлическая зубчатая пластина; 7 – отжимной винт; 8 – перемещаемая деревянная конструкция

КЭ могут быть изготовлены с применением аддитивных технологий из инженерных полимерных материалов, что позволяет уменьшить затраты на их изготовление, упростить технологию изготовления, обеспечивая качество рабочей поверхности без применения дополнительной механической обработки.

1.5 Применение субтрактивных и аддитивных технологий для производства грузозахватных устройств

В технологии машиностроения для получения деталей с требуемыми размерами, нормами точности, допусками форм и расположения поверхностей применяют механические и физико-технические методы обработки, основанные на удалении «лишнего» материала из массива исходной заготовки. Термин «субтрактивные» (с англ. *subtractive* – вычитание) технологии, применяемый в настоящее время для разграничения традиционных способов и новых аддитивных методов, является ретронимом и подразумевает традиционные методы изготовления деталей [62].

Технологии механообработки могут быть замещены аддитивными технологиями. Название «*Additive Fabrication*» (аддитивные технологии)

происходит от латинского *additivus* – «прибавляемый» и английского *add* – «добавлять».

Аддитивные технологии, называемые также 3D-печатью, в современном понимании предполагают создание изделия на основе CAD-данных (трехмерной компьютерной модели) методом послойного добавления материала. Такой процесс называют «выращиванием» или «технологиями послойного синтеза». Эта технология применяется для быстрого изготовления изделий любой сложной формы [9].

Аддитивное производство предполагает несколько последовательных этапов (рис. 1.30): 1) создание CAD-модели; 2) создание STL-файла и разделение модели на слои в специальной компьютерной программе, называемой «слайсером» (создание G-кода); 3) печать на 3D-принтере; 4) постобработка.

Таким образом ключевыми компонентами аддитивных технологий являются 3 составляющих: «добавление» – «CAD-модель» – «послойно».



Рисунок 1.30 – Последовательность создания изделия методом аддитивных технологий

Аддитивные технологии производства по сравнению с субтрактивными обладают преимуществами:

- отсутствие (или незначительное количество) отходов производства;
- возможность создавать сложные по форме детали с высокой точностью;
- не требуется доработка готового изделия;
- отсутствие швов;
- возможность изготовить деталь «на месте» (при наличии соответствующего оборудования);

- высокая скорость производства конструктивно сложных деталей.

Терминология «аддитивное производство» закреплена в стандарте ASTM F2792 и в ГОСТ Р 57558-2017: «Аддитивное производство (аддитивный технологический процесс) (*additive manufacturing*) – процесс изготовления деталей, который основан на создании физического объекта по электронной геометрической модели путем добавления материала, как правило, слой за слоем, в отличие от вычитающего (субтрактивного) производства (механической обработки) и традиционного формообразующего производства (литья, штамповки) [63].

Ранее аддитивные технологии применялись как технологии быстрого прототипирования. Сейчас быстрое прототипирование – одна из областей применения аддитивных технологий, т.к. границы применения аддитивных технологий значительно расширились благодаря созданию большой номенклатуры материалов с различными свойствами и доступного оборудования для 3D-печати.

Термин "быстрое прототипирование" используется в различных отраслях промышленности для описания процесса быстрого создания системы или ее части перед окончательным выпуском или коммерциализацией. Другими словами, акцент делается на том, чтобы создать что-то быстро, и чтобы результатом был прототип или базовая модель, на основе которой будут созданы дальнейшие модели и, в итоге, конечный продукт [64].

Аддитивные технологии охватывают многие сферы деятельности человека: дизайн, архитектура, археология, палеонтология и др. Специалисты разных профессий применяют 3D-принтеры для реализации своих идей и проектов. Активно создаются роботизированные комплексы для «печати» быстротвердеющими бетонными смесями, что позволяет сократить сроки строительства и повысить качество зданий и сооружений. Аддитивные технологий эффективно применяются в различных областях промышленности: авиация, судостроение, машиностроение, медицина и восстановительная хирургия.

Исходными материалами могут быть жидкие (фотополимерные смолы, воски, бетон), 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 [9].

Аддитивные технологии могут быть применены при создании прототипов и готовых функциональных изделий [65].

Доступной и простой технологией быстрого прототипирования является *FDM*-технология – метод послойного наплавления расплавляемых нитевидных полимеров. Ключевым компонентом в *FDM*-технологии является филамент – нить пластика, которая выдавливается через подогреваемое сопло на стол *3D*-принтера. Нить расплавляется и наносится в определенных координатах слой за слоем, в результате чего получается объемная физическая модель [65].

Производители расходных материалов для *FDM*-печати предлагают филаменты с различным составом и свойствами. Наиболее распространенными филаментами из термопластических полимеров являются *PETG* (полиэтилентерефталат-гликоль), *ABS* (акрилонитрилбутадиенстирол) и *PLA* (полилактид) [65].

Применяется современный филамент «*PLA+*» с улучшенными характеристиками, основой которого является кукурузный крахмал или сахарный тростник. Достоинства «*PLA+*»: биоразлагаемый, безвредный для человека, обладает высокими механическими характеристиками, отличается улучшенной межслойной адгезией и доступностью (невысокой стоимостью). Достоинства и недостатки филамента «*PLA+*» представлены на рис. 1.31 [65].

Для определения характеристик прочности изделий из филамента «*PLA+*» [66] проведены испытания в соответствии со стандартами [67-70]. Предел прочности на растяжение полимерного материала «*PLA+*» составляет 26...38 МПа [65].



Рисунок 1.31 – Достоинства и недостатки изделий из «PLA+»

В технологии стереолитографии *SLA* (*stereolithography apparatus*) используются смолы, отверждаемые воздействием ультрафиолетового света с длиной волны в среднем от 355 до 405 нм. Печатная платформа (стол) 3D-принтера погружается в специальную ванну с находящейся там жидкой фотополимерной смолой (рис. 1.32). На поверхность стола направляют ультрафиолетовый лазерный луч, который точно фокусируется в заданных координатах. В результате воздействия ультрафиолета слой фотополимера затвердевает. Таким образом, при «засветке» слой за слоем 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* [71-75].

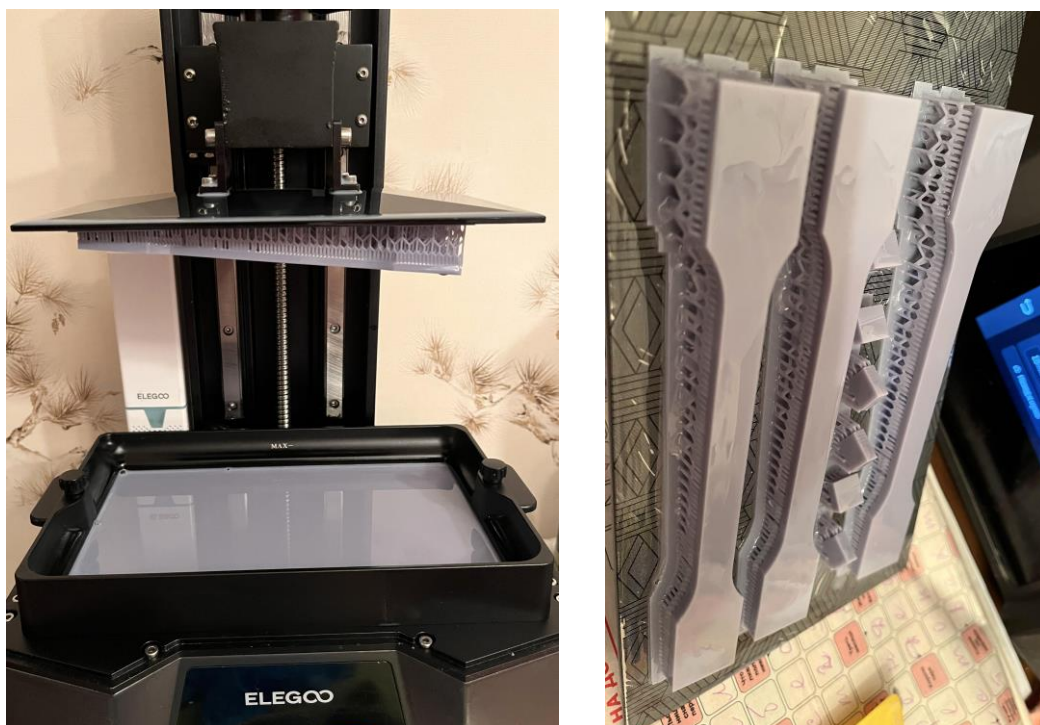


Рисунок 1.32 – Изготовление изделий по технологии *MSLA* из фотополимерной смолы «*ABS-like*»

1.6 Особые требования к конструкции грузозахватных устройств для перемещения изделий из древесины

Рассмотренные в п. 1.3 конструкции фрикционно-зажимных ГЗУ имеют существенные недостатки: невысокая надежность удерживания в связи с ослабеванием усилия предварительного зажатия изделия из древесины захватом, что связано с реологическими свойствами древесины; металлоемкая и габаритная конструкция захвата, обеспечивающая жесткость корпуса и усилие предварительного зажатия груза (табл. 1.13).

В результате проведенного анализа, основные требования к фрикционно-зажимным ГЗУ для перемещения изделий из древесины сводятся к следующим [7]:

- 1) надежное удерживание перемещаемого груза КЭ ГЗУ;
- 2) автоматическое ограничение усилия зажатия груза КЭ ГЗУ с учетом сохранности лицевой контактной поверхности перемещаемого изделия;
- 3) обеспечение ГЗУ возможности пространственной ориентации груза при кантовочных операциях.

Таблица 1.13 – Способы перемещения изделий из древесины

Способ крепления груза	Вид ГЗУ	Достоинства ГЗУ	Недостатки ГЗУ
Строповка обвязкой	-	Удобство перемещения груза пакетом в упаковке	Возможно повреждение кромок груза
Подхватом	Вилочные захваты	Удобство перемещения груза пакетом в упаковке (на поддонах, паллетах)	Невозможность перемещения крупногабаритных изделий поштучно; невозможность кантовки
Зажимом	Винтовые захваты	Универсальность применения	Невысокая надежность удерживания в связи с ослаблением усилия предварительного зажатия изделия из древесины; массивная конструкция корпуса захвата
	Эксцентриковые захваты	Универсальность применения	Повреждение контактной поверхности перемещаемого груза с невысокой контактной прочностью; ограниченный диапазон размеров перемещаемого груза
	Клещевые захваты	Конструктивная простота и надежность в работе	Самопроизвольное выпадение груза при встрече на пути перемещения препятствия
	Клиновые захваты	Высокая надежность; не требуется контролировать усилие зажатия КЭ; минимальная вероятность повреждения контактной поверхности перемещаемого груза	Ограниченный диапазон размеров перемещаемого груза
Подвесом	Ваккумные захваты	Перемещение грузов поштучно; удобство кантовки	Сложность конструкции, требуют наличия сопровождающей аппаратуры, ограниченная грузоподъемность, повышенные требования к контактной поверхности с захватом перемещаемых изделий, большие габариты и масса

Таким образом, сделан вывод о том, что конструкции стандартных ГЗУ не полностью соответствуют перечисленным требованиям, не обеспечивая качественного и бездефектного перемещения изделий из древесины. При их применении образуются дефекты (вмятины, заломы, отслоение покрытия) на

контактной поверхности перемещаемого груза, выходящие за пределы нормативных требований.

В связи с возрастанием объемов производства изделий из древесины, КДК и др. следует обратить внимание на создание новых технических и технологических решений для выполнения безопасных грузотранспортных операций с изделиями из древесины.

Для выполнения транспортно-логистических операций в технологическом процессе производства изделий из древесины необходимо разработать специальные ГЗУ с учётом особенностей строения древесины, ее реологических и анизотропных свойств и сохранением качества контактной поверхности в соответствии с требованиями правил безопасности при выполнении работ [15-16]. В настоящее время адаптированные технические решения для надежного перемещения специализированных изделий из древесины практически отсутствуют, поэтому создание таких решений является актуальной задачей.

1.7 Цель и задачи исследования

На практике логистические перемещения деревянных конструкций и изделий из древесины осуществляется с помощью стандартных ГЗУ, предназначенных для перемещения изделий с высокой контактной прочностью без учета особых требований к изделиям из древесины как деликатно перемещаемого груза. Грузотехнологические операции являются вспомогательными, но трудоемкими и занимают значительную долю в технологическом процессе производства изделий из древесины. Без современного технологического оснащения невозможно совершенствовать технологический процесс производства изделий из древесины.

Актуальная задача бездефектного и безопасного перемещения изделий из древесины может быть решена совершенствованием конструкции и разработкой новых быстросъемных фрикционно-зажимных ГЗУ с ошипованными КЭ или с клиновыми КЭ из упругоподатливых материалов.

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.

Для достижения цели определены **задачи** исследования:

1. Провести аналитический обзор проведенных ранее исследований контактного взаимодействия древесины с ошпированными и упругоподатливыми КЭ 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 ошпированными КЭ ГЗУ.
3. Разработать математическую модель контактного взаимодействия с древесиной самозажимных ГЗУ, оснащенных упругоподатливыми КЭ.
4. Создать методику проведения экспериментальных исследований определения коэффициента сцепления ошпированных 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.

ГЛАВА 2. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ КОНТАКТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ФРИКЦИОННО-ЗАЖИМНЫХ ГРУЗОЗАХВАТНЫХ УСТРОЙСТВ С ДРЕВЕСИНОЙ

2.1 Математическая модель взаимодействия ошипованных контактных элементов грузозахватных устройств с древесиной

КЭ с ошипованной рабочей поверхностью являются основными элементами, определяющими функциональность и надежность фрикционно-зажимных ГЗУ.

Под внешним трением понимают «явление сопротивления относительному перемещению, возникающее между двумя телами в зонах соприкосновения их поверхностей по касательным к ним» [75-77]. При этом предполагается, что пластическая деформация возникает только на вершинах микронеровностей, а остальные деформации являются упругими. Однако при внедрении шипов в древесину (рис. 2.1) происходит пластическая деформация самого материала древесины, а сопротивление относительному перемещению ошипованного элемента направлено перпендикулярно поверхности шипов [57].

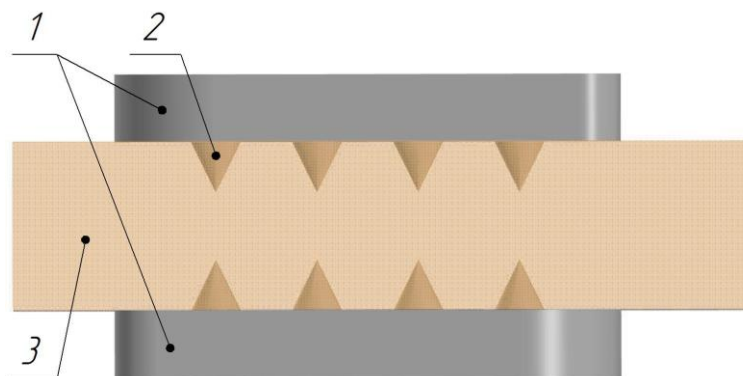


Рисунок 2.1 – Внедрение ошипованных КЭ в массив древесины: 1 – ошипованный КЭ; 2 – шип; 3 – образец древесины.

При взаимодействии ошипованных КЭ с массивной древесиной некорректно применять существующий термин «сила трения». Поэтому в работе применен термин «усилие взаимодействия», который применяют при исследовании трения контактных элементов с насечкой при взаимодействии с жестким предметом – грузом [57, 78, 79].

Рассмотрен элементарный ошипованный КЭ, представляющий собой пластину с жестко закрепленными шипами, расположенными в шахматном порядке и ориентированными нормально контактной поверхности изделия из древесины (рис. 2.2) [57].

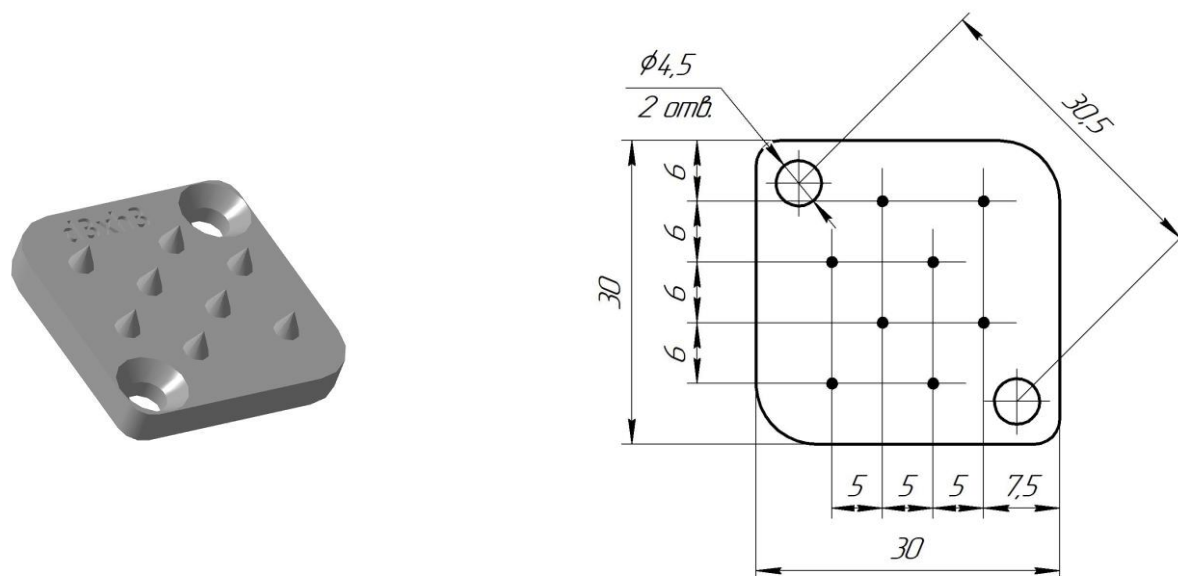


Рисунок 2.2 – Ошипованный контактный элемент

Направление усилия сдвига – параллельно поверхности древесины. Принимаем конструкцию КЭ абсолютно жесткой, так как деформацию стальных элементов можно не учитывать, древесина – трансформный сплошной однородный упруго-пластичный податливый материал [57].

При приложении сдвигающей нагрузки F (рис. 2.3) сопротивление относительно перемещению включает усилие взаимодействия древесины с шипами КЭ $F_{вз}$ и силу трения $F_{тр}$ на контактной поверхности древесины с рабочей поверхностью КЭ [61]:

$$F = F_{вз} + F_{тр} \quad (2.1)$$

Усилие взаимодействия древесины с одиночным шипом КЭ:

$$F_{вз1} = S_{ш} \cdot R_{см} \quad (2.2)$$

где $S_{\text{ш}} = \frac{h_{\text{ш}} \cdot d_{\text{ш}}}{2}$ – площадь осевого сечения шипа;

$h_{\text{ш}}$ – высота шипа;

$d_{\text{ш}}$ – диаметр шипа в основании;

$R_{\text{см}}$ – расчетное сопротивление древесины на смятие в направлении усилия сдвига.

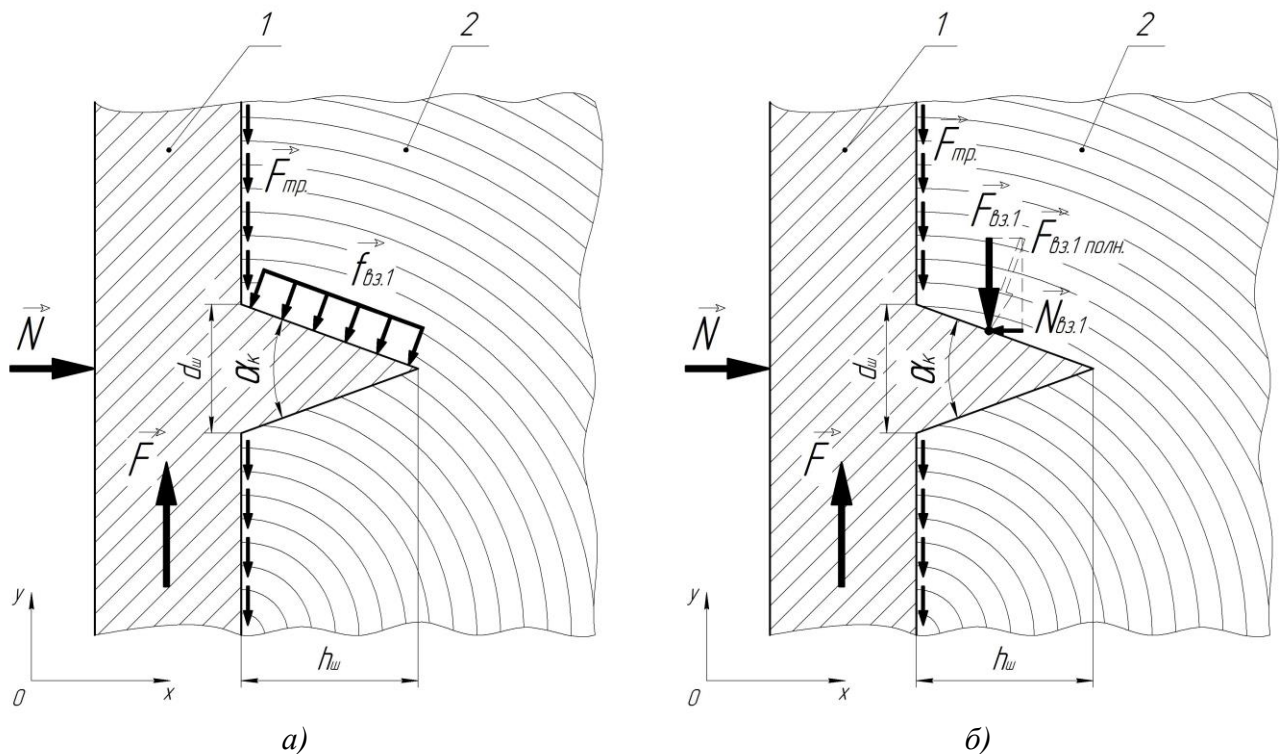


Рисунок 2.3 – Расчетная схема взаимодействия шипа с древесиной:

а – с распределенным усилием взаимодействия по рабочей поверхности шипа; *б* – с усилием взаимодействия, приведенным к точке; 1 – ошпикованный КЭ; 2 – образец древесины.

Угол конусности шипа α_k не учитывали, т.к. касательная составляющая усилия взаимодействия при сдвиге $F_{\text{вз}1}$ намного больше его нормальной составляющей $N_{\text{вз}1}$.

Усилие взаимодействия для ошпикованного КЭ:

$$F_{\text{вз}} = z \cdot F_{\text{вз}1} = z \cdot S_{\text{ш}} \cdot R_{\text{см}} \quad (2.3)$$

где z – количество шипов на одном КЭ.

$$F_{\text{вз}} = \frac{z \cdot h_{\text{ш}} \cdot d_{\text{ш}}}{2} \cdot R_{\text{см}} \quad (2.4)$$

Величина силы трения на рабочей поверхности КЭ невелика по сравнению с силой взаимодействия шипов, поэтому в расчетах силу трения не учитывали,

при этом она способствует повышению надежности удерживания перемещаемого груза.

В общем виде математическая модель взаимодействия ошипованных КЭ с древесиной имеет вид:

$$Q_{\text{гр}} \leq \frac{2 \cdot F_{\text{вз}}}{k_3} = \frac{z \cdot h_{\text{ш}} \cdot d_{\text{ш}}}{k_3} \cdot R_{\text{см}} \quad (2.5)$$

где k_3 – 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; $k_3 = 1,5 \dots 2,0$.

Несущая способность одного шипа на КЭ зависит от размеров осевого сечения шипа, определяется как:

$$P_1 = \frac{h_{\text{ш}} \cdot d_{\text{ш}}}{2} \cdot R_{\text{см}} \quad (2.6)$$

Несущая способность КЭ:

$$P_{\text{кэ}} = z \cdot P_1 = z \cdot \frac{h_{\text{ш}} \cdot d_{\text{ш}}}{2} \cdot R_{\text{см}} \quad (2.7)$$

Тогда модель примет вид:

$$Q_{\text{гр}} \leq \frac{2 \cdot P_{\text{кэ}} \cdot R_{\text{см}}}{k_3} \quad (2.8)$$

Таким образом, надежность удерживания ошипованными КЭ деревянных конструкций определяется механическими свойствами древесины и величиной заглубления шипов под действием нагрузки, не зависит от дальнейшего увеличения 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 [61].

Для проверки на адекватность расчетной модели проведены экспериментальные исследования.

2.2 Математическая модель взаимодействия упругоподатливых контактных элементов самозажимных грузозахватных устройств с древесиной

Контактное взаимодействие древесины с упругоподатливыми КЭ существенно отличается от взаимодействия древесины с ошипованными КЭ.

КЭ с покрытием рабочей поверхности из упругоподатливого материала обеспечивают постоянство коэффициента трения при изменении усилия прижатия к поверхности груза и не оставляют следов взаимодействия на лицевой поверхности перемещаемых изделий из массивной и клееной древесины.

Сопротивление относительному перемещению, возникающее между двумя телами в зонах соприкосновения поверхностей по касательным к ним принято называть внешним трением [80].

По наличию и характеру движения различают трение покоя и трение движения. Трение покоя – трение двух тел при микросмещениях без макросмещения, т.е. при малом относительном перемещении до перехода от покоя к скольжению. Сила трения покоя, соответствующая началу относительного движения, превышает по значению силу трения движения.

Различают три вида трения движения: трение скольжения, трение качения и трение качения с проскальзыванием. При трении скольжения скорости соприкасающихся тел в точках касания различны по значению и (или) направлению; при трении качения скорости одинаковы по значению и направлению; при трении качения с проскальзыванием движение происходит одновременно с качением и скольжением. Рассмотрим трение покоя и скольжения, возникающие при работе фрикционно-зажимных ГЗУ.

Основными характеристиками внешнего трения являются коэффициент трения и скорость скольжения – разность скоростей тел в точках их касания.

Поверхности трения соприкасающихся тел имеют определенные неровности с неравномерным шагом – шероховатость и неровности с большим шагом – волнистость (рис. 2.4). Фактическая площадь касания соприкасающихся тел намного меньше номинальной площади контакта. Она представляет собой сумму площадей точек касания, расположенных внутри малых контурных площадок. Число и размеры контурных площадок и точек касания внутри них зависят от микро- и макрорельефа соприкасающихся поверхностей – шероховатости и волнистости, а также от нагрузки в точке контакта и упругих характеристик материалов соприкасающихся деталей [81].

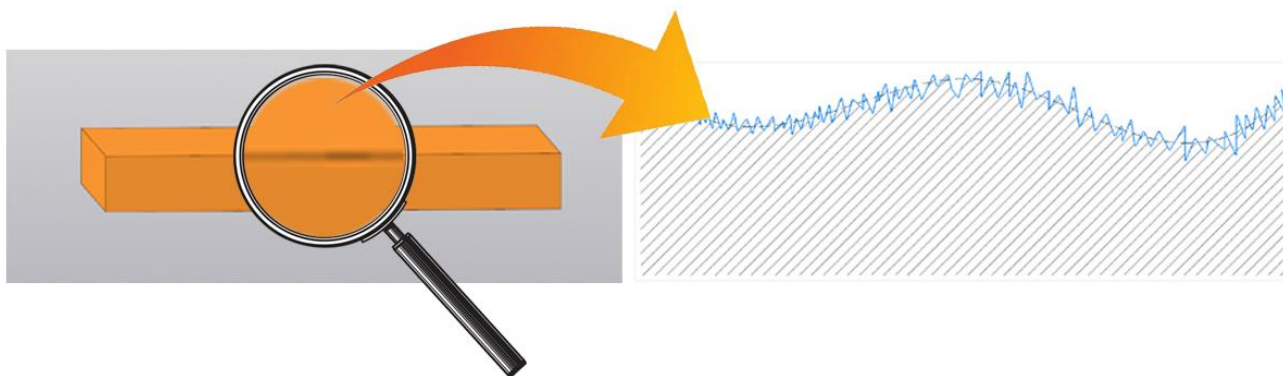


Рисунок 2.4 – Волнистость и шероховатость поверхности

Природа шероховатости и волнистости поверхности хорошо изучена отечественными учеными (школа И.В. Крагельского) [75]. Следует учитывать, что при увеличении сжимающей нагрузки шероховатость поверхностей взаимодействующих тел меняется вследствие неоднородности механических свойств поверхностей.

При воздействии усилия сжатия поверхности соприкасающихся тел приближаются друг к другу, в результате чего возрастает количество точек контакта. На начальном этапе взаимодействия наблюдается упругая деформация контактирующих элементов, которая по мере увеличения нагрузки переходит в пластическую.

Внешнее трение твердых тел, согласно современным представлениям, имеет двойственную (молекулярно-механическую или адгезионно-деформационную) природу. Считается, что контактирование твердых тел вследствие волнистости и шероховатости их поверхности происходит в отдельных зонах фактического касания. Суммарную площадь этих зон называют фактической, или реальной, площадью касания твердых тел. Под фактической площадью касания понимают зоны, в пределах которых межатомные и межмолекулярные силы притяжения и отталкивания равны [75].

Фактическая площадь касания в пределах нагрузок, используемых в инженерной практике, невелика: около 0,001-0,0001 номинальной кажущейся площади касания. Вследствие этого в зонах контакта возникают значительные напряжения, нередко приводящие к появлению в них пластических деформаций. Сила, сжимающая контактирующие тела, через фактическую площадь касания передается неровностям, вызывая их деформацию. Таким образом, при контактировании твердых тел следует различать номинальную и образованные вследствие приложения нагрузки контурную и фактическую площади касания. Соответственно отношения нормальной нагрузки к этим площадям называют номинальными, контурными и фактическими нормальными напряжениями на контакте.

Общая сила трения равна сумме сил трения, возникающих на единичных микроконтактах. Молекулярную составляющую силы трения, возникающую в зоне касания произвольной микронеровности определяют экспериментально.

Сила внешнего трения обусловлена сопротивлением скольжению, возникающим в результате межмолекулярных и межатомных взаимодействий, а также деформирования поверхностного слоя менее жесткого из контактирующих тел внедрившимися микронеровностями более жесткого тела. В общем случае деформационная и молекулярная составляющие силы трения взаимосвязаны и оказывают влияние друг на друга, однако, при внешнем трении этим явлением пренебрегают.

Величина силы трения, возникающей на единичной микронеровности контактирующих тел, зависит от ее геометрической конфигурации, напряженного состояния в зоне контакта, механических свойств поверхностного слоя менее жесткого из взаимодействующих тел и физико-химического состояния поверхностей контактирующих тел. В общем случае микронеровности поверхности не имеют правильной геометрической формы, их форма близка к форме сегментов эллипсоидов, большая полуось которых совпадает с направлением обработки поверхности. При вычислениях сил трения наиболее широко распространена сферическая модель шероховатой поверхности. Согласно этой модели, микронеровности считают шаровыми сегментами постоянного радиуса [75].

При определении коэффициента внешнего трения необходимо исходить из напряженного состояния в зонах фактического касания. В общем случае вследствие распределения вершин микронеровностей по высоте микронеровности в зависимости от глубины внедрения могут деформировать материал поверхности менее жесткого тела упруго, упругопластически или пластически. Границы между каждым из видов деформирования определяют, решая соответствующие контактные задачи теорий упругости и пластичности. При взаимодействии упругоподатливых материалов с поверхностью древесины в зонах касания возникают упругие деформации. Как показывает анализ, при внедрениях, соответствующих пластическим деформациям, в зонах касания поверхностей с наиболее распространенными в инженерной практике параметрами шероховатостей основные силовые взаимодействия приходятся на микронеровности, деформирующие материал поверхностного слоя менее жесткого тела пластически. Принято оценивать взаимодействие твердых тел при упругих и пластических деформациях в зонах касания [75].

При упругом ненасыщенном контакте в вычислениях используют сферическую модель шероховатой поверхности, которую считают абсолютно жесткой, а поверхность менее жесткого тела – абсолютно ровной. В контактных зонах деформирование происходит в соответствии с теорией Герца; взаимным

влиянием отдельных контактирующих зон на процесс деформации пренебрегают в связи с тем, что расстояние между зонами значительно больше их диаметров. Такая теоретическая модель удовлетворительно совпадает с экспериментальными данными. Деформационная составляющая силы трения при упругих деформациях в зонах фактического касания обусловлена гистерезисными потерями, возникающими при скольжении микронеровностей по поверхности упруго деформируемого тела [75].

Упругий ненасыщенный контакт имеет место, когда максимальные нормальные напряжения у самой высокой из контактирующих микронеровностей, глубина внедрения которой равна расстоянию между поверхностями твердых тел, меньше напряжений более мягкого из взаимодействующих тел [75].

Для материалов с небольшим модулем упругости, например, для силиконовых резин, увеличение контурного давления не вызывает изменения вида деформаций в зонах фактического касания, но может привести к состоянию насыщения контакта.

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, и геометрией поверхностного слоя более твердого материала – древесины. Следует отметить, что древесина, в отличие от жестких материалов, является анизотропным упругопластическим материалом, что учтено в разрабатываемой модели.

Фрикционно-зажимные ГЗУ с клиновыми КЭ, покрытыми упругоподатливым материалом (см. п. 1.3.6), 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.

Для разработки математической модели контактного взаимодействия с древесиной самозажимных ГЗУ, оснащенных упругоподатливыми КЭ, принято что основание КЭ выполнено из прочного и жесткого материала (сталь). КЭ имеет покрытие рабочей поверхности из упругоподатливого материала. С поверхностью перемещаемого изделия из древесины контактирует непосредственно поверхность КЭ из упругоподатливого материала – однородного сплошного изотропного упругого материала. Изделие из древесины рассматриваем как транслопный однородный сплошной упругий материал, контактное взаимодействие поверхности КЭ из упругоподатливого материала самозажимного ГЗУ с поверхностью образца из древесины рассматриваем как упругий насыщенный контакт тел согласованной формы.

При контактном взаимодействии КЭ с поверхностью древесины упругоподатливый материал, обладая низким значением модуля упругости и высокой эластичностью, обеспечивает равномерное распределение контактной нагрузки по поверхности контакта при снижении концентрации напряжений по периметру контактного пятна, уменьшается влияние наличия мелких дефектов и волнистости поверхности [57].

Для перемещения изделий из древесины применяют КЭ с покрытием из резины. Контактное взаимодействие обрешиненного КЭ фрикционного ГЗУ (винтовой струбцины) с поверхностью образца древесины рассмотрено А.И. Бабкиным [57].

Рассмотрим контактное взаимодействие клинового КЭ самозажимного фрикционного ГЗУ, рабочая контактная поверхность которого покрыта упругоподатливым материалом, с древесиной.

В нашем случае дополнительно учтено, что усилие зажатия при контактном взаимодействии клинового КЭ состоит из усилия предварительного зажатия и минимального, но достаточного для надежного удерживания груза усилия дожатия, возникающего при движении КЭ по клиновым направляющим.

ГЗУ состоит из жесткого П-образного корпуса 1 (рис. 2.5), двух КЭ, имеющих жесткое основание 2 и покрытие из упругоподатливого материала 3.

При подъеме изделия из древесины 4 под действием его 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 имеем:

$$Q \leq 2 \cdot F_1 = 2 \cdot N_1 \cdot f_1 \quad (2.9)$$

где Q – вес изделия из древесины;

F_1 – сила удерживания груза КЭ;

f_1 – коэффициент трения пары упругоподатливый КЭ – поверхность древесины.

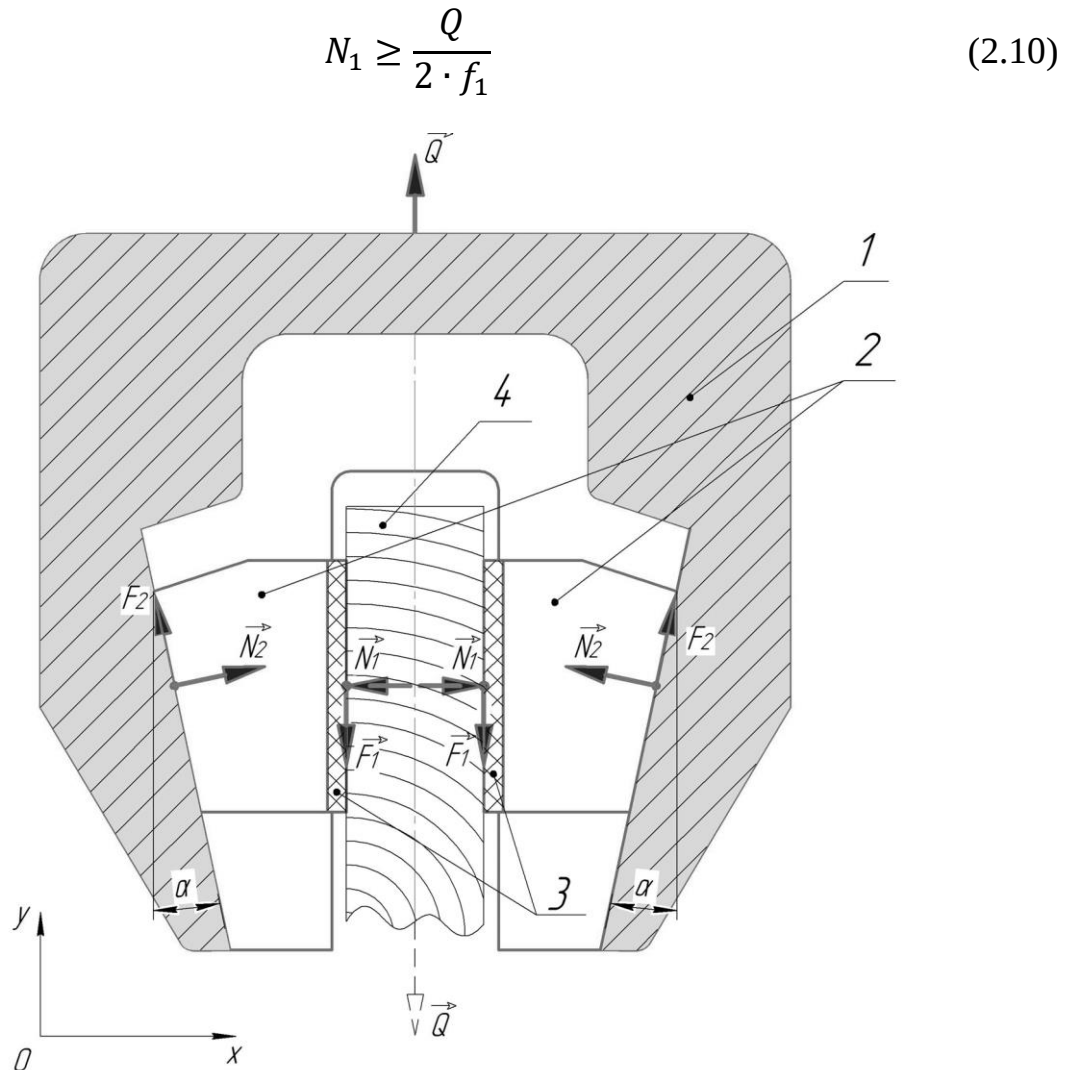


Рисунок 2.5 – Расчетная схема фрикционно-зажимного ГЗУ с клиновыми КЭ:
1 – корпус ГЗУ; 2 – основание КЭ; 3 – покрытие КЭ из упругоподатливого материала;
4 – изделие из древесины.

При условии, когда величина силы распора N_1 окажется недостаточной для обеспечения удерживания груза силами трения, груз начнет перемещаться в вертикальном направлении вниз, вовлекая в движение клиновый КЭ включающей силой P_B (рис. 2.6), равной:

$$P_B = \frac{Q}{2} - F_1 \quad (2.11)$$

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

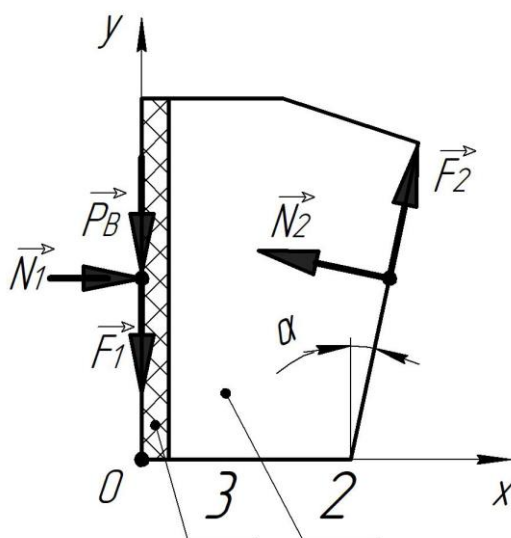


Рисунок 2.6 – Расчетная схема клинового КЭ ГЗУ

Составим уравнения равновесия для рассматриваемой плоской системы сил:

$$\sum F_{ix} = 0: \quad N_1 + F_2 \cdot \sin \alpha - N_2 \cdot \cos \alpha = 0 \quad (2.12)$$

где α – угол наклона опорной поверхности скольжения КЭ по отношению к вертикали.

$$\sum F_{iy} = 0: \quad -P_B - F_1 + F_2 \cdot \cos \alpha + N_2 \cdot \sin \alpha = 0 \quad (2.13)$$

Учитывая, что $F_1 = f_1 \cdot N_1$, а $F_2 = f_2 \cdot N_2$,

где f_2 – коэффициент трения опорной поверхности клинового КЭ по наклонной поверхности (по направляющей корпуса) ГЗУ,

получим:

$$N_1 = -f_2 \cdot N_2 \cdot \sin\alpha + N_2 \cdot \cos\alpha \quad (2.14)$$

$$P_B = -f_1 \cdot N_1 + f_2 \cdot N_2 \cdot \cos\alpha + N_2 \cdot \sin\alpha \quad (2.15)$$

Далее подставим:

$$P_B = -f_1 \cdot (-f_2 \cdot N_2 \cdot \sin\alpha + N_2 \cdot \cos\alpha) + f_2 \cdot N_2 \cdot \cos\alpha + N_2 \cdot \sin\alpha \quad (2.16)$$

$$P_B = N_2 \cdot (f_1 \cdot f_2 \cdot \sin\alpha - f_1 \cdot \cos\alpha + f_2 \cdot \cos\alpha + \sin\alpha) \quad (2.17)$$

Условие самоторможения клина $P_B = 0 \Rightarrow$

$$f_1 \cdot f_2 \cdot \sin\alpha - f_1 \cdot \cos\alpha + f_2 \cdot \cos\alpha + \sin\alpha = 0 \quad (2.18)$$

Преобразуем:

$$\sin\alpha(f_1 \cdot f_2 + 1) + \cos\alpha(f_2 - f_1) = 0 \quad (2.19)$$

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{\sin\alpha}{\cos\alpha} = \frac{f_1 - f_2}{f_1 \cdot f_2 + 1} \quad (2.20)$$

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

$$\operatorname{tg}\alpha \leq \frac{f_1 - f_2}{f_1 \cdot f_2 + 1} \quad (2.21)$$

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. 2.7) в образце древесины начнут развиваться деформации: в начале упругие, а затем пластические. Переход к пластическим деформациям определяется контактной прочностью древесины на смятие, которая определяется допускаемым контактным давлением:

$$[q] = \frac{R_{\text{см}}}{n} \quad (2.22)$$

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

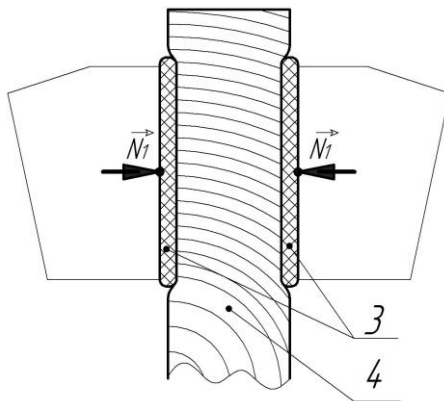


Рисунок 2.7 – Деформация поверхности древесины при взаимодействии с упругоподатливым материалом КЭ ГЗУ

В этом случае, при приложении сдвигающей нагрузки F сила сопротивления сдвигу $F_{\text{тр}}$ определяется силой трения $F_{\text{тр.пов}}$ на контурной поверхности контакта, согласно теории дискретного контактирования твердых тел Крагельского И.В. [75], и силой дополнительного сопротивления на кромке $F_{\text{кр}}$:

$$F_{\text{тр}} = F_{\text{тр.пов}} + F_{\text{кр}} \quad (2.23)$$

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

Прочность на контактное смятие древесины в конструкциях регламентируется Сводом правил СП 64.13330.2017 "Деревянные конструкции" [42] и в международных стандартах, например, EN 1995-1-1: Eurocode 5 [83].

По СП 64.13330.2017 расчетные сопротивления древесины сосны, ели и лиственницы европейской, отсортированной по сортам определяют по формуле:

$$R^P = R^A m_{\text{дл}} \cdot \text{П} m_i \quad (2.24)$$

где R^A – расчетное сопротивление древесины, МПа, приведенное в [42, табл. 3], влажностью 12 % для режима нагружения А, согласно [42, табл. 4], в сооружениях 2-го

класса функционального назначения, согласно [42, прил. Б], при сроке эксплуатации не более 50 лет;

$m_{дл}$ – коэффициент длительной прочности, соответствующий режиму длительности загрузки [42, табл. 4];

$Пm_i$ – произведение коэффициентов условий работы [42, п. 6.9].

Расчетное сопротивление R^A древесины сосны на сжатие и смятие по всей площади поперек волокон составляет 2,7 МПа [42, табл. 3]. Расчетные сопротивления для других пород древесины устанавливают путем умножения величины R^A на переходные коэффициенты $m_n = 0,65 \dots 1,8$ [42, табл. 5]. Коэффициент длительной прочности, соответствующий режиму длительности загрузки $m_{дл} = 0,53 \dots 1,35$ [42, табл. 4]. Коэффициенты условий работы m_i могут принимать значения от 0,6 до 1,2 [42, п. 6.9].

На основании вышеизложенного, для гарантированного обеспечения контактной прочности перемещаемых изделий из древесины разных пород с учетом [42, 84, 85] и формулы (2.24), принимаем допускаемое значение контактного давления $[q] = 1$ МПа.

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

$$N_{1max} = [q] \cdot S \quad (2.25)$$

где S – площадь контактной поверхности одного КЭ.

Тогда, в общем виде, математическая модель взаимодействия упругоподатливых клиновых КЭ фрикционно-зажимных ГЗУ может быть представлена:

$$Q_{гр} \leq 2 \cdot f_1 \cdot [q] \cdot S \quad (2.26)$$

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

Для уточнения адекватности взаимодействия КЭ ГЗУ из упругоподатливых материалов с древесиной в условиях переменной нагрузки с учетом реологических и анизотропных свойств древесины выполнены экспериментальные исследования.

ГЛАВА 3. МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Экспериментальные исследования проводили в 2 этапа. Первый этап включает исследования ошипованных КЭ ГЗУ, второй – упругоподатливых КЭ ГЗУ.

3.1 Методика проведения экспериментальных исследований взаимодействия ошипованных контактных элементов грузозахватных устройств с древесиной

3.1.1 Экспериментальная установка, подготовка образцов

Исследования проводили на базе испытательной машины *WDW-100*, общий вид которой представлен на рисунке 3.1. Технические характеристики испытательной машины приведены в табл. 3.1.



Рисунок 3.1 – Универсальная испытательная машина *WDW-100*

Программное обеспечение (ПО) универсальной испытательной машины *WDW-100* позволяет проводить следующие действия: управление машиной, расчет результатов испытания, графическое представление результатов испытания, имеется генератор отчетов, статистики и т.д., встроенная библиотека

наиболее часто используемых стандартов, возможность создания шаблонов испытаний по любым стандартам, редактор результатов и т.д. ПО позволяет получать все необходимые значения физико-механических испытаний.

Таблица 3.1 - Технические характеристики испытательной машины WDW-100

Максимальная нагрузка, кН	100
Точность нагрузки, %	0,5 (в диапазоне 2-100% FS (2-100 кН))
Точность измерения перемещения, %	0,5
Разрешение измерения перемещения, мкм	0,025
Диапазон скоростей, мм/мин	0,001 – 500
Максимальное расстояние между захватами, мм	650
Полное перемещение траверсы, мм	1350
Расстояние между колоннами, мм	570
Размеры рамы, мм	970 x 630 x 2100
Вес, кг	700
Питание, В / Гц	220 / 50

Условия проведения испытаний: влажность образцов из древесины сосны – 12%, из древесины лиственницы – 16%; относительная влажность окружающей среды 40%, температура окружающей среды 24°C [9].

Определили усилия внедрения ошипованных КЭ в образцы древесины (сосны и лиственницы) и усилия их извлечения. Для этого пластину, с закрепленным на ней ошипованным КЭ устанавливали между образцом древесины и подвижной траверсой испытательной машины WDW-100, производили нагружение до полного внедрения шипов в древесину (рис. 3.2) с регистрацией нагрузки (рис. 3.3).

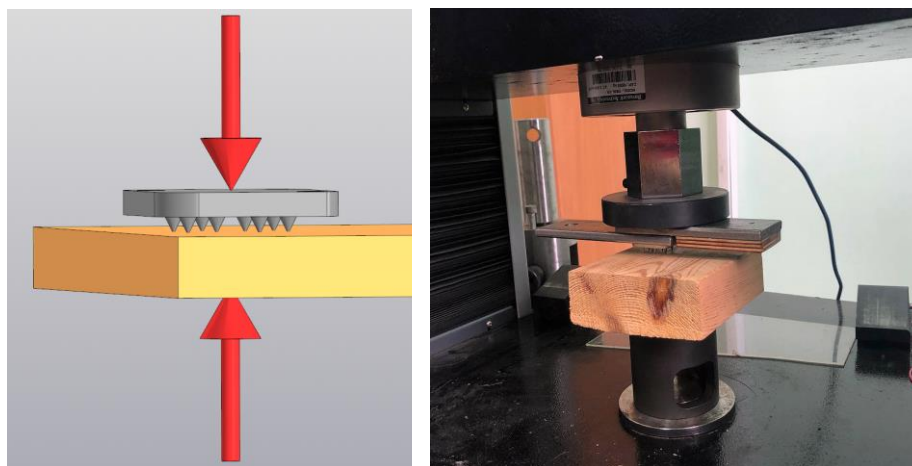


Рисунок 3.2 – Определение усилия внедрения шипов КЭ в образец древесины

Усилия извлечения шипов КЭ из древесины определяли аналогичным образом.

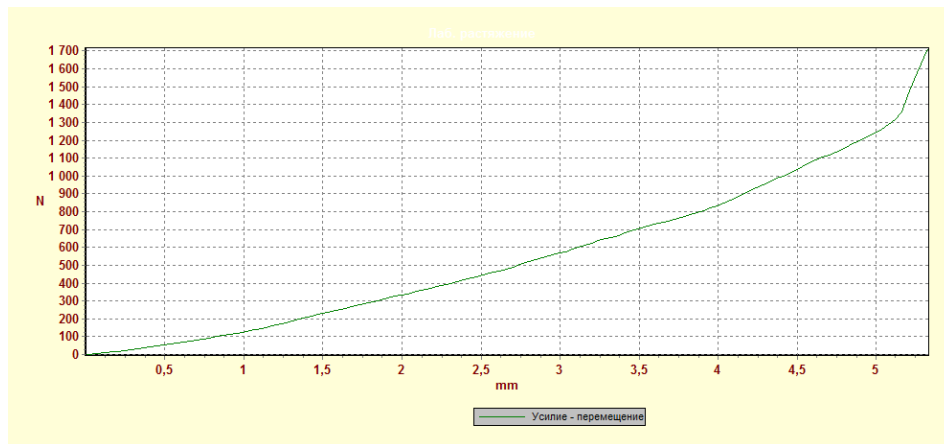


Рисунок 3.3 – Диаграмма усилия запрессовки шипов КЭ в образец древесины

Для испытаний на сдвиг применяли приспособление (рис. 3.4), в котором закрепляли пластины с шипами попарно с двух сторон образца древесины.

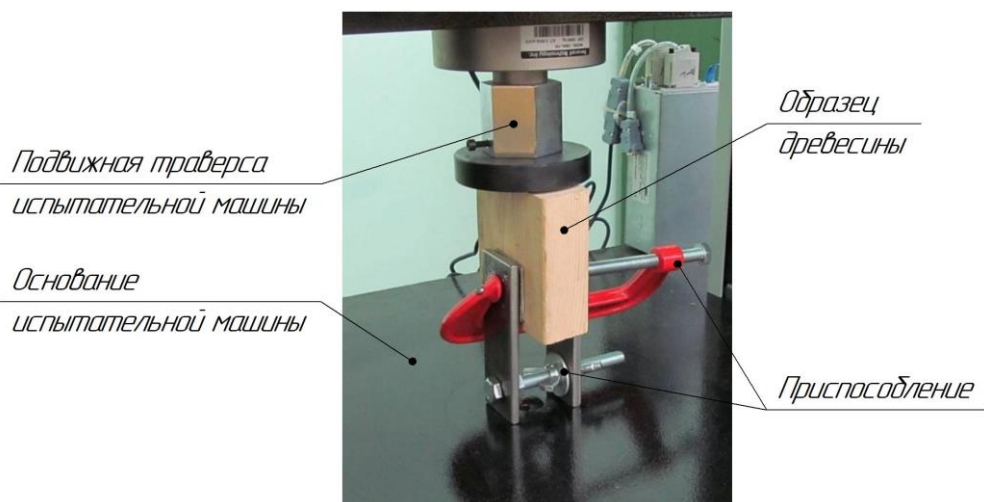


Рисунок 3.4 – Экспериментальная установка на базе испытательной машины WDW-100

Для проведения испытаний подготовили образцы массивной древесины сосны и лиственницы размером 100x50x20 мм [9].

Исследования проводили на двух типах шипов КЭ: из жестких стальных и менее жестких полимерных материалах.

3.1.2 Определение сопротивления сдвигу и несущей способности стальных ошипованных контактных элементов грузозахватных устройств при взаимодействии с древесиной

Задача исследования – установление геометрических параметров шипов. Изготовили КЭ в виде пластин с шипами конической формы из стали 45 [86] четырех типоразмеров шипов: $d2 \times h3$, $d3 \times h3$, $d3 \times h6$, $d4 \times h6$ (d – диаметр в основании, мм; h – высота шипа, мм). Шипы разместили на пластинах КЭ, размером 30 x 30 мм в шахматном порядке (рис. 3.5).

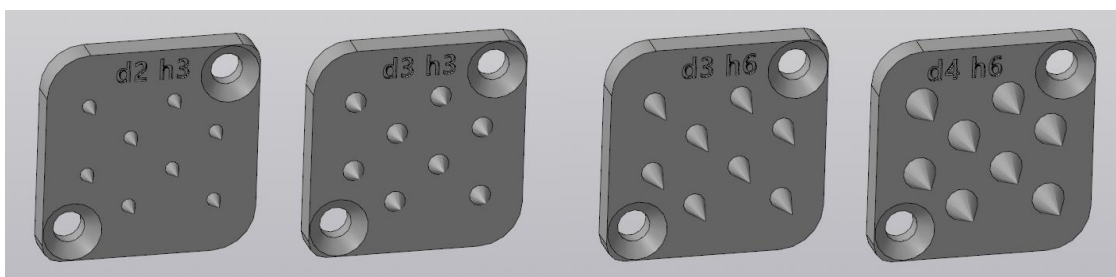


Рисунок 3.5 – Контактные элементы с шипами

Пластины с шипами попарно с двух сторон образца древесины размещали в приспособление. Образец древесины помещали между пластинами, ошипованные пластины сводили, при этом шипы запрессовывали в древесину образца до полного внедрения в образец с регистрацией нагрузки. Приспособление с подготовленным таким образом образцом древесины устанавливали в испытательную машину и прикладывали нагрузку для обеспечения сдвига образца по поверхности КЭ на величину 9...10 мм. При этом фиксировали динамику изменения нагрузки при перемещении образца с одновременной записью процесса с помощью компьютерной программы испытательной машины с учетом расположения волокон древесины [9]. Предварительно определили прочностные характеристики древесины – пределы прочности и модули упругости при сжатии образцов вдоль и поперек волокон в соответствии с ГОСТ 16483.0-89 [87], ГОСТ 16483.10-73 [88], ГОСТ 16483.11-72 [89], ГОСТ 16483.17-81 [90], ГОСТ 16483.24-73 [91], ГОСТ 16483.25-73 [92] и опытом отечественных и зарубежных исследователей [93-100].

Результаты испытаний приведены в табл. 3.2, 3.3.

Таблица 3.2 – Усилие внедрения и извлечения шипов в древесину сосны

Размеры шипов: d – диаметр в основании, мм; h – высота, мм	Расположение волокон древесины	Усилие внедрения шипов, Н	Усилие извлечения шипов, Н
$d2 \times h3$	радиальное	1 040	27,0
	тангенциальное	860	47,4
	осевое	640	67,5
$d3 \times h3$	радиальное	1 300	32,0
	тангенциальное	1 370	41,0
	осевое	1 320	64,9
$d3 \times h6$	радиальное	1 700	304,4
	тангенциальное	1 500	319,3
	осевое	1 080	260,9
$d4 \times h6$	радиальное	2 400	358,3
	тангенциальное	2 250	186,9
	осевое	1 600	226,5

Таблица 3.3 – Несущая способность шипов КЭ из стали 45 при сдвиге в древесине

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	Нагрузка при сдвиге, Н	Удельная несущая способность $R_{1,уд}$ 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

Ошипованные КЭ из стали в процессе испытаний не получили механических повреждений [9].

При взаимодействии с шипом во время сдвига происходит 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 рисунке 3.6 [9].

При перемещении вдоль волокон шипы оставляют отпечаток в виде полос (рис. 3.6, б); при перемещении поперек волокон – происходит разрыв волокон и деформация древесины (рис. 3.6, в) [9].

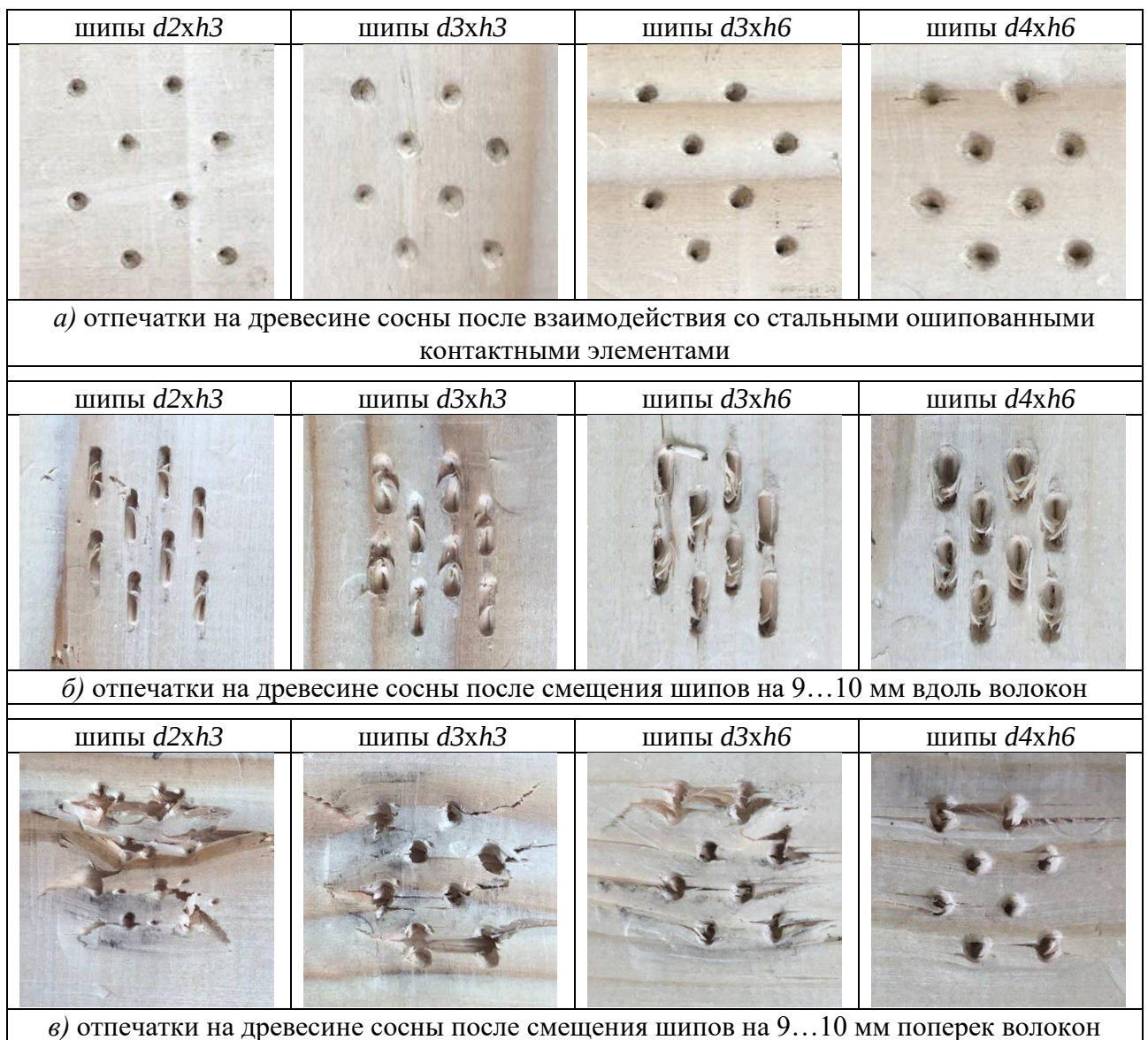


Рисунок 3.6 – Отпечатки на образце из древесины сосны после взаимодействия со стальными ошипованными контактными элементами

3.1.3 Определение несущей способности ошипованных контактных элементов из полимерных материалов, выполненных с применением аддитивных технологий

Изготовление ошипованных КЭ ГЗУ из стали трудоемко и требует применения сложного оборудования. Для упрощения технологии изготовления КЭ ГЗУ рассмотрена возможность применения аддитивных технологий. Суть этих технологий, область применения, достоинства и недостатки приведены в п. 1.5.

Образцы ошипованных КЭ из полимерных материалов для испытаний изготовили с применением двух видов аддитивных технологий 3D-печати: *FDM*-печать и *MSLA*-печать (см. п. 1.5).

Изготовили КЭ в виде пластин с шипами конической формы из полимерных материалов: филамент «*PLA+*» (*FDM*-печать) и фотополимерные смолы (*MSLA*-печать) аналог пластика *ABS* – «*ABS-like*» и нейлона «*Nylon-like*» (рис. 3.7) [9].



Рисунок 3.7 – Ошипованные контактные элементы, изготовленные методами аддитивных технологий

Для 3D-печати ошипованных КЭ из филамента «*PLA+*» применены параметры печати, рекомендованные производителем филамента.

Ошипованные КЭ по технологии *MSLA* изготовлены на оборудовании с высокой степенью разрешения жидкокристаллического экрана (11520 x 5120

пикселей). Точность печати по оси z составляет 0,02 мм, что в десятки раз точнее современных *FDM*-принтеров.

Параметры печати образцов на 3D-принтере из фотополимерной смолы «*ABS-like*» приведены на рисунке 3.8. Постобработка образцов после изготовления – промывка в ультразвуковой ванне изопропиловым спиртом в течении 10 мин., сушка, засветка в ультрафиолетовой камере в течении 20 мин.

The image shows a software interface for configuring a 3D printer. The title bar reads 'Настройки' (Settings) with a close button. Below the title bar, there are icons for saving, deleting, and other functions. The main area is divided into tabs: 'Принтер' (Printer), 'Смола' (Resin), 'Распечатать' (Print), 'Gcode', and 'Дополнительно' (Advanced). The 'Распечатать' tab is active. On the left, there is a dropdown menu showing 'ELEGOO Saturn 3 Ultra'. The main settings area is divided into two columns. The left column contains settings for layer height, number of layers, exposure time, and transition time. The right column contains settings for layer height, exposure time, and transition time. The settings are as follows:

Параметр	Значение	Единица
Высота слоя:	0,050	mm
Кол-во слоев низа:	5	
Время засветки:	3,500	s
Время засветки низа:	30,000	s
Переход слой граф:	3	
Тип перехода:	Лине...	
Время перехода:	6,630	s
Режим ожидан...ремя печати:	Врем...	
Время отдыха...ед подъемом:	0,000	s
Время отдыха после подъема:	0,000	s
Время отдыха после отвода:	7,000	s
Высота подъема:	3,000 + 4,000	mm
Высота подъема:	3,000 + 4,000	mm
Нижнее рас...ие отвода:	5,500 + 1,500	mm
Расстояние отвода:	5,500 + 1,500	mm
Скорость подъема:	50,000 & 200,000	mm/min
Скорость подъема:	60,000 & 200,000	mm/min
Нижняя скорость отвода:	150,000 & 70,000	mm/min
Скорость ретракта:	200,000 & 70,000	mm/min

Рисунок 3.8 – Параметры 3D-печати образцов «*ABS-like*»

Применение аддитивных технологий при изготовлении КЭ из полимерных материалов позволяет оптимизировать процесс проектирования и изготовления ошпированных КЭ [9].

Качество ошпированных КЭ, изготовленных по технологии *FDM*-печати, оказалось недостаточным, образцы требовали дополнительной механической обработки, поэтому принято решение в испытаниях их не использовать. Ошпированные КЭ, изготовленные по технологии *MSLA* отвечали предъявляемым требованиям по качеству [9].

3.2 Методика проведения экспериментальных исследований взаимодействия упругоподатливых контактных элементов самозажимных грузозахватных устройств с древесиной

3.2.1 Экспериментальная установка для определения коэффициента трения

В литературных источниках отсутствуют сведения о значениях коэффициента трения при взаимодействии резины и силиконовой резины с поверхностью изделий из древесины в условиях переменной нагрузки с учетом реологических и анизотропных свойств древесины. Для проектирования фрикционно-зажимных ГЗУ выполнены экспериментальные исследования для определения коэффициента трения в условиях переменной нагрузки.

Экспериментальное определение коэффициента трения проводили на классической установке по критическому углу трения (рис. 3.9) и специально созданной установке (рис. 3.11) [101].

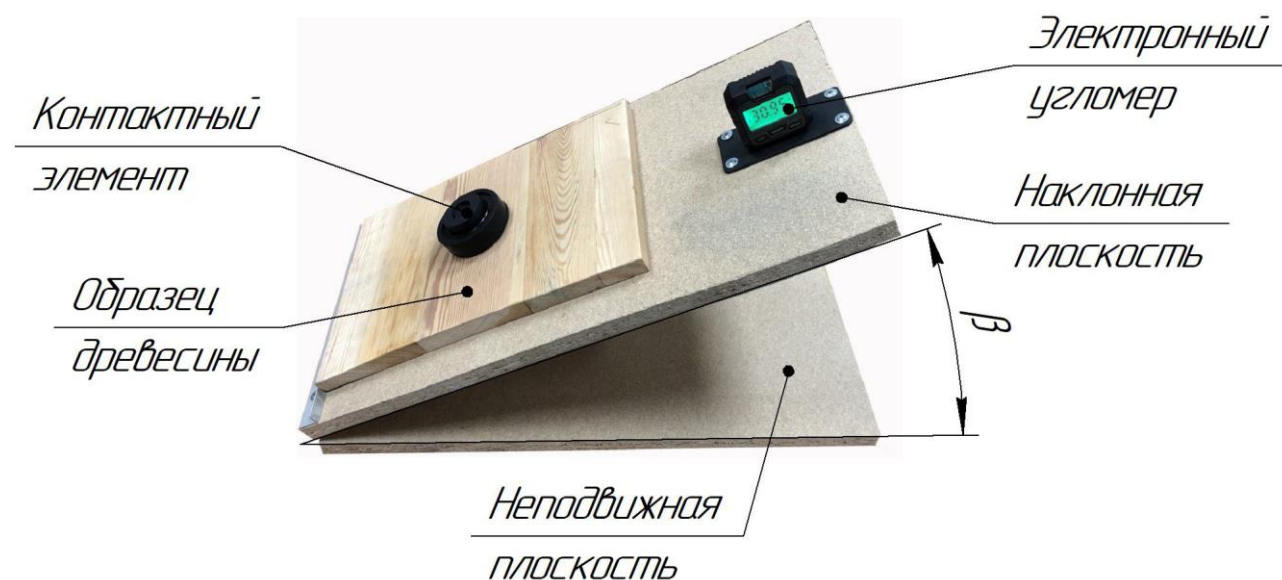


Рисунок 3.9 – Установка для определения коэффициента трения по критическому углу трения

Определение коэффициента трения производили опытным путём по критическому углу трения [101].

Расчетная схема для определения коэффициента трения приведена на рис. 3.10.

В состоянии покоя, проецируя все действующие силы на координатные оси x, y :

$$mg\sin(\beta) - F_{\text{тр}} = 0 \quad (3.1)$$

$$N - mg\cos(\beta) = 0 \quad (3.2)$$

Следует:

$$F_{\text{тр}} = mg\sin(\beta) \quad (3.3)$$

$$N = mg\cos(\beta) \quad (3.4)$$

С учетом зависимости Кулона $F_{\text{тр}} = f_1 \cdot N$:

$$mg\sin(\beta) = f_1 mg\cos(\beta) \quad (3.5)$$

или

$$f_1 = \tan(\beta) \quad (3.6)$$

где f_1 – коэффициент трения, определяющий критический угол трения (равновесия) тела на наклонной плоскости.

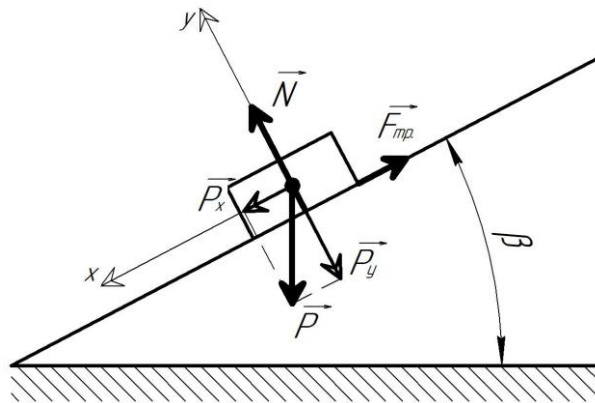


Рисунок 3.10 – Расчетная схема для определения коэффициента трения:

$P = mg$ – сила тяжести; N – сила реакции опоры; $F_{\text{тр}}$ – сила трения покоя; β – угол между неподвижной и наклонной плоскостью.

Для определения коэффициента трения поднимают наклонную плоскость до момента, пока находящийся на ней КЭ с покрытием контактной поверхности из упругоподатливого материала начнет движение. Электронным угломером фиксируют угол, по зависимости (3.6) находят коэффициент трения f_1 [101].

Определение коэффициента трения по классической методике на наклонной плоскости по критическому углу трения не позволяет получить полной информации в условиях переменной нагрузки, т.е. при изменении усилия прижатия КЭ ГЗУ к поверхности перемещаемого груза [101].

Для определения коэффициента трения с учетом усилия прижатия КЭ ГЗУ к поверхности перемещаемого груза проводили исследования на экспериментальной установке (рис. 3.11), конструкция которой учитывает особенности взаимодействия КЭ ГЗУ с древесиной [10].

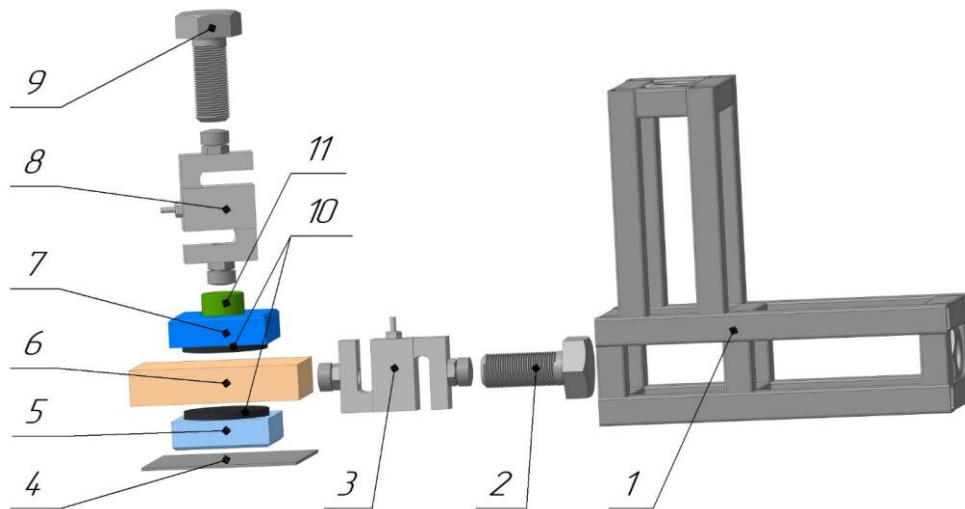


Рисунок 3.11 – Установка для определения коэффициента трения: 1 – корпус; 2, 9 – винт M24x50; 3 – тензодатчик динамометра №1; 4 – крышка; 5, 7 – контактный элемент; 6 – образец древесины; 8 – тензодатчик динамометра №2; 10 – вкладыш из упругоподатливого материала; 11 – толкатель.

Величину коэффициента трения определяли по усилию прижатия КЭ и усилию сдвига. Для этого применяли два электронных тензометрических динамометра.

При определении коэффициента трения применена классическая расчетная схема (рис. 3.12), тогда:

$$f_1 = \frac{P}{2N_1} \quad (3.7)$$

где f_1 – коэффициент трения;

P – усилие сдвига;

N_1 – усилие распора (усилие прижатия контактных элементов).

Усилие распора N создают вращением винта 9 и измеряют тензодатчиком 8. Усилие сдвига определяют по второму динамометру тензодатчиком 3, это усилие создают вращением горизонтального винта 2. Показания динамометров фиксируют в момент начала сдвига образца древесины.

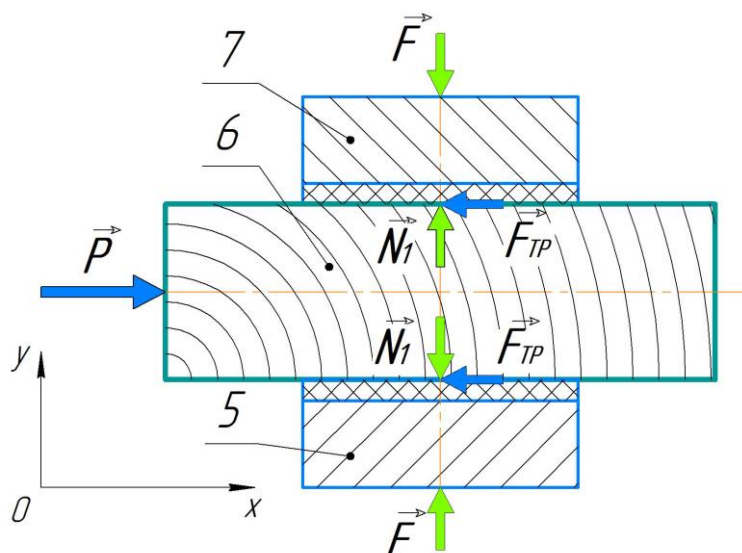


Рисунок 3.12 – Расчетная схема определения коэффициента трения упругоподатливого материала с поверхностью древесины: 5, 7 – контактный элемент; 6 – образец древесины; P – усилие сдвига; F – сила прижатия КЭ; $F_{тр}$ – сила трения на контактной поверхности, N – нормальная сила.

Характеристики тензометрических динамометров приведены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Технические характеристики динамометров, примененных в эксперименте

Технический параметр	Марка/модель динамометра	
	ДЭП/3-1Д-2У-1	ДЭП/3-1Д-5У-1
наибольший предел измерения, кН	2	5
дискретность отсчетного устройства, кН	0,0002	0,0005
класс точности по ISO 376	1	
пределы допускаемой относительной погрешности	± 0,24%	

3.2.2 План проведения исследований. Методическая сетка опытов. Подготовка образцов древесины и контактных элементов грузозахватных устройств с различным оснащением контактной поверхности

Для исследования были подготовлены образцы ЛДСП, из древесины сосны и лиственницы с поперечным и продольным расположением волокон, размером

до 80х60х15 мм (рис. 3.13). Образцы изготовлены из древесины одной партии поставки по 3 экземпляра в каждой серии испытаний. Общее количество образцов древесины – 15.

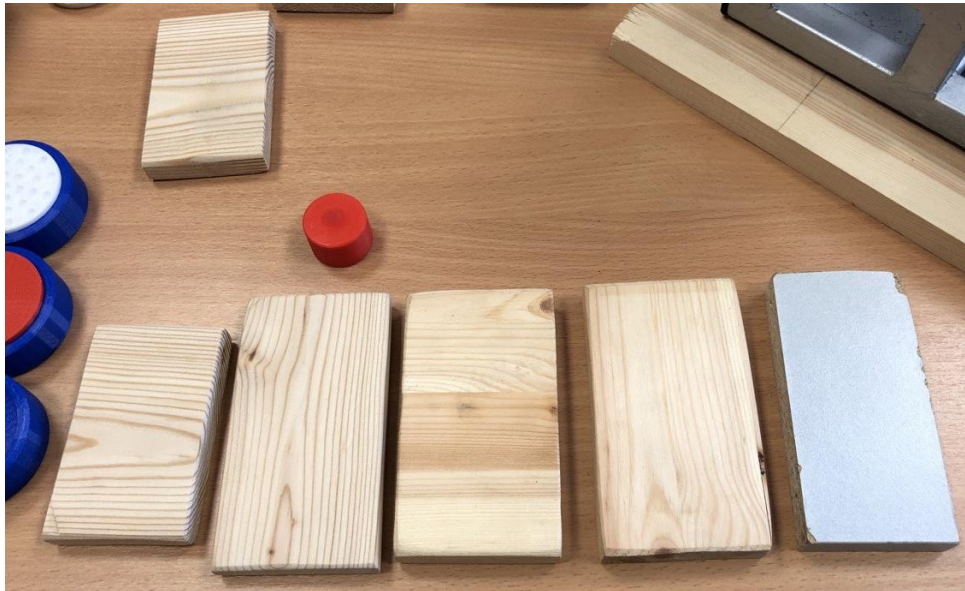


Рисунок 3.13 – Образцы древесины для исследований

Как отмечено, древесина является материалом с невысокой контактной прочностью и требует деликатного обращения при изменении пространственного положения и перемещении. На надежное и качественное перемещение изделий из массивной и клееной древесины при применении фрикционно-зажимных ГЗУ оказывает влияние множество различных конструкционных и технологических факторов: контактное давление на поверхности КЭ, твердость, шероховатость и влажность поверхности, направление волокон в массивной древесине, состояние поверхности (наличие загрязнений, наледи, снега и т.п.) и др. Степень влияния каждого фактора может быть от значительной до незначительной. При проведении исследования применена методика полного факторного эксперимента.

Выбраны зависимые и независимые переменные. За выходной параметр (отклик), т.е. зависимую переменную, принят коэффициент трения f_1 , который определяется по формуле (3.7).

Входные параметры, которые могут быть оценены количественно и качественно, являются независимыми переменными. С одной стороны, они

должны оказывать влияние на величину коэффициента трения f_1 , с другой стороны необходимо иметь возможность управления ими.

Для правильного выбора наиболее значимых входных параметров следует рассмотреть все факторы, влияющие на величину f_1 . В ходе исследования менее значимые факторы исключают из рассмотрения.

Значение величины коэффициента трения f_1 в паре трения древесина – КЭ определяется влиянием эксплуатационных, конструкционных и технологических факторов:

1) Величина контактного давления q по поверхности КЭ, определяемая как отношение сжимающего усилия N к площади контактной поверхности S . Значение этого параметра должно оказывать наибольшее влияние на величину коэффициента трения f_1 .

2) Площадь контактной поверхности S .

3) При определении сдвигающей силы необходимо учитывать разнообразие применяемых в технологиях деревообработки и мебельном производстве материалов. Применяется большое разнообразие материалов из массивной и клееной древесины, обладающих различными механическими характеристиками, в связи с чем этот фактор влияния также необходимо учитывать. Механической характеристикой перемещаемых изделий является твердость поверхности изделий из древесины T .

4) Влажность древесины (для массивной древесины). Это фактор может оказывать влияние на коэффициент трения, т.к. изменяются характеристики поверхности изделий из древесины.

5) Шероховатость (Ra) поверхностей КЭ и перемещаемого изделия из древесины.

6) Направление волокон (для массивной древесины). Данный фактор имеет категориальный уровень и может принимать значения: «вдоль волокон» и «поперек волокон».

7) Температуру окружающей среды необходимо учитывать, если грузотранспортные операции проводятся в зимней период при отрицательных температурах.

8) На величину коэффициента трения оказывает влияние фактор состояния контактной поверхности. При эксплуатации на поверхности перемещаемого груза или поверхности КЭ могут присутствовать различные загрязнения (пыль, обледенение, снег и т.п.).

В результате анализа проведенных нами ранее разведывательных опытов и исследований других авторов [57, 60], установлены основные факторы, влияющие на величину коэффициента трения f_1 :

- контактное давление q ;
- площадь контактной поверхности S ;
- направление волокон массивной древесины Z ;
- твердость поверхности перемещаемых изделий T .

Представленные в таблице 3.5 факторы выбраны в качестве варьируемых. Оставшиеся факторы признаны незначительными (табл. 3.6).

Уровни независимых факторов установили в зависимости от эксплуатационных наблюдений:

1) Фактор A – величина контактного давления q на поверхности КЭ:

$A_{min} = 0,1$ МПа (-1) – минимальное значение контактного давления;

$A_{max} = 3,5$ МПа (+1) – максимальное значение контактного давления.

Таблица 3.5 – 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)

2) Фактор B – площадь контактной поверхности S .

$$B_{min} = 490,9 \text{ мм}^2 (-1);$$

$$B_{max} = 1963,5 \text{ мм}^2 (+1).$$

Предел изменения фактора B выбран с учетом того, что для оценки влияния площади контактной поверхности при взаимодействии КЭ и образца древесины проводили испытания на КЭ разных размеров: диаметром 25 мм (площадь контакта 490,9 мм²) и 50 мм (площадь контакта 1963,5 мм²).

Таблица 3.6 – Факторы, не включенные в эксперимент

Фактор	Причина, по которой фактор не включен в эксперимент
Температура окружающей среды	Предусматривается применение ГЗУ в условиях закрытых помещений при положительных температурах. Применение на открытом воздухе в зимний период времени не предусмотрено.
Состояние контактной поверхности	Не может по физической сути существенно влиять на значение исследуемой величины
Влажность древесины	Разведывательные опыты показали, что повышение влажности древесины способствует увеличению коэффициента трения при взаимодействии КЭ из резины и силикона с образцами древесины
Шероховатость контактной поверхности Ra	Испытания проводили на массивной древесине с параметрами шероховатости $Ra_{3,2} \dots Ra_{6,3}$ [22]. Перемещение гладких изделий ($<Ra_{0,8}$) не предусмотрено, а увеличение параметра шероховатости Ra приведет к увеличению коэффициента трения.

3) Фактор C – направление волокон Z , имеет дискретный характер и может принимать значения:

$$\text{вдоль волокон } C_1 = 1 (-1);$$

$$\text{поперек волокон } C_2 = 2 (+1).$$

4) Фактор D – твердость материала образцов T

$$D_{min} = 25 \text{ МПа } (-1) \text{ – из сосны};$$

$$D_{max} = 35 \text{ МПа } (+1) \text{ – из лиственницы}.$$

Принята методика регрессионного анализа. Функциональная зависимость между параметром оптимизации y и исследуемыми факторами представлена в степенном виде [103]:

$$y = c \cdot A^\alpha \cdot B^\beta \cdot C^\gamma \cdot D^\delta \quad (3.8)$$

где c – постоянный коэффициент;
 A – исследуемый фактор №1;
 B – исследуемый фактор №2;
 C – исследуемый фактор №3;
 D – исследуемый фактор №4;
 $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ – показатели степени факторов.

Приведем функциональную зависимость к линейному виду:

$$\ln y = \ln c + \alpha \ln A + \beta \ln B + \gamma \ln C + \delta \ln D \quad (3.9)$$

Обозначим $Y = \ln y$; $a = \ln c$; $x_1 = \ln A$; $x_2 = \ln B$; $x_3 = \ln C$; $x_4 = \ln D$;

Тогда $Y = a + \alpha x_1 + \beta x_2 + \gamma x_3 + \delta x_4$

Преобразуем независимые переменные x_i в безразмерные X_i :

$$X_i = \frac{x_i - \frac{x_{imax} + x_{imin}}{2}}{\frac{x_{imax} - x_{imin}}{2}} \quad (3.10)$$

Тогда зависимость можно представить в виде:

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_4 X_4 \quad (3.11)$$

где $b_0 = \ln c$; $b_1 = \alpha$; $b_2 = \beta$; $b_3 = \gamma$; $b_4 = \delta$

Для оценки степени влияния факторов воспользуемся методом наименьших квадратов (МНК).

Значения факторов представим в матричной форме в виде матрицы наблюдений F типа $n \times m$.

Вектор средних значений отклика:

$$y = \frac{y_1 + y_2}{2} \quad (3.12)$$

Тогда, согласно МНК, вектор параметров модели имеет вид:

$$b = (F^T F)^{-1} F^T y \quad (3.13)$$

Проверку статистической значимости коэффициентов выполним по критерию Стьюдента.

Оценка дисперсии отклика:

$$S_y^2 = \frac{1}{n - m} \sum_{i=1}^n (y_i - f_a(x_{1i}, x_{2i}, x_{3i}, x_{4i},))^2 \quad (3.14)$$

где $f_a(x_{1i}, x_{2i}, x_{3i}, x_{4i},) = b_0 + b_1 x_{1i} + b_2 x_{2i} + b_3 x_{3i} + b_4 x_{4i}$;

n – число наблюдений;

m – количество факторов.

Статистика критерия проверки гипотезы $H_0: b_i = 0$ имеет вид:

$$T_i = \frac{b_i}{\sqrt{S_y^2 \cdot c_u}} \quad (3.15)$$

где c_u – i -й диагональный элемент дисперсионной матрицы Фишера $(F^T F)^{-1}$

По табличным данным определяем критическое значение t -распределения Стьюдента для требуемого уровня значимости. В нашем случае требуется особая уверенность в достоверности полученных результатов, поэтому значимость принимаем $\alpha = 0,01$. С таким уровнем значимости только в 1 случае из 100 есть риск отвергнуть правильную гипотезу. Значения T_i меньше критического признаются незначимыми и в дальнейшем не учитываются.

После получения итоговой функциональной зависимости проводим проверку адекватности модели по критерию Фишера.

Критерий имеет вид:

$$F = \frac{Q_n}{n - m} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n (r_i - 1)}{Q_p} < F_{кр} \quad (3.16)$$

где $Q_n = \sum_{i=1}^n r_i (y_i - f_a(x_{1i}, x_{2i}, x_{3i}, x_{4i},))^2$

$$Q_n = \sum_{i=1}^n ((y_{1i} - y_i)^2 + (y_{2i} - y_i)^2)$$

$$r_i = 2$$

$$y_i = \frac{y_{1i} + y_{2i}}{2}$$

Для определения критерия Фишера $F_{кр}$ при уровне значимости $\alpha = 0,01$ выбираем соответствующую таблицу значений F -критерия Фишера при указанном уровне значимости. Определяем k_1 (равно количеству факторов) и k_2 по формуле: $k_2 = n - m - 1$, где n – число наблюдений, m – количество факторов. На пересечении столбца k_1 и строки k_2 будет находиться искомое значение критерия Фишера.

Расчеты по представленным выше формулам будем вести в табличной форме с применением *MS Excel*.

3.2.3 Определение коэффициента трения при взаимодействии упругоподатливых контактных элементов с поверхностью массивной древесины

Как отмечено в п. 3.2.1, определять коэффициент трения будем с помощью специально разработанной экспериментальной установки (рис. 3.14).

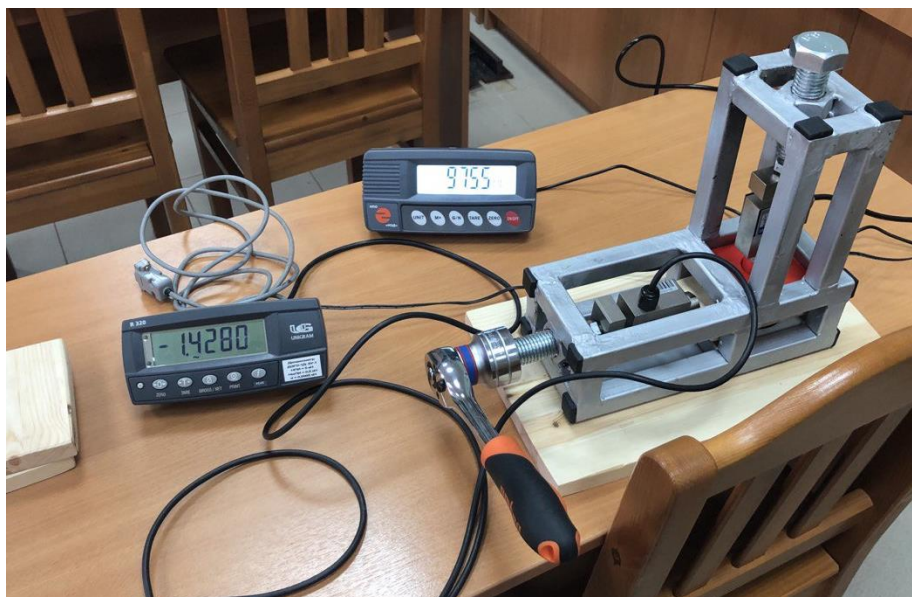


Рисунок 3.14 – Проведение эксперимента по определению коэффициента трения

Применена методика регрессионного анализа (п. 3.2.2). Провели регрессионный анализ экспериментальных данных (приложение А) для контактной пары резина – древесина, составили план-матрицу эксперимента (табл. 3.7).

Таблица 3.7 – План-матрица эксперимента по определению коэффициента трения для контактной пары резина - древесина

№	А		В		С		D		отклик	
	код	значение	код	значение	код	значение	код	значение	y ₁	y ₂
1	+	3,5	+	1963,5	+	2	+	35	0,475	0,515
2	–	0,1	+	1963,5	+	2	+	35	0,921	0,863
3	+	3,5	–	490,9	+	2	+	35	0,452	0,515
4	–	0,1	–	490,9	+	2	+	35	0,857	0,863
5	+	3,5	+	1963,5	–	1	+	35	0,460	0,466
6	–	0,1	+	1963,5	–	1	+	35	0,872	0,781
7	+	3,5	–	490,9	–	1	+	35	0,451	0,466
8	–	0,1	–	490,9	–	1	+	35	0,853	0,781
9	+	3,5	+	1963,5	+	2	–	25	0,445	0,418
10	–	0,1	+	1963,5	+	2	–	25	0,732	0,700
11	+	3,5	–	490,9	+	2	–	25	0,449	0,418
12	–	0,1	–	490,9	+	2	–	25	0,682	0,700
13	+	3,5	+	1963,5	–	1	–	25	0,415	0,378
14	–	0,1	+	1963,5	–	1	–	25	0,603	0,633
15	+	3,5	–	490,9	–	1	–	25	0,388	0,378
16	–	0,1	–	490,9	–	1	–	25	0,504	0,633

Вектор параметров модели:

$$b_0 = 0,0454; b_1 = -0,1452; b_2 = 0,0425; b_3 = 0,1453; b_4 = 0,6235.$$

Статистика критерия проверки гипотезы H_0 для критериев:

$$T_0 = 4,1359; T_1 = -17,3814; T_2 = 1,9860; T_3 = 3,3915; T_4 = 7,0645$$

По табличным данным [104, прил. 4] определено критическое значение t -распределения Стьюдента для уровня значимости $\alpha = 0,01$ и числа степеней свободы $d.f = N(r - 1) = 16(2 - 1) = 16$, которое составляет 2,583. Таким образом, значение T_2 меньше критического, поэтому фактор B (площадь контактной поверхности) признали незначимым и исключили из дальнейшего рассмотрения.

Коэффициенты для новой модели с исключенным фактором B :

$$b_0 = 0,0609; b_1 = -0,1452; b_3 = 0,1453; b_4 = 0,6235.$$

Провели проверку адекватности полученной модели по критерию Фишера, при уровне значимости $\alpha = 0,01$, $k_1 = 3$; и $k_2 = 16 - 3 - 1 = 12$:

$$F_{кр} = 3,49 > F = 0,1029 \quad (3.17)$$

Условие выполняется, модель адекватна.

Подставили полученные коэффициенты в формулу 3.8 и получили уравнение регрессии коэффициента трения для контактной пары резина – древесина:

$$f_1 = 0,0609 \cdot \frac{Z^{0,1453} \cdot T^{0,6235}}{q^{0,1452}} \quad (3.18)$$

Для контактной пары силикон – древесина на основании полученных экспериментальных данных (прил. А) составлена план-матрица эксперимента для определения коэффициента трения (табл. 3.8).

Вектор параметров модели (см. п. 3.2):

$$b_0 = 0,0362; b_1 = -0,2608; b_2 = 0,049; b_3 = 0,2012; b_4 = 0,6007.$$

Статистика критерия проверки гипотезы H_0 для критериев:

$$T_0 = 3,0852; T_1 = -24,5698; T_2 = 1,8005; T_3 = 3,6942; T_4 = 5,3549$$

Таблица 3.8 – План-матрица эксперимента по определению коэффициента трения для контактной пары силикон - древесина

№	А		В		С		D		отклик	
	код	значение	код	значение	код	значение	код	значение	у ₁	у ₂
1	+	3,5	+	1963,5	+	2	+	35	0,353	0,356
2	–	0,1	+	1963,5	+	2	+	35	0,932	0,900
3	+	3,5	–	490,9	+	2	+	35	0,337	0,356
4	–	0,1	–	490,9	+	2	+	35	0,765	0,900
5	+	3,5	+	1963,5	–	1	+	35	0,301	0,310
6	–	0,1	+	1963,5	–	1	+	35	0,922	0,783
7	+	3,5	–	490,9	–	1	+	35	0,300	0,310
8	–	0,1	–	490,9	–	1	+	35	0,852	0,783
9	+	3,5	+	1963,5	+	2	–	25	0,283	0,291
10	–	0,1	+	1963,5	+	2	–	25	0,878	0,735
11	+	3,5	–	490,9	+	2	–	25	0,309	0,291
12	–	0,1	–	490,9	+	2	–	25	0,719	0,735
13	+	3,5	+	1963,5	–	1	–	25	0,273	0,253
14	–	0,1	+	1963,5	–	1	–	25	0,568	0,639
15	+	3,5	–	490,9	–	1	–	25	0,256	0,253
16	–	0,1	–	490,9	–	1	–	25	0,545	0,639

По табличным данным [104, прил. 4] вычислено критическое значение t -распределения Стьюдента для уровня значимости $\alpha = 0,01$ и числа степеней свободы $d.f = N(r - 1) = 16 \cdot (2 - 1) = 16$, которое составляет 2,583. Таким образом, значение T_2 меньше критического, поэтому фактор B (площадь контактной поверхности) признали незначимым и исключили из дальнейшего рассмотрения.

Коэффициенты для новой модели с исключенным фактором B :

$$b_0 = 0,0507; b_1 = -0,2608; b_3 = 0,2012; b_4 = 0,6007.$$

Проверка адекватности полученной модели по критерию Фишера, при уровне значимости $\alpha = 0,01$, $k_1 = 3$; и $k_2 = 16 - 3 - 1 = 12$:

$$F_{кр} = 3,49 > F = 0,094 \quad (3.19)$$

Условие выполняется, модель адекватна.

Подставили полученные коэффициенты в формулу 3.8, получили уравнение регрессии коэффициента трения для контактной пары силикон – древесина:

$$f_1 = 0,0507 \cdot \frac{Z^{0,2012} \cdot T^{0,6007}}{q^{0,2608}} \quad (3.20)$$

3.2.4 Определение коэффициента трения при взаимодействии упругоподатливых контактных элементов с ламинированной поверхностью древесной плиты

При определении коэффициента трения в контактной паре силикон-ЛДСП и резина-ЛДСП рассмотрен только один параметр, влияющий на значение коэффициента трения – контактное давление q . Площадь контактной поверхности не оказывает существенного влияния на величину коэффициента трения (п. 3.2.3). Фактор «направление волокон» для ЛДСП отсутствует, твердость поверхности изделий из ЛДСП однородна [10].

При проведении исследования контактного взаимодействия силиконовых резин с ламинированной поверхностью древесностружечной плиты, определении характера изменения коэффициента трения от величины контактного давления требуется уточнить и определить триботехнические характеристики.

Полученные опытным путем значения коэффициента трения в контактных парах упругоподатливый материал – ЛДСП приведены в приложении А.

ГЛАВА 4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

4.1 Взаимодействие ошипованных контактных элементов грузозахватных устройств с древесиной

4.1.1 Сопротивление сдвигу и несущая способность металлических ошипованных КЭ при взаимодействии с древесиной

При обсуждении результатов испытаний принят термин «удельная несущая способность», который характеризуется отношением несущей способности шипа P_1 к площади поверхности осевого сечения шипа $S_{\text{ш}}$ [9] (рис. 4.1):

$$P_1^{\text{уд.}} = \frac{P_1}{S_{\text{ш}}} \quad (4.1)$$

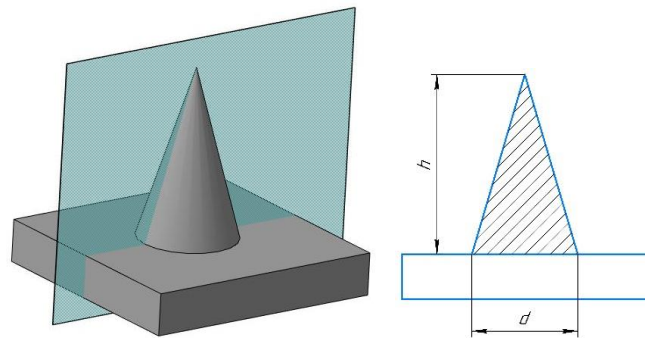


Рисунок 4.1 – Поверхность шипа в осевом сечении

Отмечено, что шипы с меньшей конусностью и размерами осевого сечения оказывают более высокое сопротивление нагрузке при сдвиге (рис. 4.2), такие шипы оставляют меньший размер повреждения на контактной поверхности древесины, для их внедрения в древесину требуется меньшее усилие запрессовки. Например, удельная несущая способность шипов с площадью проекции осевого сечения 3 мм^2 ($d2xh3$) при взаимодействии с древесиной лиственницы поперек волокон составляет 119,79 МПа, а при увеличении площади до 12 мм^2 ($d4xh6$) уменьшается до 51,14 МПа (табл. 3.3) [9].

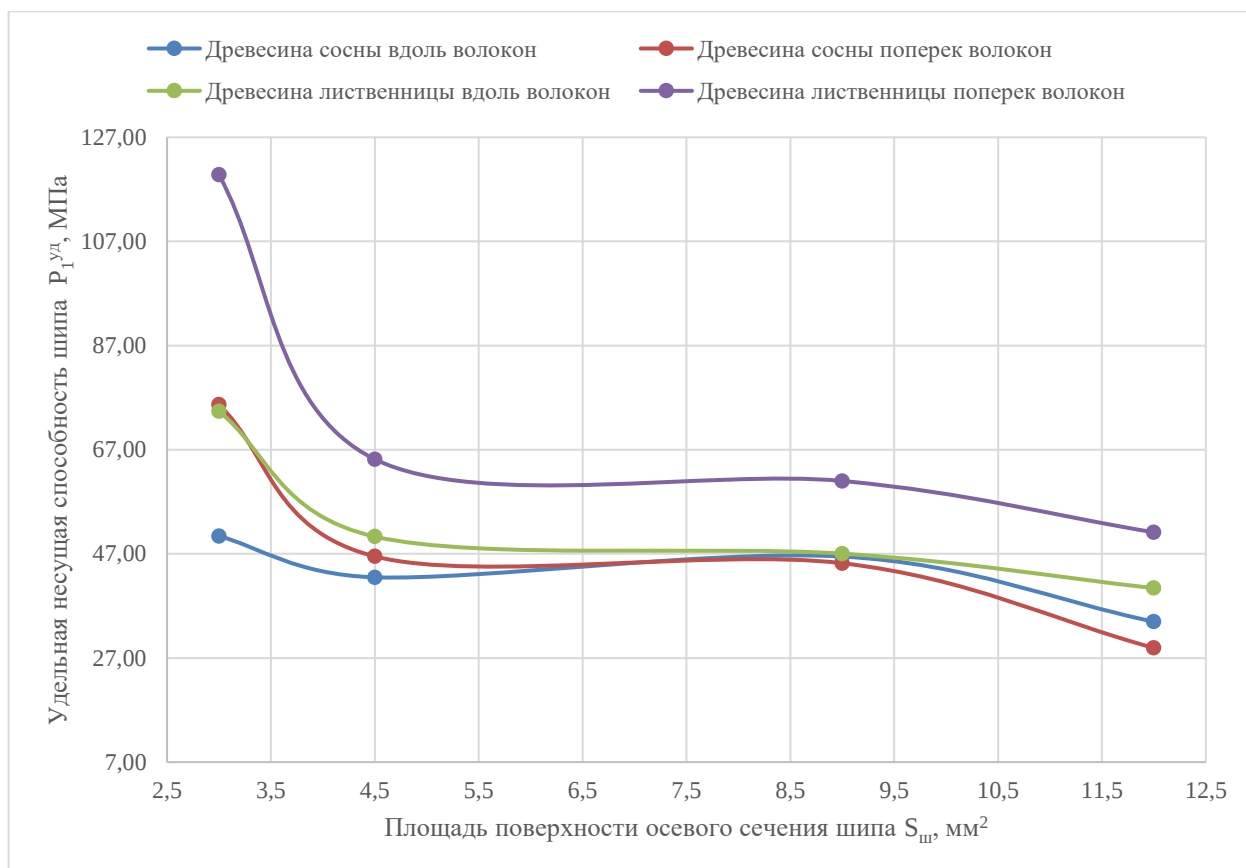


Рисунок 4.2 – Удельная несущая способность шипа

Анализируя полученные результаты исследований следует отметить, что применение ошпированных КЭ из стали 45 при перемещении изделий из древесины увеличивает удерживающую и несущую способность ГЗУ, при этом шипы, обладающие меньшими геометрическими размерами, обладают большей удельной несущей способностью, оставляют меньше повреждений на контактной поверхности древесины. Для изготовления ошпированных КЭ ГЗУ рекомендовано применять шипы конической формы диаметром в основании 2 мм и высотой 3 мм, что обеспечит высокую надежность, достаточную несущую способность при выполнении грузотранспортных операций и минимальные повреждения на контактной поверхности перемещаемых изделий из древесины [9].

4.1.2 Сопротивление сдвигу и несущая способность ошипованных КЭ из полимерных материалов при взаимодействии с древесиной

КЭ из фотополимерных материалов испытаний не выдержали: КЭ, изготовленные из фотополимерной смолы «*Nylon-like*» пластически деформировались при погружении в древесину (рис. 4.3, а), практически все шипы на образцах из фотополимера «*ABS-like*» оказались срезаны по основанию (рис. 4.3, б) [9]. Прочность образцов из материала «*ABS-like*» на срез уступает прочности древесины на смятие.

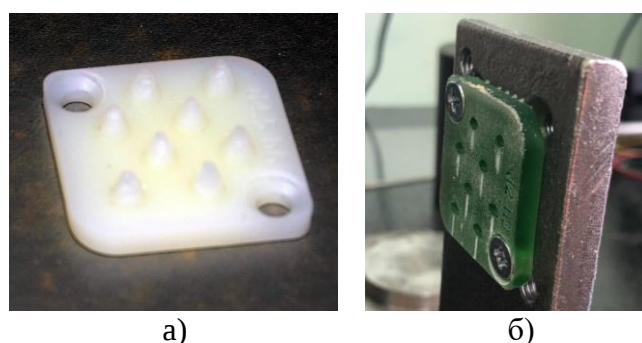


Рисунок 4.3 – Ошипованные контактные элементы из полимерных материалов:
а) фотополимер *Nylon-like* после запрессовывания в древесину; б) фотополимер *ABS-like* после сдвига

Таким образом, примененные в исследованиях ошипованные КЭ из полимерных материалов при рабочих нагрузках разрушаются и не обеспечивают надежного удерживания деревянных конструкций.

Материалы для 3D-печати и технологии их применения постоянно совершенствуются, со временем появляются материалы и аддитивные технологии, позволяющие изготовить ошипованные КЭ с более высокими механическими характеристиками [9]. Это позволяет сделать обоснованный вывод о том, что исследования в этом направлении следует продолжить. Рекомендовано для изготовления ошипованных КЭ применять субтрактивные технологии изготовления из качественных конструкционных сталей. При этом, применение аддитивных технологий для изготовления прототипов изделий для ГЗУ из полимерных материалов остается актуальным.

4.2 Взаимодействие упругоподатливых контактных элементов самозажимных грузозахватных устройств с древесиной

4.2.1 Адгезионные свойства и коэффициент трения контактных элементов из вулканизированной резины с поверхностью древесины

Установленные опытным путем коэффициенты трения между резиной и массивной древесиной (сосны и лиственницы) приведены в приложении А.

Зависимость коэффициента трения от контактного давления для фрикционной пары резина-ЛДСП, уравнение регрессии и величина достоверности аппроксимации представлена на рисунке 4.12.

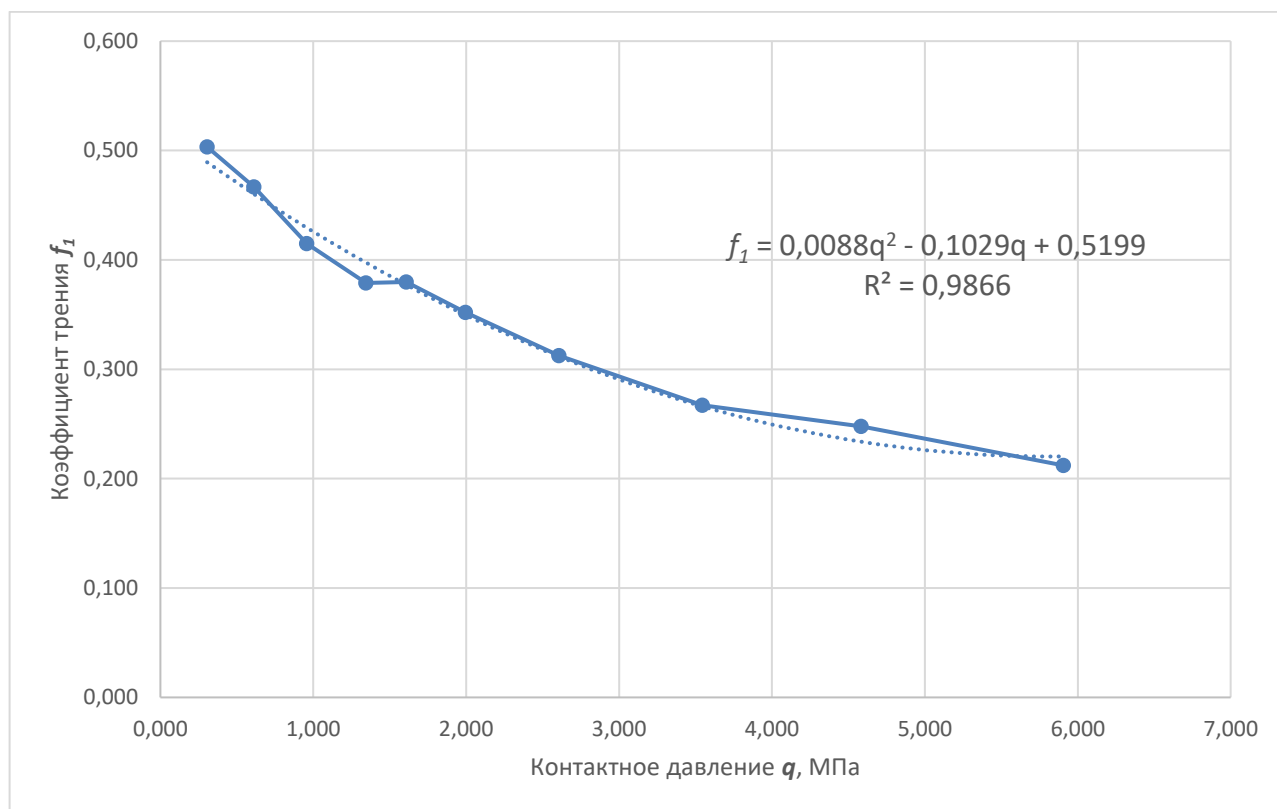


Рисунок 4.12 – Коэффициент трения КЭ из резины и ЛДСП

После обработки статистических данных испытаний получены целевые функции зависимости коэффициента трения от варьируемых факторов для разных пар трения вулканизированной резины с изделиями из древесины:

Пара трения	Коэффициент трения для пары трения
Резина – массивная древесина	$f_1 = 0,0609 \cdot \frac{Z^{0,1453} \cdot T^{0,6235}}{q^{0,1452}}$
Резина – ЛДСП	$f_1 = 0,0088 \cdot q^2 - 0,1029 \cdot q + 0,5199$

Таким образом, при взаимодействии резины с изделиями из древесины следует применять следующие значения коэффициента трения:

Пара трения	Расчетное значение коэффициента трения (при контактном давлении $q = 1$ МПа)
Резина – массивная древесина	0,5
Резина – ЛДСП	0,4

Схожие результаты значений коэффициента трения при взаимодействии резины с поверхностью изделий из древесины получены в исследованиях, проведенных А.И. Бабкиным [57].

4.2.2 Характер изменения адгезионных свойств и коэффициента трения контактных элементов из силиконовой резины при взаимодействии с древесиной

Установленные опытным путем коэффициенты трения между силиконовой резиной и массивной древесиной (сосны и лиственницы) приведены в приложении А.

Зависимость коэффициента трения от контактного давления для фрикционной пары силикон-ЛДСП, уравнение регрессии и величина достоверности аппроксимации представлена на рисунке 4.13, сравнительная характеристика коэффициента трения для фрикционных пар резина-ЛДСП и силикон-ЛДСП – на рисунке 4.14.

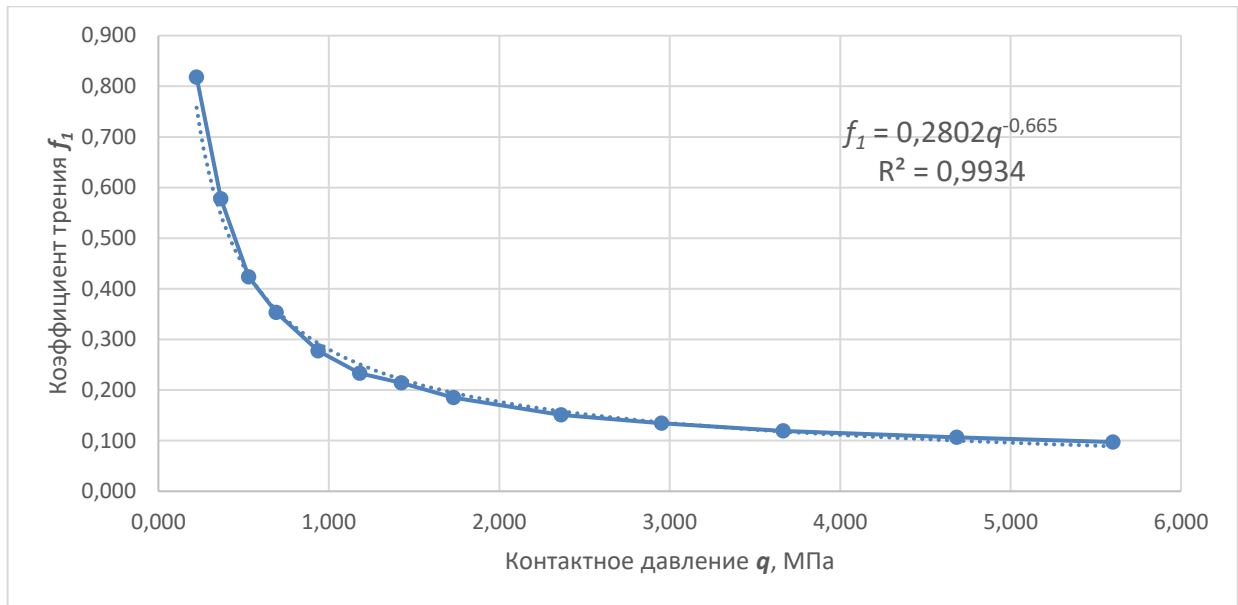


Рисунок 4.13 – Коэффициент трения КЭ из силикона и ЛДСП

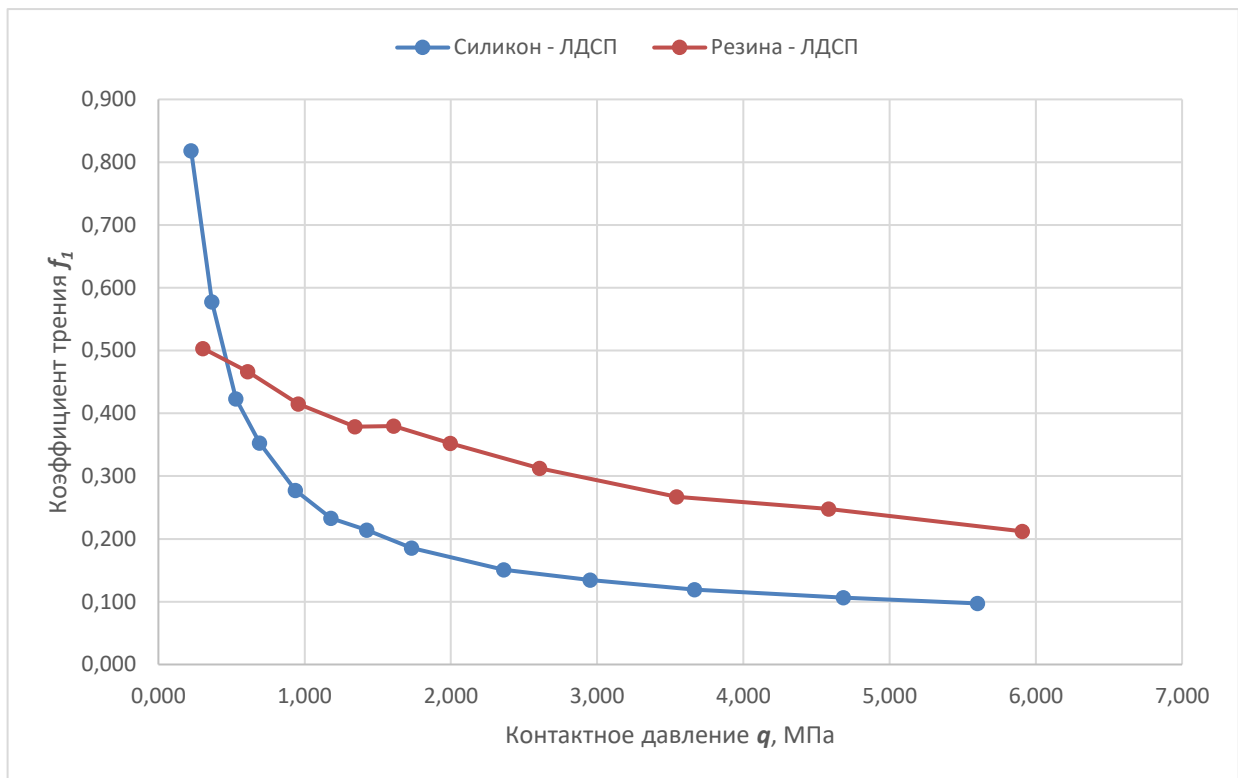


Рисунок 4.14 – Сравнительная характеристика коэффициента трения КЭ из упругоподатливых материалов с ЛДСП

После обработки статистических данных испытаний получены целевые функции зависимости коэффициента трения от варьируемых факторов для пар трения силиконовой резины с изделиями из древесины:

Пара трения	Коэффициент трения для пары трения
Силикон – массивная древесина	$f_1 = 0,0507 \cdot \frac{Z^{0,2012} \cdot T^{0,6007}}{q^{0,2608}}$
Силикон – ЛДСП	$f_1 = \frac{0,2802}{q^{0,665}}$

При взаимодействии силикона с изделиями из древесины следует применять следующие значения коэффициента трения:

Пара трения	Расчетное значение коэффициента трения (при контактном давлении $q = 1$ МПа)
Силикон – массивная древесина	0,4
Силикон – ЛДСП	0,26

КЭ с силиконовым покрытием при небольших контактных нагрузках проявляют высокие адгезионные свойства, в результате значение коэффициента трения силикона сопоставимо с коэффициентом трения для резины. С увеличением контактного давления коэффициент трения силикона с ЛДСП начинает резко уменьшаться и стремится к значению 0,1 (при контактном давлении 5,5 МПа), что необходимо учитывать при проектировании ГЗУ с КЭ из силиконовой резины. При проектировании фрикционно-зажимных ГЗУ для перемещения изделий из ЛДСП с КЭ из силиконовой резины рекомендуется применять расчетную величину коэффициента трения не более 0,26 [10].

Значения коэффициента трения при взаимодействии силиконовой резины с поверхностью изделий из древесины в условиях переменной нагрузки получены впервые.

ГЛАВА 5. КОНСТРУКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ ГРУЗОЗАХВАТНЫХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ДРЕВЕСИНЫ

Совершенствование конструкций ГЗУ является одной из приоритетных задач промышленных предприятий, обеспечивающих качественное перемещение изделий из древесины.

5.1 Грузозахватное устройство с самозажимными ошипованными контактными элементами

Техническое решение ГЗУ (заявка в ФИПС от 20.03.2025, регистрационный № 2025106668) позволяет обеспечить перемещение изделий из древесины без нарушения целостности поверхности древесины.

ГЗУ (рис. 5.1) состоит из корпуса 1, зажимного винта 2 с концевыми участками с правой и левой ходовой резьбой, двух клиновых КЭ 3, установленных в ползунах 4, возвратных пружин 5 с крепежными винтами 6, маховичка 7, скобы 8 с проушиной 9, установленной шарнирно на оси 10.

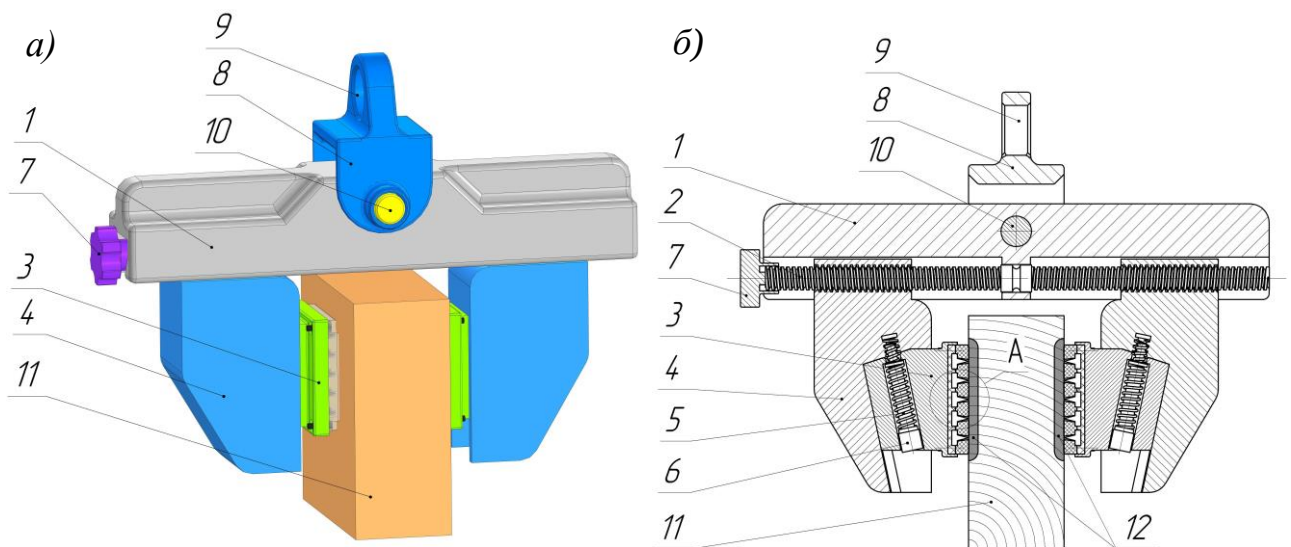


Рисунок 5.1 – Фрикционно-зажимное ГЗУ с клиновыми ошипованными КЭ для перемещения изделий из древесины: *а* – 3D-модель; *б* – общий вид;

1 – корпус; 2 – зажимной винт; 3 – клиновой 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.

Клиновой КЭ 3 (рис. 5.2) включает опорный корпус 13, упруго-эластичное основание 14, набор ошипованных модулей 15, объемно-эластичную прокладку 16, крепежные винты 17.

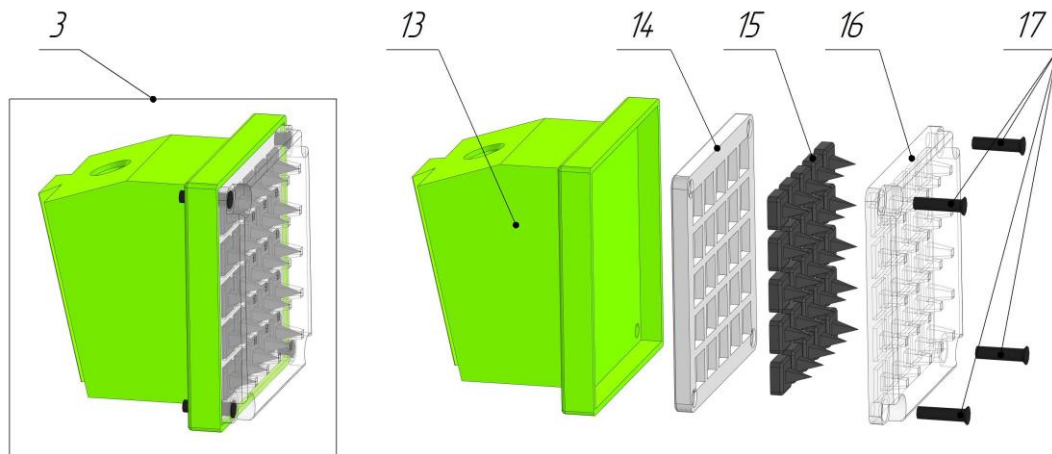


Рисунок 5.2 – 3D-модель клинового КЭ ГЗУ, оснащенного системой ошипованных подвижных модулей: 3 – клиновый КЭ ГЗУ в сборе; 13 – опорный корпус; 14 – упруго-эластичное основание; 15 – набор ошипованных модулей; 16 – объемно-эластичная прокладка; 17 – крепежные винты.

Работают с устройством следующим образом. 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 прижимается к поверхности 12, в результате обеспечивается предварительное зажатие груза, при этом происходит фрикционное взаимодействие поверхности упруго-эластичной прокладки 16 с зоной контактной поверхности 12, вершины шипов находятся в пограничной зоне контакта (рис. 5.3, а).

Грузозахватное устройство за скобу 8 через проушину 9 подвешивают на крюк грузоподъемного средства и поднимают груз. 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.

Шипы механически внедряются в поверхность древесины на величину, определяемую рельефом и характером упруго-вязкой неоднородной

поверхности древесины и массы груза (рис. 5.3, б). Одновременно пластически деформируется упруго-эластичное основание 14, регулируя глубину (h_1 , h_2 , h_3) внедрения шипов, обеспечивая надежное перемещение без повреждения поверхности перемещаемого изделия из древесины. Далее производят перемещение груза. По окончании операции адресного перемещения груза ползуны 4 с клиновыми контактными элементами 3 симметрично разводят вращением зажимного винта 2 маховичком 7 и выводят шипы из контактного взаимодействия с древесиной. При снятии нагрузки возвратные пружины 5 приводят клиновые контактные элементы 3 в исходное положение, фрикционное взаимодействие с поверхностью груза прекращается. При этом поверхность древесины не повреждается, структура древесины не нарушается.

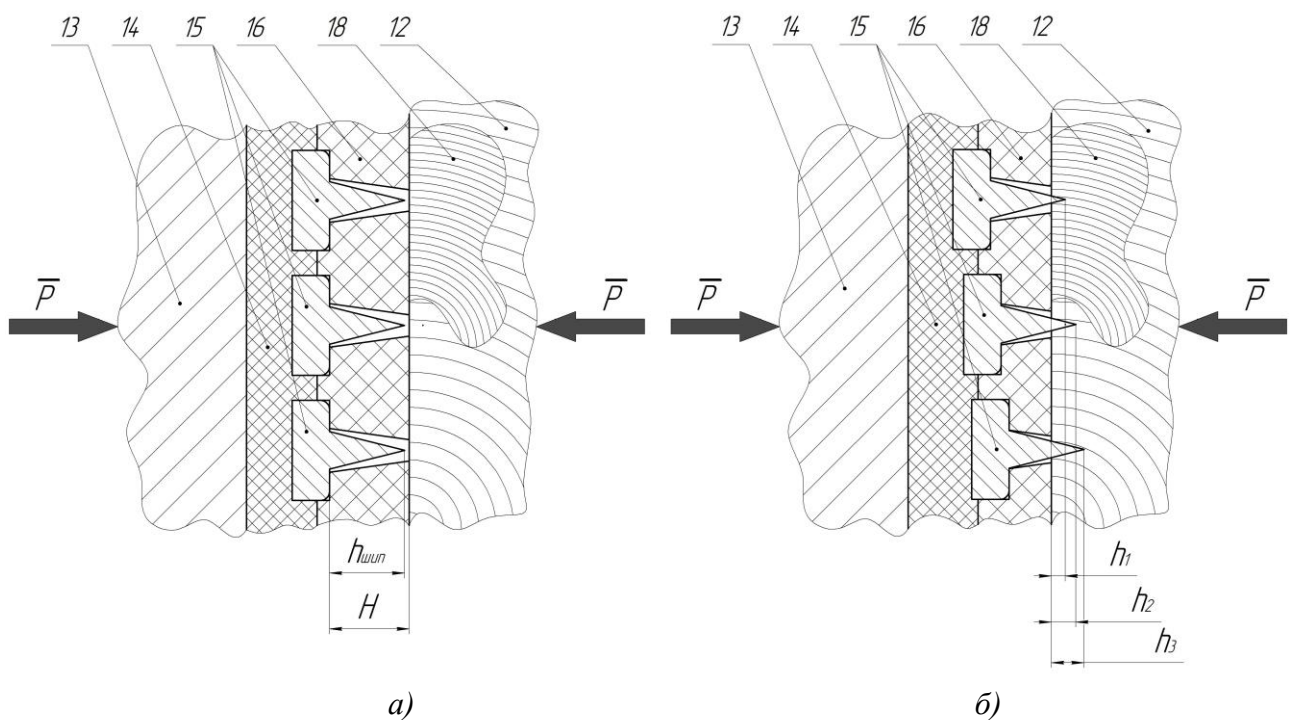


Рисунок 5.3 – Взаимодействие клиновых КЭ с древесиной: а – фрикционное; б – механическое; 12 – перемещаемое изделие из древесины; 13 – опорный корпус; 14 – упруго-эластичное основание; 15 – набор ошипованных модулей; 16 – объемно-эластичная прокладка; 18 – участок древесины с повышенной плотностью (пороки строения, сучки, свилеватость, крень и др.); P – направление усилия зажима груза; H – толщина накладки; $h_{шип}$ – высота шипа; h_1 , h_2 , h_3 – глубина внедрения шипов набора ошипованных модулей в древесину.

Каждый ошипованный модуль по-разному деформирует упруго-эластичное основание 14, внедряясь в контактную поверхность 12

перемещаемого груза 11 на глубину, определяемую плотностью локальной контактной поверхности и сопротивлением внедрению.

Таким образом, предложенное техническое решение позволяет обеспечить надежное перемещение деревянных конструкций без нарушения целостности поверхности древесины с оставлением допустимых отпечатков на контактной поверхности.

5.2 Фрикционно-зажимное грузозахватное устройство с клиновыми упругоподатливыми контактными элементами

Предложены технические решения фрикционно-зажимных ГЗУ, обладающие мировой новизной и защищенные патентами на изобретение (RU 2714991 C1 [107], RU 2714996 C1 [108]).

Повышение надежности ГЗУ и обеспечение сохранности перемещаемых изделий из массивной и клееной древесины может быть реализовано применением технического решения «Струбцина с клиновым зажимом для панелей» (рис. 5.4) [107].

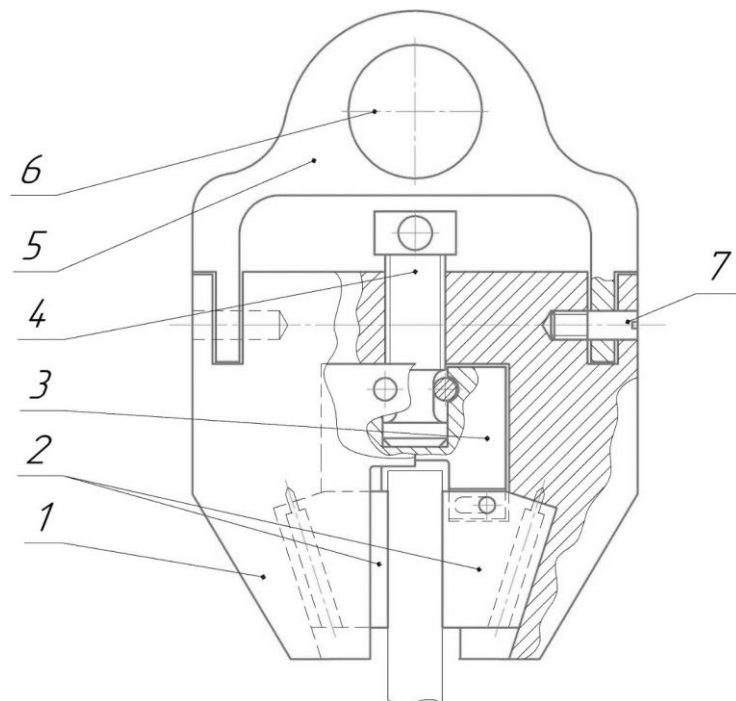


Рисунок 5.4 – Фрикционно-зажимное ГЗУ с клиновыми КЭ для перемещения тонких панелей из клееной древесины: 1 – корпус; 2 – опорные элементы; 3 – коромысло; 4 – винт; 5 – скоба; 6 – проушина; 7 – ось.

ГЗУ состоит из П-образного корпуса 1, в котором подвижно закреплены два клиновых КЭ 2 на наклонных полках, что обеспечивает их сходимость при движении КЭ вниз под действием веса зажатого груза. Скоба 5 шарнирно соединена с корпусом 1 двумя штифтами 7, имеет возможность поворота в плоскости, перпендикулярной корпусу. Проушина 6 предназначена для соединения с крюком грузоподъемного средства.

Два подвижных (клиновых) опорных элемента расположены симметрично на внутренних сторонах наклонных полок П-образного корпуса, обеспечивая их сходимость при подъеме груза. Это создает необходимое и достаточное усилие зажатия для удерживания груза силами трения. Увеличенная площадь контакта опорных элементов с грузом обеспечивает сохранность груза.

Наличие проушины на коромысле, шарнирно соединенном с корпусом, уменьшает опрокидывающие моменты, возникающие при подъеме груза из горизонтального положения в вертикальное и обратно (кантовке), повышает надежность струбцины, обеспечивает сохранность груза [109].

На основе технического решения, защищенного патентом на изобретение, разработано и в системе трехмерного моделирования «Компас-3D» выполнена САД-модель фрикционно-зажимного ГЗУ с клиновыми КЭ для перемещения изделий из древесины толщиной до 20 мм (рис. 5.5).

Для перемещения изделий из древесины предложена конструкция струбцины для плоских грузов [108] (рис. 5.6), включающая П-образный корпус 1, опорный элемент 2, подвижно закрепленный на одной из вертикальных полок под углом, прижимной элемент 3, установленный подвижно под углом на ползуне 4, закрепленный горизонтально на второй полке напротив опорного элемента 2 и шарнирно соединенный с прижимным винтом 5. Серьга 6 для присоединения к крюку грузоподъемного средства размещена в пазе 7, выполненном по дуге, обращенной вогнутостью к опорному элементу 2 на горизонтальной полке корпуса [51].

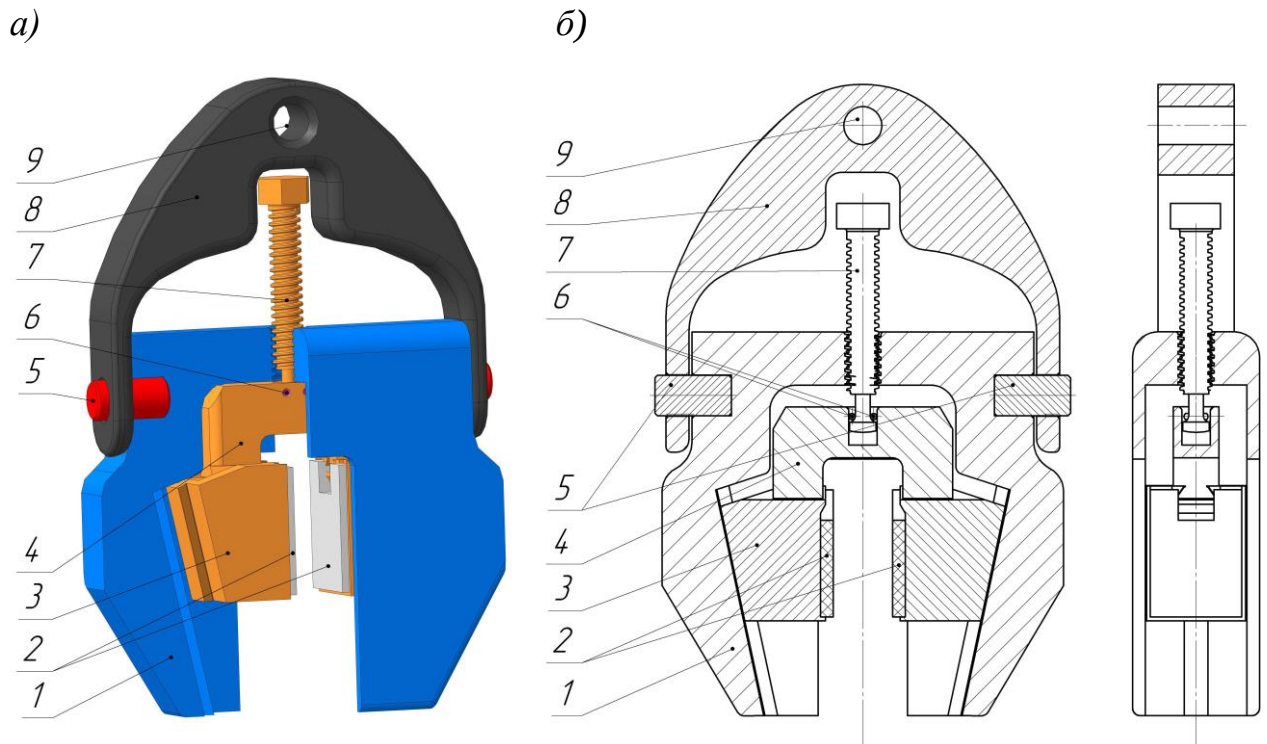


Рисунок 5.5 – Фрикционно-зажимное ГЗУ с клиновыми КЭ для перемещения изделий из древесины толщиной до 20 мм: *а* – 3D-модель; *б* – общий вид;

1 – корпус; 2 – вкладыш из упругоподатливого материала; 3 – опорный элемент;
4 – коромысло; 5 – ось; 6 – штифт; 7 – винт; 8 – скоба; 9 – проушина.

Наличие подвижных клиновых элементов (опорного и зажимного), расположенных симметрично на внутренних сторонах вертикальных полок П-образного корпуса под углом к полкам, создает необходимое и достаточное зажатие груза для его удерживания силами трения, увеличенная площадь контакта опорного и прижимного элементов с грузом обеспечивает сохранность груза [51].

Паз, выполненный на горизонтальной полке корпуса по дуге, обращенной вогнутостью к опорному элементу для закрепления серьги, исключает рывки при подъеме груза из горизонтального положения в вертикальное и обратно (кантовке), повышает надежность струбцины и обеспечивает сохранность груза [51].

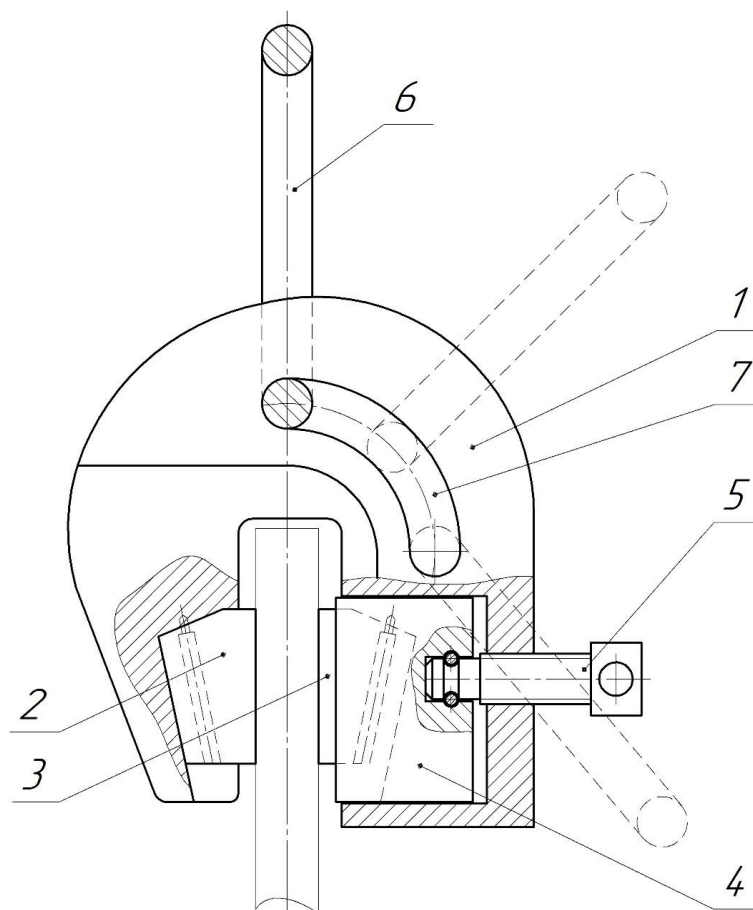


Рисунок 5.6 – Струбцина с клиновым зажимом для плоских грузов:
1 – корпус; 2 – опорный элемент; 3 – прижимной элемент; 4 – ползун; 5 – винт; 6 – серьга; 7 – паз.

Для увеличения диапазона размеров по толщине зажимаемых изделий из массивной и клееной древесины разработана конструкция фрикционно-зажимного ГЗУ с клиновыми КЭ (рис. 5.7), включающая корпус 1, винт 2 с двумя концевыми участками с правой и левой ходовой самотормозящейся резьбой. Винт вращают с помощью маховичка 7, обеспечивая зеркальное движение ползунов 3, в которые установлены КЭ 4. Задняя поверхность КЭ расположена под углом относительно передней поверхности.

Перемещение КЭ вниз ограничено возвратной пружиной 6 с крепежным винтом 5. При снятии нагрузки возвратная пружина 6 возвращает КЭ в исходное положение. Для подвешивания на грузоподъемное средство предназначена скоба 9 с проушиной 8, которая шарнирно закреплена в корпусе ГЗУ на оси 10.

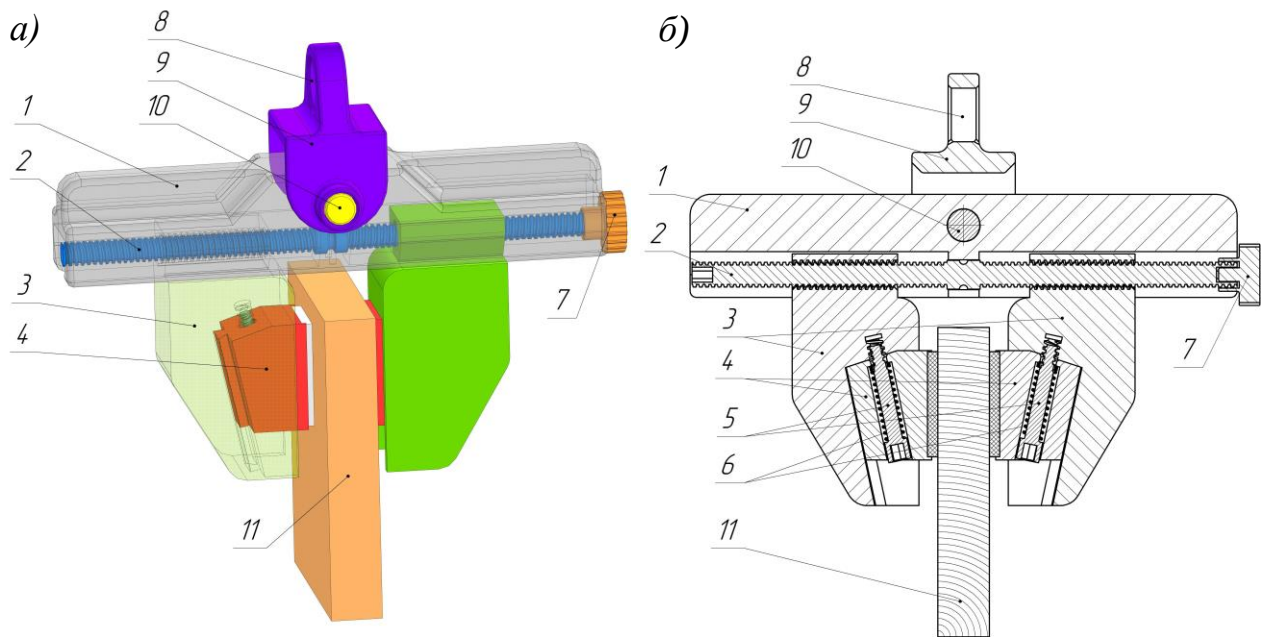


Рисунок 5.7 – Фрикционно-зажимное ГЗУ с клиновыми КЭ для перемещения изделий из древесины толщиной до 200 мм: *а* – 3D-модель; *б* – общий вид;

1 – корпус; 2 – зажимной винт; 3 – ползун; 4 – клиновидный контактный элемент; 5 – крепежный винт; 6 – возвратная пружина; 7 – маховичок; 8 – проушина; 9 – скоба; 10 – ось; 11 – изделие из древесины

ГЗУ с разведенными КЭ устанавливают на кромку перемещаемой деревянной конструкции. Зажимным винтом 2 ползуны 3 симметрично сводят и создают контакт упругоподатливой накладки 13 (рис. 5.8) с поверхностью перемещаемой деревянной 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 дожимают 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.

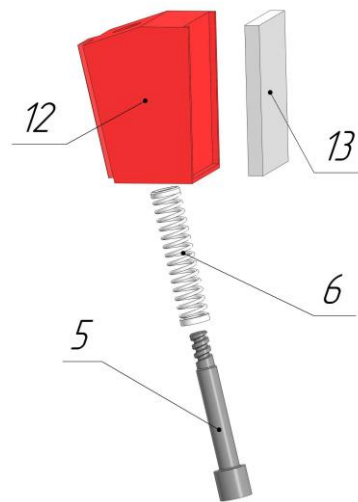


Рисунок 5.8 – Клиновидный контактный элемент ГЗУ:

5 – крепежный винт; 6 – возвратная пружина; 12 – опорный корпус; 13 – накладка из упругоподатливого материала

Достоинством ГЗУ является возможность перемещения плоских и объемных изделий из массивной и клееной древесины размером по толщине от 3 до 120 мм и более.

Для обеспечения надежной работы ГЗУ накладки 13 на опорный корпус 12 выполнены из упругоподатливого материала с высокими адгезионными характеристиками, например, резины 1Ф-1-ТМКЩ-С-3 [58] (тепломорозокислотощелочестойкая, средней степени твердости, толщиной 3 мм).

Предложенные конструкции фрикционно-зажимных ГЗУ позволяют обеспечить надежное перемещение КДК и изделий из древесины без повреждения кромок и лицевой контактной поверхности перемещаемого груза.

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

Грузоподъемность фрикционно-зажимных ГЗУ определяют по площади контактной поверхности и коэффициенту трения. Грузоподъемность фрикционно-зажимного ГЗУ с клиновыми КЭ из упругоподатливого материала

в зависимости от контактной площади одного КЭ при фиксированном значении коэффициента трения представлена на рисунке 5.9.

ГЗУ (рис. 5.5, 5.7) с размерами контактной поверхности КЭ 30 x 40 мм из силиконовой резины при коэффициенте трения 0,26 обеспечивает грузоподъемность 63,6 кг; для вулканизированной резины при коэффициенте трения 0,4 – грузоподъемность 97,9 кг.

В случае нарушения расчетной грузоподъемности ГЗУ происходит смятие контактной поверхности древесины и обеспечивается безопасность транспортных операций.

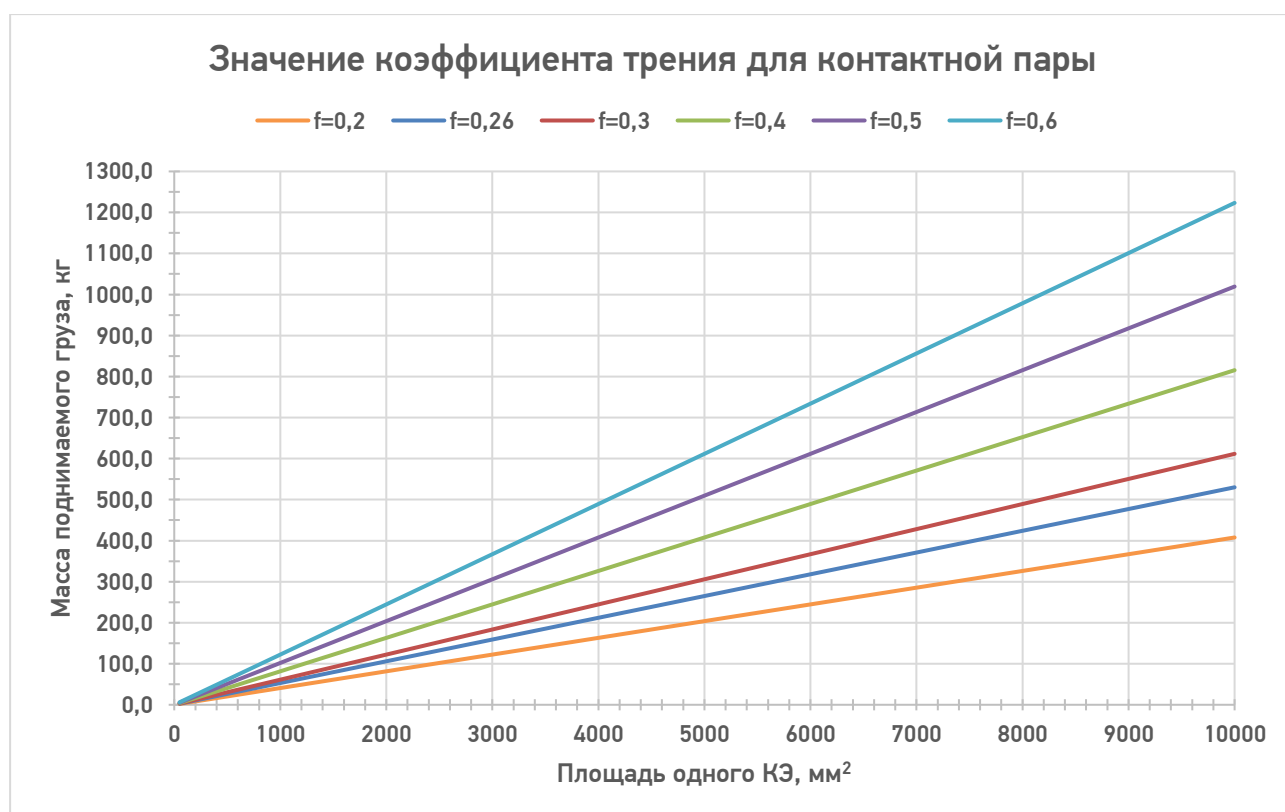


Рисунок 5.9 – Зависимость массы поднимаемого груза от площади одного КЭ ГЗУ при фиксированном значении коэффициента трения

5.3 Концептуально-технологические решения грузозахватных устройств для перемещения изделий из древесины на основе аддитивных технологий

При разработке концептуальных моделей ГЗУ из полимерных материалов с целью анализа конструкции для проведения функциональных тестов и доработки применены аддитивные технологии.

Созданы прототипы (физические модели) деталей ГЗУ, выполненные по технологии *FDM*-печати из филамента «*PLA+*» и осуществлена их сборка (рис. 5.10).

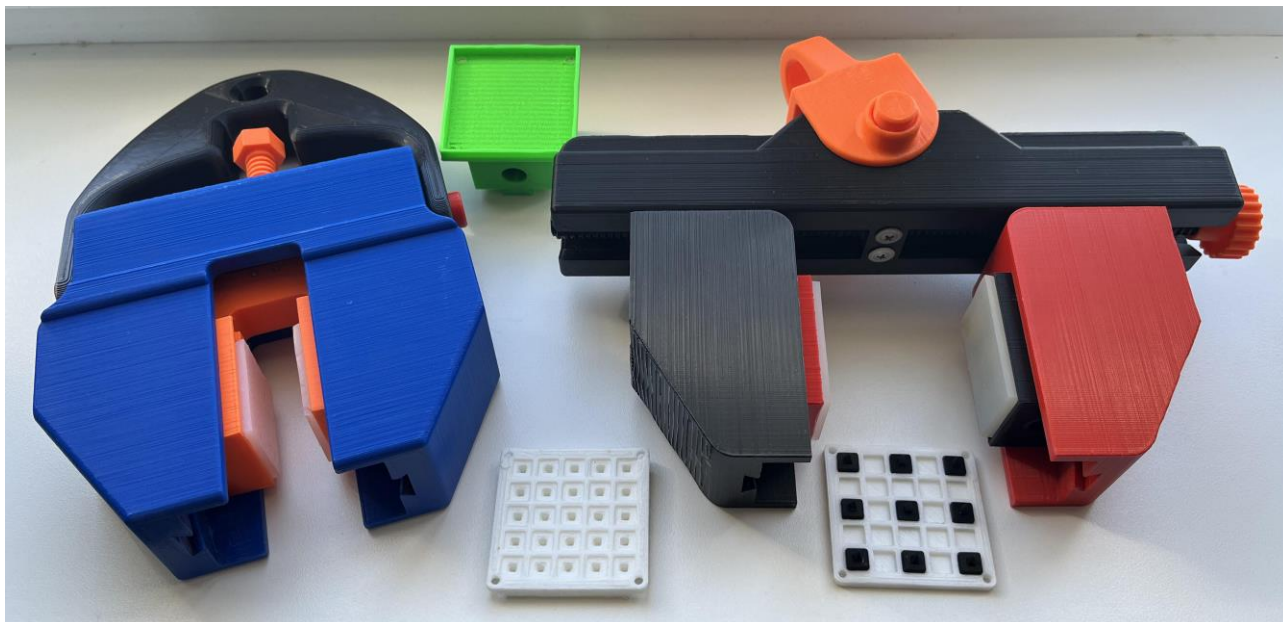


Рисунок 5.10 – Физические модели ГЗУ, изготовленные с применением аддитивных технологий

Предложенные технические решения конструкций ГЗУ переданы на базовое предприятие АО «ЦС «Звездочка» в цех специализированного производства судовой мебели [110], что позволяет усовершенствовать технологический процесс производства изделий из древесины, повысить надежность и безопасность при выполнении транспортно-логистических операций (приложение Б).

5.4 Эффективность совершенствования логистических операций в деревообрабатывающем производстве

В качестве примера за основу взято мебельное производство. Выпуск высококачественной серийной продукции на мебельном предприятии определяется автоматизацией межоперационных процессов, скоростью движения материалов по технологической цепочке, применением вспомогательного оборудования для транспортно-логистических операций, уровнем механизации складских операций и др. Применение вспомогательного

оборудования в мебельном производстве (подъемные столы, тележки-этажерки, конвейеры, специальные грузозахватные устройства в сочетании с грузоподъемными механизмами) позволяет оптимизировать транспортно-логистические операции. Оценить эффективность логистических операций в денежном эквиваленте не представляется возможным.

Логистические операции выполняются на окончательно обработанных изделиях из древесины, поэтому любое механическое воздействие ведет к выбраковке продукции из-за несоответствия качеству.

Браком в сфере производства называют изделие или его элемент (деталь, узел), качество которого не укладывается в принятые на предприятии нормы, стандарты, ТУ, и применять который по прямому назначению невозможно или допустимо только с дополнительной корректировкой, требующей затрат.

Качество лицевых поверхностей мебели установлено ГОСТ 16371-2014. В п. 5.2.21 указано, что «на видимой поверхности мебели не допускаются дефекты: расхождения полос облицовки, нахлестки, отслоения, пузыри под облицовкой, клеевые пятна, шлифовка, потертость, загрязнение поверхности, вырывы, вмятины, царапины, трещины, пятна, потеки клея, заусенцы и морщины» [21].

Допустимый процент брака – минимально приемлемый уровень несоответствия качеству. Зависит от характера производства и установленных критериев качества. Допустимый процент бракованной продукции каждое предприятие устанавливает самостоятельно. Нормативными документами не предусмотрено нормирование этого показателя. На развитых предприятиях допустимый процент брака не должен превышать 2-3%, максимум до 5%.

Риск образования брака есть на любом этапе производства. Причины потерь от брака полуфабрикатов или продукции могут быть совершенно разными – низкое качество сырья и материалов, нарушение технологии производства, неисправность производственного оборудования, нарушение технологии при перемещении продукции, низкая квалификация или халатность производственного персонала и т. д.

«Наибольший процент брака приходится на производство (37,4 %) и логистику (33,7 %). Доли снабжения (10,5 %) и обеспечения производства (18,4 %) гораздо меньше» [119]. Таким образом, на транспортно-логистические операции приходится около 1/3 всего объема бракованной продукции.

Потери от брака в производстве увеличивают себестоимость выпуска продукции и снижают рентабельность производства. На основании анализа актуальной информации потерь от брака на предприятии разрабатываются мероприятия по сокращению брака продукции до минимально возможного уровня [119].

Применение предложенных решений ГЗУ в технологических процессах деревообрабатывающих производств позволяет избежать повреждения лицевых поверхностей и кромок перемещаемых изделий из древесины, сохранить качество продукции и снизить потери продукции от брака.

ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

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 [9]. При транспортно-логистических операциях необходимо применять специальные ГЗУ с учётом реологических и анизотропных свойств древесины, что позволит обеспечить надежность и безопасность при выполнении работ. Как показал проведенный анализ состояния вопроса, в настоящее время специальные технические решения для перемещения КДК и изделий из древесины практически отсутствуют. Определены основные направления по совершенствованию конструкции ГЗУ для перемещения изделий из древесины: разработка и проектирование новых быстросъемных фрикционно-зажимных ГЗУ с клиновыми КЭ из упругоподатливых материалов или с ошипованными КЭ.

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

составляют: 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, предложено 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 фрикционно-зажимных ГЗУ для перемещения изделий из ЛДСП с оснащением КЭ силиконовой резиной рекомендуется применять величину коэффициента трения $\leq 0,26$.

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 2 мм и высотой 3 мм.

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 достаточного практического промышленного опыта применения фрикционно-зажимных ГЗУ с упругоподатливыми и ошипованными КЭ следует продолжить целенаправленные исследования и разработку новых технических и технологических решений по совершенствованию конструкций ГЗУ.

ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

В диссертации применены следующие сокращения:

R^2 – величина достоверности аппроксимации;

ГЗУ – грузозахватное устройство;

ДВП – древесноволокнистая плита;

ДПК – древесина перекрестно-клееная

ДСтП – древесностружечная плита;

КДК – конструкция деревянная клееная;

КЭ – контактный элемент;

ЛДСП – ламинированная древесностружечная плита;

МНК – метод наименьших квадратов;

ПО – программное обеспечение;

ТУ – технические условия.

В диссертации применены термины и определения:

CLT-панели (*Cross Laminated Timber* – перекрестно-клееная древесина) – многослойные деревянные панели из ели и сосны, каждый следующий слой которых приклеен перпендикулярно предыдущему.

LVL-брус (*Laminated Veneer Lumber*) – материал, изготавливаемый путем склеивания тонких листов древесины под высоким давлением и температурой.

Адгезия – (от лат. *adhaesio* – прилипание) сцепление поверхностей разнородных твёрдых тел.

Анизотропия древесины – неодинаковость физических свойств древесины (прочность, модуль упругости, теплопроводность, обрабатываемость резанием и др.) в разных направлениях.

Величина достоверности аппроксимации (коэффициент детерминации) – статистическая мера того, насколько близки данные к линии регрессии или насколько хорошо модель соответствует наблюдениям.

Деформативность древесины – способность изменять свои размеры и форму при внешних воздействиях нагрузки, влажности, температуры.

Древесный слоистый пластик – слоистая клееная древесина, состоящая из склеенных слоев пропитанного бакелитовым лаком лущеного шпона, у которой волокна древесины в смежных листах по отношению друг к другу имеют заданное направление.

Древесностружечная плита – листовой материал, изготовленный путем горячего прессования древесных частиц, преимущественно стружки, смешанных со связующим неминерального происхождения с введением при необходимости специальных добавок.

Древесноволокнистая плита – листовой материал, изготовленный путем горячего прессования или сушки ковра из древесных волокон с введением при необходимости связующих и специальных добавок.

Захват – элемент грузозахватного средства, непосредственно взаимодействующий с грузом.

Когезия – (от лат. *cohaesus* – связанный, сцепленный), сцепление частиц вещества (молекул, атомов или ионов), составляющих одну конденсированную фазу.

Конструкция деревянная клееная (КДК) – элемент здания или другого строительного сооружения из клееной древесины, выполняющий определенные несущие, ограждающие и/или эстетические функции.

Крень – изменение строения древесины хвойных пород в сжатой зоне ствола и сучьев, проявляющееся в виде кажущегося резкого утолщения поздней древесины годовичных слоев.

Ламели – пластинчатые элементы клееных конструкций.

Лист древесного слоистого пластика – древесный слоистый пластик толщиной не более 15 мм.

Лицевая плась древесноволокнистой (древесностружечной плиты) – гладкая плась прессованной древесноволокнистой (древесностружечной) плиты.

Несущая способность – способность выдерживать нагрузку при поддержании нормального функционирования.

Оборотная плась древесноволокнистой (древесностружечной) плиты – плась древесноволокнистой (древесностружечной) плиты менее гладкая или с отпечатком транспортной сетки.

Ортотропность древесины – свойство, при котором механические свойства материала различны в трёх взаимно перпендикулярных направлениях – продольном, радиальном и тангенциальном.

Перемещение груза – совокупность действий, связанных с его перемещением в пространстве без изменения геометрических форм, размеров и физико-химических свойств; процесс перемещения включает транспортирование груза и начально-конечные операции (подготовка, погрузка, разгрузка, перегрузка, складирование, подача транспортных средств и т.д.).

Подъемные сооружения – комплекс механизмов и оборудования для подъема и перемещения грузов или людей в границах определенной зоны.

Плась – широкая кромка пиломатериала (наибольшая поверхность).

Плита древесного слоистого пластика – древесный слоистый пластик толщиной не менее 15 мм.

Реологические свойства древесины – способность древесины деформироваться под нагрузкой во времени.

Ретроним – новое имя или название, изменённое после того, как первоначальное наименование стало использоваться для другого предмета или для совокупности нового предмета и ранее существовавшего.

Свилеватость древесины – извилистое или беспорядочное расположение волокон древесины.

Слоистая клееная древесина – древесный материал, полученный склеиванием между собой листов лущеного шпона, или с применением внутренних слоев, состоящих из других тонких листовых материалов (тонких древесно-стружечных плит, древесноволокнистых плит, резины, асбеста, реек (столярная плита) и др.).

Сортименты – разновидности лесоматериалов определенного назначения.

Субтрактивное производство – процесс, при котором материал удаляется из твердого блока для создания определенной формы или продукта.

Фанера – слоистая клееная древесина, состоящая из склеенных между собой трех и более листов лущеного шпона с взаимно перпендикулярным расположением волокон древесины в смежных слоях.

Фанерная плита – слоистая клееная древесина, состоящая из склеенных между собой семи и более листов лущеного шпона с заданным направлением волокон древесины в смежных слоях.

Филамент – (от англ. *filament* – нить, волокно), в 3D-печати это материал на основе базовых полимеров или их сочетаний, вытянутый в виде твердой нити постоянного диаметра и размещенный на бобине для удобства 3D-печати, перевозки и хранения.

Форвардер – трелёвочный трактор, оборудованный грузовым отсеком и манипулятором, предназначенный для сбора, предварительной сортировки и транспортировки леса.

Фрикционный захват – захват, действие которого основано на удержании груза за счет сил трения между поверхностью груза и элементами захвата.

Шпон – тонкий лист древесины.

Упругоподатливый материал – материал, податливость которого создается за счет его упругих деформаций.

Харвестер – многооперационная лесозаготовительная машина, предназначенная для валки, обрезки сучьев и раскряжевки сортиментов на лесосеке.

Эластомер – высокомолекулярный материал, который быстро возвращается к своим первоначальным размерам и форме после существенной деформации слабым усилием и ослабления усилия.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ашкенази Е. К., Ганов Э. В. Анизотропия конструкционных материалов. Л.: Машиностроение, 1980. 247 с.
2. 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. – EDN JQENRF.
3. Шишло С. В. Формирование эффективно функционирующих логистических систем на лесопромышленных предприятиях / С.В. Шишло // Труды БГТУ. №7. Экономика и управление. – 2010. – № 7. – С. 244-249.
4. Кравченко, П. П. Цифровые технологии в лесной промышленности: перспективы и барьеры / П. П. Кравченко, Д. С. Бурцев // Вопросы инновационной экономики. – 2022. – Т. 12, № 2. – С. 1029-1050. – DOI 10.18334/vines.12.2.114874
5. Вайнсон А.А., Андреев А.Ф. Крановые грузозахватные устройства: Справочник. М.: Машиностроение, 1982. – 304 с., ил.
6. Грузозахватные устройства. Справочник / Ю.Т. Козлов, А.М. Обермейстер и др. М.: Транспорт, 1980. – 223 с.
7. Руденко А.В., Дужевский И.А. «Фрикционные грузозахватные устройства для перемещения панелей из древесины» // современные технологии в машиностроении». сборник статей XXIII Международной научно-технической конференции. Пенза, 2019. С. 52-56.

8. 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. – EDN KHTCRI.

9. Экспериментальное определение несущей способности ошипованных контактных элементов при перемещении конструкций из древесины / Дужевский И.А., Мелехов В.И., Бабкин А.И. // Системы. Методы. Технологии. – 2024. – № 3(63). – С. 159-166. – DOI 10.18324/2077-5415-2024-3-159-166.

10. Дужевский, И.А. (2025) 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. – DOI 10.18324/2077-5415-2025-1-77-86.

11. Насковец, М. Т. Организация перевозок лесной продукции учеб.-метод. пособие для студентов специальности 1-46 01 01 «Лесоинженерное дело» / М. Т. Насковец, Р. О. Короленя. - Минск : БГТУ, 2014.- 102 с. ISBN 978-985-530-376.4

12. Аллегри Т. Транспортно-складские работы. / Пер. с англ. Ю.К. Трубина. – М.: Машиностроение, 1989. – 336 с.

13. Александров М.П. Подъемно-транспортные машины. – М.: Высшая школа, 1985 – 520 с.

14. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности опасных производственных объектов, на которых используются подъемные сооружения». Утв. приказом Федеральной служба по экологическому, технологическому и атомному надзору от 26 ноября 2020 года N 461. Зарегистрировано в Минюсте РФ 30 декабря 2020 года, регистрационный N 61983. – 98 с.

15. Приказ Министерства труда и социальной защиты РФ от 28 октября 2020 г. № 753н "Об утверждении Правил по охране труда при погрузочно-разгрузочных работах и размещении грузов".

16. Правила по охране труда в лесозаготовительном, деревообрабатывающем производствах и при выполнении лесохозяйственных работ, утв. приказом Минтруда России от 23.09.2020 №644н.

17. Организация перевозок лесопродукции : учебник / Э. О. Салминен, М. М. Овчинников, Ю. А. Бит, Н. А. Тюрин. — Санкт-Петербург : Интермедия, 2014. — 494 с. — ISBN 978-5-4383-0074-8. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/55319> (дата обращения: 09.02.2025). — Режим доступа: для авториз. пользователей.

18. Глебов, И. Т. Энциклопедия деревообработки : учебное пособие / И. Т. Глебов. — Санкт-Петербург : Лань, 2015. — 388 с. — ISBN 978-5-8114-2013-1. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/72979> (дата обращения: 02.02.2025). — Режим доступа: для авториз. пользователей.

19. Колодий, П. В. Лесозексплуатация с основами товароведения : учебное пособие : [12+] / П. В. Колодий, Е. П. Сигай, Т. А. Колодий. — Минск : РИПО, 2016. — 276 с. : ил. — Режим доступа: по подписке. — URL: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=463300> (дата обращения: 02.02.2025). — Библиогр. в кн. — ISBN 978-985-503-584-9. — Текст : электронный.

20. ГОСТ 2140-81 Видимые пороки древесины. Классификация, термины и определения, способы измерения [Текст]. — Введ. 1982-01-01. — Москва : ИПК Издательство стандартов, 1997. — 121 с.

21. ГОСТ 16371-2014 Мебель. Общие технические условия [Текст]. — Введ. 2016-01-01. — Москва : Стандартиформ, 2015. — 31 с.

22. ГОСТ 7016-2013 Изделия из древесины и древесных материалов. Параметры шероховатости поверхности [Текст]. — Введ. 2014-01-01. — Москва : Стандартиформ, 2014. — 16 с.

23. ГОСТ 20850-2014 "Конструкции деревянные клееные несущие. Общие технические условия" (введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 26 ноября 2014 г. № 1937-ст).
24. Guenther, Raphaela & Tajmar, Martin & Bach, Christian. (2024). Wood and Wood-Based Materials in Space Applications—A Literature Review of Use Cases, Challenges and Po-tential. *Aerospace*. 11. 910. 10.3390/aerospace11110910.
25. MPELE, MAMBA & ABOUAR, BAANA & Okpwe Mbar-ga, Richard. (2024). Recovering wood wastes for potential use in building. *World Journal of Advanced Engineering Technology and Sciences*. 12. 318-331. 10.30574/wjaets.2024.12.2.0298.
26. Chudzińska, Agnieszka & Orchowska, Anita & Hassan, Somia & Adebayo, Omotara. (2024). Contemporary possibilities for the use of reclaimed wood in interior design.
27. Mao Y, Hu L, Ren ZJ. Engineered wood for a sustainable future. *Matter*. 2022;5 (5):1326-1329
28. Bayat, Masuod. (2023). Types of Engineered Wood and Their Uses. 10.5772/intechopen.107739.
29. Olorunnisola, Abel. (2018). Uses of Wood and Wood Products in Construction. 10.1007/978-3-319-65343-3_5.
30. Серов Е.Н., Санников Ю.Д., Серов А.Е. Проектирование деревянных конструкций: учебное пособие. – М.: Издательство АСВ, 2011. – 536 с.
31. Платов, С. А. Анализ современных технологий клееных деревянных конструкций (КДК) / С. А. Платов // Международный журнал прикладных наук и технологий Integral. – 2020. – № 3. – С. 35. – EDN RPKZDQ.
32. Уголев Б.Н. Древесиноведение и лесное товароведение: Учебник. – М.: ГОУ ВПО МГУЛ, 2007. – 351 с.
33. ГОСТ 24260-80 Сырье древесное для пиролиза и углежжения. Технические условия [Текст]. – Введ. 1983-01-01. – Москва : Издательство стандартов, 1994. – 13 с.

34. ГОСТ 8440-74 Сырье древесное для производства угля специального назначения. Технические условия [Текст]. – Введ. 1975-07-01. – Москва : ИПК Издательство стандартов, 1998. – 4 с.

35. Никифоров Е. П. Клееная древесина: технология изготовления, свойства, преимущества и недостатки, области применения / Е. П. Никифоров // Современные научные исследования и инновации. – 2019. – № 7(99). – С. 6. – EDN TVDZCD.

36. Волынский В.Н. Технология клееных материалов. Издательство АГТУ. 163007 Архангельск, наб. Сев.Двины, 17 – 2003, 281 с.

37. Исаев, С. П. Основные виды клееных древесных материалов для строительства / С. П. Исаев, И. И. Здановская // Актуальные проблемы лесного комплекса. – 2006. – № 14. – С. 106-109. – EDN VECKWF.

38. Бирюков В.Г. Технология клееных материалов и древесных плит. Москва: Изд-во Моск. гос. ун-та леса, 2005. 220 с.

39. Разиньков Е.М. Технология и оборудование клееных материалов: Уч. пособие. Воронеж: Изд-во Воронеж гос. лесотехнич. ун-та, 2013. 291 с.

40. ГОСТ 34034–2016 Древесина слоистая клееная. Классификация [Текст]. – Введ. 2018-04-01. – Москва : Стандартиформ, 2017. – 11 с.

41. Shevchuk, K. A. Production of glued wood materials is the basis for effective use of forest resources / K. A. Shevchuk // Journal of Advanced Research in Technical Science. – 2021. – No. 26. – P. 73-76. – DOI 10.26160/2474-5901-2021-26-73-76. – EDN AJRJGF.

42. СП 64.13330.2017. Деревянные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-25-80. М.: РОССТАНДАРТ ФГУП "СТАНДАРТИНФОРМ", 2017.

43. ГОСТ 27751-2014 Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения [Текст]. – Введ. 2015-07-01. – Москва : Стандартиформ, 2015. – 16 с.

44. Чумак К. Г. Характерные особенности клееного бруса из сращенных заготовок и технология его производства / К. Г. Чумак, О. Н. Чернышев // Наука и образование сегодня. – 2019. – № 5(40). – С. 25-27. – EDN QSJTKU.
45. Чемоданов А.Н., Минина Е.А., Ямщиков Е.Ю. Перспективы развития деревянного домостроения // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2018. Т. 22. № 2. С. 81–86. DOI: 10.18698/2542-1468-2018-2-81-86
46. ГОСТ 10632-2014 Плиты древесностружечные. Технические условия [Текст]. – Введ. 2015-07-01. – Москва : Стандартинформ, 2015. – 16 с.
47. ГОСТ 32289–2013 Плиты древесно-стружечные, облицованные пленками на основе термореактивных полимеров. Технические условия [Текст]. – Введ. 2014-07-01. – Москва : Стандартинформ, 2014. – 23 с.
48. Леонтьев, Л.Л. Древесиноведение и лесное товароведение: Учебник/ Л.Л. Леонтьев. – СПб.: Издательство «Лань», 2017. – 416 с.
49. Глебов, И. Т. Энциклопедия деревообработки : учебное пособие / И. Т. Глебов. — Санкт-Петербург : Лань, 2015. — 388 с. — ISBN 978-5-8114-2013-1. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/72979> (дата обращения: 02.02.2025). — Режим доступа: для авториз. пользователей.
50. Глебов И.Т. Физика древесины: Учебное пособие. – Екатеринбург: УГЛТУ, 2018. – 80 с.
51. Руденко А.В., Дужевский И.А. «Динамика совершенствования конструкций фрикционных грузозахватных устройств для перемещения изделий из древесины» // Актуальные вопросы инновационного развития Арктического региона РФ. Сборник материалов II Всероссийской научно-практической конференции. Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования, Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова. 2021. С. 25-30.
52. Пушин В. Схемы строповки материалов. / Библиотека инженера по охране труда, 2006, №10(76). – 50 с.

53. Подъем и перемещение грузов / З.Б. Харас, В.М. Федоров, Э.Н. Исаков, Д.Л. Ярошевская. М.: Стройиздат, 1987. – 319 с.
54. Андреев, А. Ф. Применение грузозахватных устройств для строительно-монтажных работ. / А. Ф. Андреев, А. А. Богорад, Р. А. Каграманов – М.: Стройиздат, 1985. – 200 с.
55. Вайнсон А.А., Андреев А.Ф. Специализированные крановые грузозахваты для штучных грузов. М.: Машиностроение, 1972. – 200 с.
56. Лысяков А.Г. Вспомогательное оборудование для перемещения грузов. М.: Машиностроение, 1989. – 232 с.
57. Бабкин, А. И. Совершенствование фрикционных грузозахватных устройств для перемещения деревянных конструкций : специальность 05.21.05 "Древесиноведение, технология и оборудование деревопереработки" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Бабкин Александр Иванович, 2018. – 174 с. – EDN FUNSTC.
58. ГОСТ 7338-90 Пластины резиновые и резиотканевые. Технические условия [Текст]. – Введ. 1991-07-01. – Москва : Стандартиформ, 2005. – 27 с.
59. Силиконовая резина [Электронный ресурс] – Режим доступа : https://ru.wikipedia.org/wiki/Силиконовая_резина, свободный (дата обращения : 01.05.2024).
60. Морозов, А. С. Повышение эффективности технологического оснащения погрузочных и монтажных работ в судостроении и судоремонте : специальность 05.08.04 "Технология судостроения, судоремонта и организация судостроительного производства" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Морозов Алексей Сергеевич. – Санкт-Петербург, 2009. – 151 с. – EDN QEIZQF.
61. Бабкин А.И., Дужевский И.А. Грузозахватные устройства с шипованными контактными элементами для перемещения деревянных конструкций // Актуальные вопросы инновационного развития Арктического региона РФ. Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции. 2020. С. 10-14.

62. Краснов, А. А. Аддитивное и субтрактивное производство / А. А. Краснов, Е. В. Смоленцев // Инновационная наука. – 2016. – № 12-2. – С. 72-75. – EDN XETTVN.

63. ГОСТ Р 57558-2017 Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы. Часть 1. Термины и определения [Текст]. – Введ. 2017-12-01. – Москва : Стандартинформ, 2018. – 16 с.

64. I. Gibson, D.W. Rosen, and B. Stucker, Additive Manufacturing Technologies, DOI 10.1007/978-1-4419-1120-9_3, # Springer Science+Business Media, LLC 2010. – p. 472

65. 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. – EDN AEIRTC.

66. Каталог пластмасс для 3d-печати [Электронный ресурс]. URL: https://esun-3d.ru/catalog/pla_pla/ (дата обращения 30.01.2025)

67. ГОСТ 11262-2017 (ISO 527-2:2012). Пластмассы: метод испытания на растяжение [Текст]. – Введ. 2018-10-01. – Москва : Стандартинформ, 2018. – 20 с.

68. ГОСТ 34370-2017 (ISO 527-1:2012). Пластмассы. Определение механических свойств при растяжении. Часть 1. Общие принципы [Текст]. – Введ. 2018-10-01. – Москва : Стандартинформ, 2018. – 27 с.

69. ГОСТ 12423-2013 (ISO 291:2008) Пластмассы: условия кондиционирования и испытания образцов (проб) [Текст]. – Введ. 2015-01-01. – Москва : Стандартинформ, 2014. – 8 с.

70. ГОСТ 33693 – 2015 (ISO 20753:2008) Пластмассы: образцы для испытания [Текст]. – Введ. 2017-01-01. – Москва : Стандартинформ, 2016. – 16 с.

71. Snyder, T.J.; Andrews, M.; Weislogel, M.; Moeck, P.; Stone-Sundberg, J.; Birkes, D.; Hoffert, M.P.; Lindeman, A.; Morrill, J.; Fercak, O.; et al. 3D Systems' Technology Overview and New Applications in Manufacturing, Engineering, Science, and Education. 3D Print. Addit. Manuf. 2014, 1, pp.169-176.
72. Waleed Ahmed, Essam Zaneldin. The Innovation of Using 3D Printing Technology in Mechanical and Manufacturing Engineering. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 938 (2020) 012002
73. Elvis Hozdi'c. Characterization and Comparative Analysis of Mechanical Parameters of FDM - and SLA-Printed ABS Materials. Appl. Sci. 2024, 14, 649
74. Tiba Raed Mhmood, Nazar Kais Al-Karkhi. A Review of the Stereolithography 3D Printing Process and the Effect of Parameters on Quality. Al-Khwarizmi Engineering Journal, Vol. 19, No. 2, June, (2023) pp. 82-94
75. Крагельский И.В. Трение и износ. – М.: Машиностроение, 1968. – 480 с.
76. Трение, износ и смазка (Трибология и триботехника) / А.В. Чичинадзе, Э.М. Берлинер, Э.Д. Браун и др.; Под общ. ред. А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 2003. – 576 с.
77. Справочник по триботехнике / Под общ. Ред. М. Хебды, А.В. Чичинадзе. В 3 т. Т. 1. Теоретические основы. – М.: Машиностроение, 1989. – 400 с.
78. Морозов А.С., Руденко А.В., Бабкин А.И., Гневашев Д.Ю. Исследование и определение факторов, влияющих на коэффициент взаимодействия контактной пары // Вопросы технологии, эффективности производства и надежности. Сборник докладов. Выпуск №22. – Северодвинск, 2009. – 209 с. – с. 167-175.
79. Морозов А.С., Руденко А.В., Бабкин А.И. Теоретические исследования отпечатков насечки зажимных грузозахватных устройств на работоспособность конструкционных материалов // Вопросы технологии, эффективности и надежности. Сборник докладов. Выпуск №23. – Северодвинск, 2010. – 244 с. – с. 77-81.

80. ГОСТ 27674-88. Трение, изнашивание и смазка. Термины и определения [Текст]. – Введ. 1989-01-01. – Москва : Комитет стандартизации и метрологии СССР, 1992. – 21 с.

81. Ивашков И.И. «Монтаж, эксплуатация и ремонт подъемно-транспортных машин» Учебник для студентов вузов по специальности «Подъемно-транспортные, строительные и дорожные машины и оборудование» М: Машиностроение, 1991. – 400 с.: ил.

82. 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. – EDN KHTCRI.

83. EN 1995-1-1 (2004): Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-1: General – Common rules and rules for buildings [Authority: The European Union Per Regulation 305/2011, Directive 98/34/EC, Directive 2004/18/EC]. – 121 с.

84. Лабудин Б.В. «Расчетные сопротивления клееной древесины при местном смятии» // Лесной журнал, 1991, №5. – с. 66-72.

85. Лабудин Б.В., Орлович Р.Б., Базенков Т.Н. «Сопротивление элементов клееной древесины местному смятию под углом к волокнам» // Лесной журнал, 1991, №3. – с. 59-63.

86. ГОСТ 1050-2013.Metalлопродукция из нелегированных конструкционных качественных и специальных сталей. Общие технические условия. [Текст]. – Введ. 2015-01-01. – Москва : Стандартинформ, 2014. – 36 с.

87. ГОСТ 16483.0–89 Древесина. Требования к физико-механическим испытаниям. Введ. 01.07.1990. М.: ИПК Издательство стандартов, 1999. 11 с.

88. ГОСТ 16483.10–73 Древесина. методы определения предела прочности при сжатии вдоль волокон [Текст]. – Введ. 1974-07-01. – Москва : ИПК ИЗДАТЕЛЬСТВО СТАНДАРТОВ, 1999. – 7 с.

89. ГОСТ 16483.11–72 Древесина. Метод определения условного предела прочности при сжатии поперек волокон [Текст]. – Введ. 1973-01-01. – Москва : ИПК ИЗДАТЕЛЬСТВО СТАНДАРТОВ, 1999. – 6 с.

90. ГОСТ 16483.17–81 Древесина. Метод определения статической твердости [Текст]. – Введ. 1983-01-01. – Москва : ИПК ИЗДАТЕЛЬСТВО СТАНДАРТОВ, 1999. – 7 с.

91. ГОСТ 16483.24-73. Древесина. Метод определения модуля упругости при сжатии вдоль волокон. Введ. 01.01.1975. М.: ИПК Издательство стандартов, 1999. 4 с.

92. ГОСТ 16483.25-73. Древесина. Метод определения модуля упругости при сжатии поперек волокон. Введ. 01.01.1975. М.: ИПК Издательство стандартов, 1999. 6 с.

93. 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, 110.

94. J. Doyle¹ and J. C. F. Walker. Indentation hardness of wood. *Wood and Fiber Science*, 17(3), 1985, pp. 369-376.

95. 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*. Vol. 16 (65) Special Issue 2023, pp. 177-190

96. Kunwei Li. Brief Introduction to Properties of Wood and Application of Wood in Architectural Structures. *Highlights in Science, Engineering and Technology*. Volume 28 (2022), pp. 415-421

97. Караваева, М. С. Экспериментальное определение физико-механических свойств древесины / М. С. Караваева, С. В. Шлычков // Научному прогрессу – творчество молодых. – 2022. – № 1. – С. 71-73.

98. Папулова И.Е. Механические свойства и испытания древесины: учебное пособие. – Киров: ФГБОУ ВПО «ВятГУ», 2014. – 85 с.

99. Доровских, Н. Я. Определение механических характеристик дерева при растяжении и сжатии вдоль волокон / Н. Я. Доровских, С. Р. Кравцов, П. А. Полетаев // Наука. Промышленность. Оборона : Труды XIX Всероссийской научно-технической конференции. В 4-х томах, Новосибирск, 18–20 апреля 2018

года / Под редакцией С.Д. Саленко. Том I. – Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2018. – С. 36-39.

100. Корреляции механических и теплофизических характеристик древесины сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) / Ю. И. Головин, Д. Ю. Головин, А. А. Самодуров [и др.] // Известия Российской академии наук. Серия физическая. – 2021. – Т. 85, № 7. – С. 942-947.

101. Руденко А.В., Дужевский И.А. «О коэффициенте трения между деревянными панелями с чистовой обработкой поверхности и резиновыми контактными элементами с насечкой» // Актуальные вопросы инновационного развития Арктического региона РФ. Сборник материалов IV Всероссийской научно-практической конференции. Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова». 2023. С. 17-20.

102. 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. – EDN DERGPB.

103. Евдокимов Ю.А., Колесников В.И., Тетерин А.И., Планирование и анализ экспериментов при решении задач трения и износа. М.: Наука. 1980. – 228 с.

104. Реброва И.А. Планирование эксперимента: учебное пособие. – Омск: СиБАДИ, 2010. – 105 с.

105. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976. – 280 с.

106. Математическая статистика / Под ред. В.С. Зарубина, А.П. Крищенко. М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2001. – 424 с.

107. Патент на изобретение RU 2714991 C1 «Струбцина с клиновым зажимом для панелей». Авторы: Руденко А.В., Дужевский И.А. Опубликовано: 21.02.2020. Заявка № 2019122843 от 19.07.2019.

108. Патент на изобретение RU 2714996 C1 «Струбцина с клиновым зажимом для плоских грузов». Авторы: Руденко А.В., Дужевский И.А. Опубликовано: 21.02.2020. Заявка № 2019122842 от 19.07.2019.

109. 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. – EDN FUIBOW.

110. Производство судовой мебели [Электронный ресурс] : [офиц. сайт] / ЦС Звездочка. – Электрон. дан. – [Северодвинск] : Центр судостроения Звездочка, [2015]. – Режим доступа : <https://www.star.ru/Deyatelnost/Specializirovannie-proizvodstva/Proizvodstvo-sudovoy-mebeli>, свободный (дата обращения : 01.03.2025). – Загл. с экрана.

111. Справочник по конструкционным материалам / Под ред. Б.Н. Арзамасова, Т.В. Соловьева М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2005. – 640 с.

112. Сорокин В.Г. Марочник сталей и сплавов. М.: Машиностроение, 1989. 640 с.

113. Справочник по кранам: В 2 т.: Под общ. ред. М.М. Гохберга. – М.: Машиностроение, 1988. – 536 с.

114. Мелехов, В.И. (2025) Тепловые и прочностные характеристики ферромагнитной клеевой композиции для склеивания древесины / В.И. Мелехов, И.И. Соловьев, В.В. Прохоров, Е.В. Сазанова, И.А. Дужевский, Н.Г. Пономарева // Системы. Методы. Технологии. – 2025. – № 1(65). – С. 108-116. – DOI 10.18324/2077-5415-2025-1-108-116.

115. Артаболевский И.И. Теория механизмов и машин. М.: Наука 1975. – 369 с.
116. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия. / пер. с англ. М.: Мир, 1989. – 510 с.
117. Лобов Н.А. Динамика грузоподъемных кранов. М.: Машиностроение, 1987. – 160 с.
118. Матвеев В.В., Крупин Н.Ф. Примеры расчета такелажной оснастки. М. – Л.: Стройиздат, 1987. – 320 с.
119. Гребенников А. А. Потери от брака в производстве: особенности учета и анализа // «Справочник экономиста» : профессиональный журнал 2021. № 8. URL: https://www.profiz.ru/se/8_2021/analiz_poter_ot_braka/. Дата обращения: 05.03.2025. Режим доступа: свободный
120. Турпаев А.И. Самотормозящие механизмы. М.: Машиностроение, 1976. – 208 с.
121. Решетов Д.Н. Детали машин: Учебник для вузов. 4-е изд. – М.: Машиностроение, 1989. – 496 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Таблица А.1 – Результаты определения коэффициента трения резина – древесина

Материал контактного элемента			резина	
Образец древесины			сосна	
Влажность образца древесины, %			12	
Направление сдвига относительно волокон			вдоль волокон	
Площадь контактной поверхности, мм ²			490,9	
№ опыта	Усилие прижатия КЭ N , Н	Контактное давление q , МПа	Усилие сдвига P , Н	Коэффициент трения f
1	100	0,204	103	0,515
2	180	0,367	174	0,483
3	250	0,509	240	0,480
4	350	0,713	320	0,457
5	470	0,957	425	0,452
6	590	1,202	510	0,432
7	720	1,467	618	0,429
8	860	1,752	727	0,423
9	980	1,996	820	0,418
10	1150	2,343	940	0,409
11	1380	2,811	1100	0,399
12	1770	3,606	1400	0,395
13	2120	4,319	1620	0,382

Коэффициент трения f

Контактное давление q , МПа

$y = 0,0089x^2 - 0,0661x + 0,5104$
 $R^2 = 0,957$

Уравнение квадратичной регрессии	$f = 0,0089q^2 - 0,0661q + 0,5104$
Величина достоверности аппроксимации R^2	0,957

Таблица А.2 – Результаты определения коэффициента трения резина – древесина

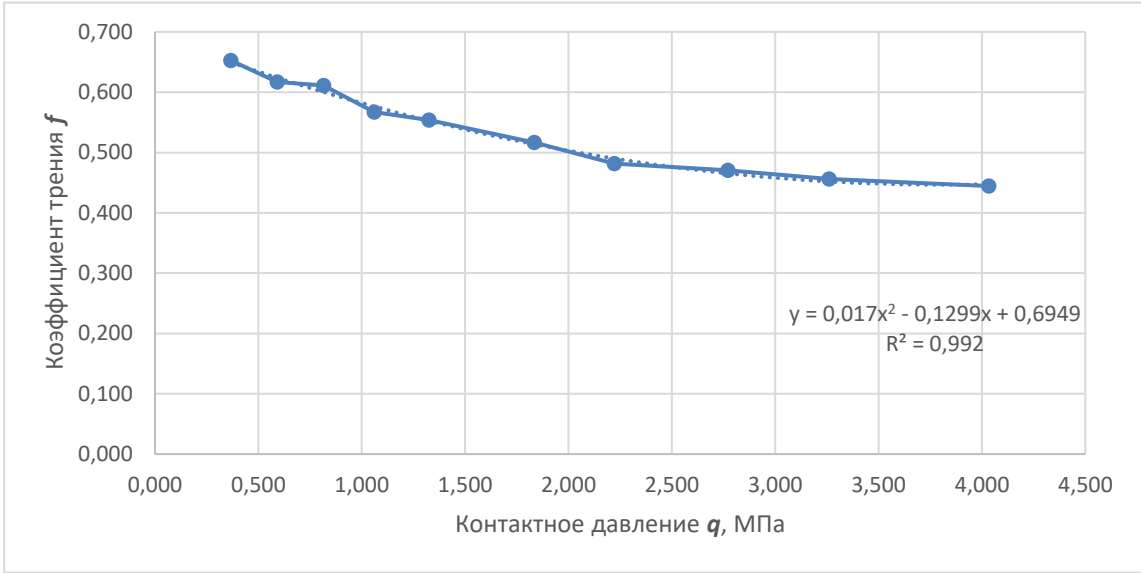
Материал контактного элемента		резина		
Образец древесины		сосна		
Влажность образца древесины, %		12		
Направление сдвига относительно волокон		поперек волокон		
Площадь контактной поверхности, мм ²		490,9		
№ опыта	Усилие прижатия КЭ N , Н	Контактное давление q , МПа	Усилие сдвига P , Н	Коэффициент трения f
1	180	0,367	235	0,653
2	290	0,591	358	0,617
3	400	0,815	489	0,611
4	520	1,059	590	0,567
5	650	1,324	720	0,554
6	900	1,833	930	0,517
7	1090	2,220	1050	0,482
8	1360	2,770	1280	0,471
9	1600	3,259	1460	0,456
10	1980	4,033	1760	0,444
				
Уравнение квадратичной регрессии			$f = 0,017q^2 - 0,1299q + 0,6949$	
Величина достоверности аппроксимации R^2			0,992	

Таблица А.3 – Результаты определения коэффициента трения резина – древесины

Материал контактного элемента		резина		
Образец древесины		лиственница		
Влажность образца древесины, %		12		
Направление сдвига относительно волокон		вдоль волокон		
Площадь контактной поверхности, мм ²		490,9		
№ опыта	Усилие прижатия КЭ N , Н	Контактное давление q , МПа	Усилие сдвига P , Н	Коэффициент трения f
1	190	0,387	300	0,789
2	350	0,713	493	0,704
3	580	1,182	778	0,671
4	860	1,752	930	0,541
5	1120	2,282	1130	0,504
6	1350	2,750	1270	0,470
7	1530	3,117	1400	0,458
8	1930	3,932	1770	0,459

График зависимости коэффициента трения f от контактного давления q . Показаны 8 точек данных, соединенные линией, и квадратичная регрессия. Уравнение: $y = 0,0344x^2 - 0,2419x + 0,8764$, $R^2 = 0,9859$.

Уравнение квадратичной регрессии	$f = 0,0344q^2 - 0,2419q + 0,8764$
Величина достоверности аппроксимации R^2	0,9859

Таблица А.4 – Результаты определения коэффициента трения резина – древесины

Материал контактного элемента		резина		
Образец древесины		лиственница		
Влажность образца древесины, %		16		
Направление сдвига относительно волокон		поперек волокон		
Площадь контактной поверхности, мм ²		490,9		
№ опыта	Усилие прижатия КЭ N , Н	Контактное давление q , МПа	Усилие сдвига P , Н	Коэффициент трения f
1	230	0,469	350	0,761
2	350	0,713	495	0,707
3	500	1,019	640	0,640
4	720	1,467	830	0,576
5	950	1,935	1010	0,532
6	1160	2,363	1150	0,496
7	1470	2,994	1420	0,483
8	1850	3,769	1640	0,443

Уравнение квадратичной регрессии: $y = 0,0321x^2 - 0,2257x + 0,849$
 $R^2 = 0,989$

Уравнение квадратичной регрессии	$f = 0,0321q^2 - 0,2257q + 0,849$
Величина достоверности аппроксимации R^2	0,989

Таблица А.5 – Результаты определения коэффициента трения резина – древесины

Материал контактного элемента		резина		
Образец древесины		ЛДСП		
Влажность образца древесины, %		-		
Направление сдвига относительно волокон		-		
Площадь контактной поверхности, мм ²		490,9		
№ опыта	Усилие прижатия КЭ <i>N</i> , Н	Контактное давление <i>q</i> , МПа	Усилие сдвига <i>P</i> , Н	Коэффициент трения <i>f</i>
1	150	0,306	151	0,503
2	300	0,611	280	0,467
3	470	0,957	390	0,415
4	660	1,344	500	0,379
5	790	1,609	600	0,380
6	980	1,996	690	0,352
7	1280	2,607	800	0,313
8	1740	3,545	930	0,267

Коэффициент трения *f*

Контактное давление *q*, МПа

$y = 0,0134x^2 - 0,1211x + 0,532$
 $R^2 = 0,9849$

Уравнение квадратичной регрессии	$f = 0,0134q^2 - 0,1211q + 0,532$
Величина достоверности аппроксимации R^2	0,9849

Таблица А.6 – Результаты определения коэффициента трения силикон – древесина

Материал контактного элемента		силиконовая резина		
Образец древесины		сосна		
Влажность образца древесины, %		12		
Направление сдвига относительно волокон		вдоль волокон		
Площадь контактной поверхности, мм ²		490,9		
№ опыта	Усилие прижатия КЭ N , Н	Контактное давление q , МПа	Усилие сдвига P , Н	Коэффициент трения f
1	160	0,326	165	0,516
2	200	0,407	200	0,500
3	240	0,489	223	0,465
4	400	0,815	350	0,438
5	650	1,324	494	0,380
6	800	1,630	540	0,338
7	1 170	2,383	690	0,295
8	1 300	2,648	690	0,265
9	1 600	3,259	835	0,261
10	1 750	3,565	890	0,254

График зависимости коэффициента трения f от контактного давления q . Показаны 10 точек данных и квадратичная линия регрессии. Уравнение: $y = 0,0251x^2 - 0,1752x + 0,5619$, $R^2 = 0,9933$.

Уравнение квадратичной регрессии	$f = 0,0251q^2 - 0,1752q + 0,5619$
Величина достоверности аппроксимации R^2	0,9933

Таблица А.7 – Результаты определения коэффициента трения силикон – древесина

Материал контактного элемента		силиконовая резина		
Образец древесины		сосна		
Влажность образца древесины, %		47		
Направление сдвига относительно волокон		вдоль волокон		
Площадь контактной поверхности, мм ²		490,9		
№ опыта	Усилие прижатия КЭ N , Н	Контактное давление q , МПа	Усилие сдвига P , Н	Коэффициент трения f
1	110	0,224	150	0,682
2	190	0,387	220	0,579
3	300	0,611	314	0,523
4	440	0,896	405	0,460
5	620	1,263	510	0,411
6	760	1,548	593	0,390
7	880	1,793	650	0,369
8	1040	2,119	730	0,351
9	1200	2,444	775	0,323
10	1380	2,811	820	0,297
11	1480	3,015	870	0,294
12	1610	3,280	880	0,273
13	1820	3,707	920	0,253
14	1900	3,870	960	0,253
15	2320	4,726	1060	0,228

Уравнение степенной регрессии: $y = 0,4294x^{-0,357}$
 $R^2 = 0,9762$

Уравнение степенной регрессии	$f = 0,4294q^{-0,357}$
Величина достоверности аппроксимации R^2	0,9762

Таблица А.8 – Результаты определения коэффициента трения силикон – древесина

Материал контактного элемента		силиконовая резина		
Образец древесины		сосна		
Влажность образца древесины, %		12		
Направление сдвига относительно волокон		вдоль волокон		
Площадь контактной поверхности, мм ²		1 963,5		
№ опыта	Усилие прижатия КЭ N , Н	Контактное давление q , МПа	Усилие сдвига P , Н	Коэффициент трения f
1	170	0,087	200	0,588
2	390	0,199	411	0,527
3	580	0,295	560	0,483
4	780	0,397	685	0,439
5	1010	0,514	870	0,431
6	1120	0,570	946	0,422
7	1270	0,647	1070	0,421
8	1490	0,759	1248	0,419
9	1860	0,947	1435	0,386
10	2100	1,069	1610	0,383

График зависимости коэффициента трения f от контактного давления q . Ось X: Контактное давление, МПа (0,000 до 1,200). Ось Y: Коэффициент трения (0,000 до 0,700). Точечные данные с соединяющей линией. Квадратичная регрессия: $y = 0,02583x^2 - 0,4826x + 0,6134$, $R^2 = 0,9565$.

Уравнение квадратичной регрессии	$f = 0,02583q^2 - 0,4826q + 0,6134$
Величина достоверности аппроксимации R^2	0,9565

Таблица А.9 – Результаты определения коэффициента трения силикон – древесина

Материал контактного элемента		силиконовая резина		
Образец древесины		сосна		
Влажность образца древесины, %		12		
Направление сдвига относительно волокон		поперек волокон		
Площадь контактной поверхности, мм ²		490,9		
№ опыта	Усилие прижатия КЭ N , Н	Контактное давление q , МПа	Усилие сдвига P , Н	Коэффициент трения f
1	150	0,306	213	0,710
2	300	0,611	336	0,560
3	420	0,856	416	0,495
4	520	1,059	475	0,457
5	700	1,426	576	0,411
6	930	1,894	683	0,367
7	1130	2,302	770	0,341
8	1430	2,913	894	0,313
9	1630	3,320	980	0,301
10	1800	3,667	1080	0,300

График зависимости коэффициента трения от контактного давления. Уравнение регрессии: $y = 0,0514x^2 - 0,3058x + 0,7493$. Коэффициент достоверности аппроксимации $R^2 = 0,963$.

Уравнение квадратичной регрессии	$f = 0,0514q^2 - 0,3058q + 0,7493$
Величина достоверности аппроксимации R^2	0,9630

Таблица А.10 – Результаты определения коэффициента трения силикон – древесина

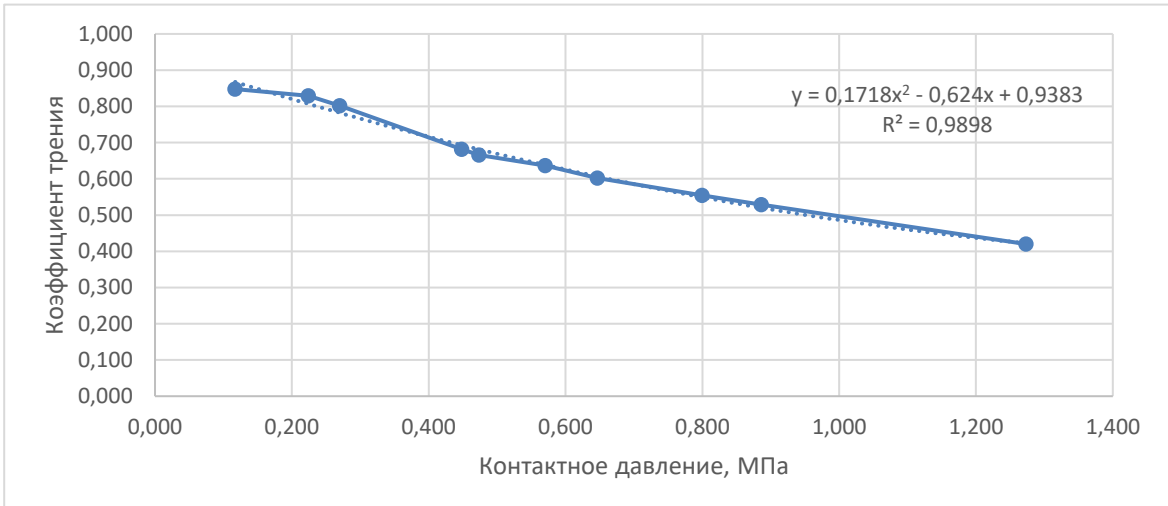
Материал контактного элемента		силиконовая резина		
Образец древесины		сосна		
Влажность образца древесины, %		12		
Направление сдвига относительно волокон		поперек волокон		
Площадь контактной поверхности, мм ²		1 963,5		
№ опыта	Усилие прижатия КЭ N , Н	Контактное давление q , МПа	Усилие сдвига P , Н	Коэффициент трения f
1	230	0,117	390	0,848
2	440	0,224	730	0,830
3	530	0,270	850	0,802
4	880	0,448	1200	0,682
5	930	0,474	1238	0,666
6	1120	0,570	1425	0,636
7	1270	0,647	1530	0,602
8	1570	0,800	1740	0,554
9	1740	0,886	1840	0,529
10	2500	1,273	2100	0,420
				
Уравнение квадратичной регрессии			$f = 0,1718q^2 - 0,624q + 0,9383$	
Величина достоверности аппроксимации R^2			0,9630	

Таблица А.11 – Результаты определения коэффициента трения силикон – древесина

Материал контактного элемента		силиконовая резина		
Образец древесины		лиственница		
Влажность образца древесины, %		16		
Направление сдвига относительно волокон		вдоль волокон		
Площадь контактной поверхности, мм ²		490,9		
№ опыта	Усилие прижатия КЭ N , Н	Контактное давление q , МПа	Усилие сдвига P , Н	Коэффициент трения f
1	210	0,428	340	0,810
2	330	0,672	420	0,636
3	470	0,957	525	0,559
4	660	1,344	645	0,489
5	860	1,752	750	0,436
6	1010	2,057	810	0,401
7	1150	2,343	840	0,365
8	1330	2,709	890	0,335
9	1550	3,157	960	0,310
10	1800	3,667	1030	0,286

Уравнение квадратичной регрессии: $y = 0,0532x^2 - 0,3539x + 0,8887$
Коэффициент достоверности аппроксимации $R^2 = 0,9653$

Уравнение квадратичной регрессии	$f = 0,0532q^2 - 0,3539q + 0,8887$
Величина достоверности аппроксимации R^2	0,9653

Таблица А.12 – Результаты определения коэффициента трения силикон – древесина

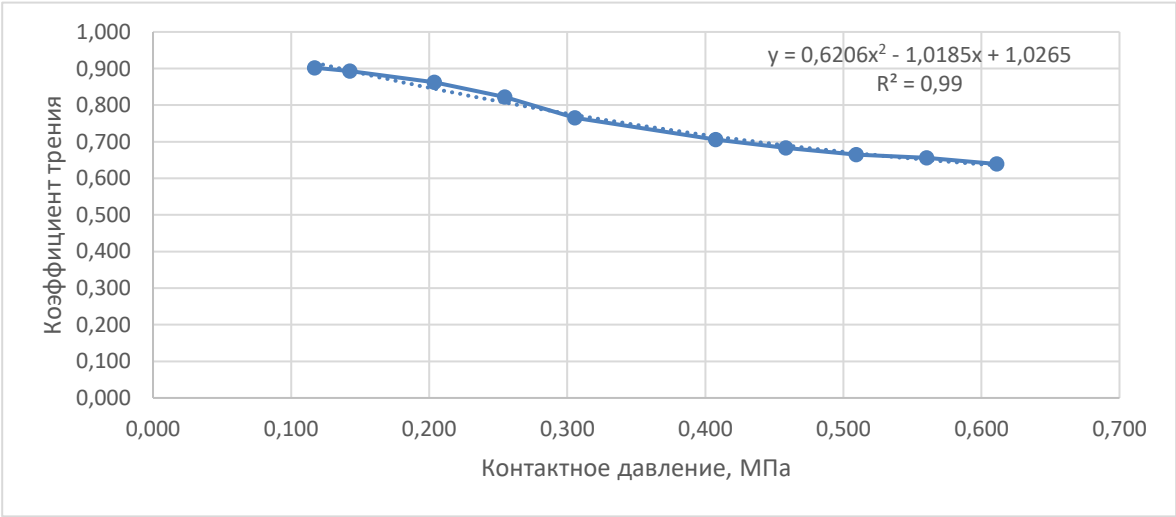
Материал контактного элемента		силиконовая резина		
Образец древесины		лиственница		
Влажность образца древесины, %		16		
Направление сдвига относительно волокон		вдоль волокон		
Площадь контактной поверхности, мм ²		1 963,5		
№ опыта	Усилие прижатия КЭ N , Н	Контактное давление q , МПа	Усилие сдвига P , Н	Коэффициент трения f
1	230	0,117	415	0,902
2	280	0,143	500	0,893
3	400	0,204	690	0,863
4	500	0,255	822	0,822
5	600	0,306	918	0,765
6	800	0,407	1130	0,706
7	900	0,458	1230	0,683
8	1000	0,509	1330	0,665
9	1100	0,560	1444	0,656
10	1200	0,611	1534	0,639
				
Уравнение квадратичной регрессии			$f = 0,6206q^2 - 1,0185q + 1,0265$	
Величина достоверности аппроксимации R^2			0,99	

Таблица А.13 – Результаты определения коэффициента трения силикон – древесина

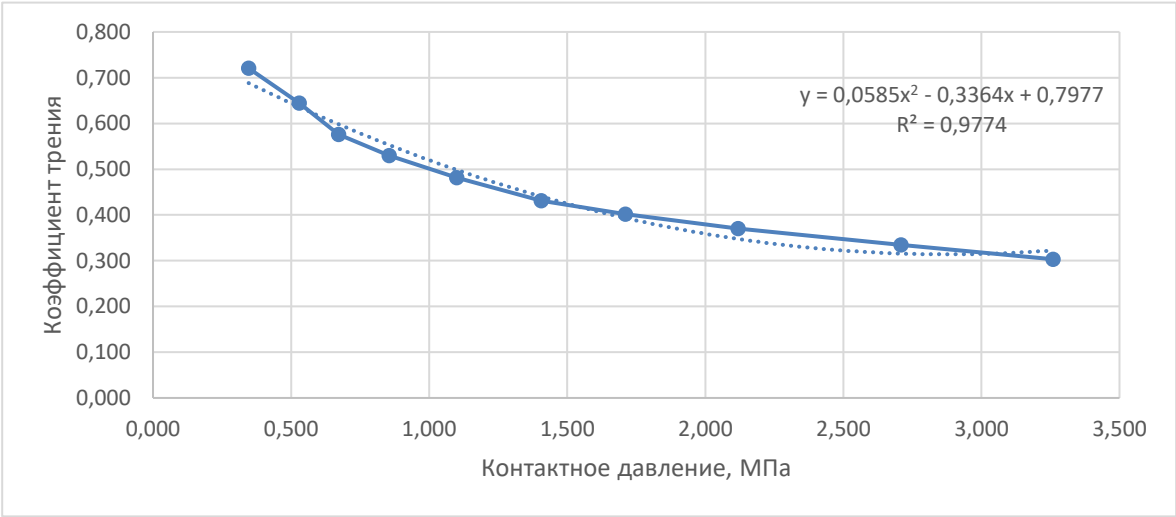
Материал контактного элемента		силиконовая резина		
Образец древесины		лиственница		
Влажность образца древесины, %		16		
Направление сдвига относительно волокон		поперек волокон		
Площадь контактной поверхности, мм ²		490,9		
№ опыта	Усилие прижатия КЭ N , Н	Контактное давление q , МПа	Усилие сдвига P , Н	Коэффициент трения f
1	170	0,346	245	0,721
2	260	0,530	335	0,644
3	330	0,672	380	0,576
4	420	0,856	445	0,530
5	540	1,100	520	0,481
6	690	1,406	595	0,431
7	840	1,711	675	0,402
8	1040	2,119	770	0,370
9	1330	2,709	890	0,335
10	1600	3,259	970	0,303
				
Уравнение квадратичной регрессии			$f = 0,0585q^2 - 0,3364q + 0,7977$	
Величина достоверности аппроксимации R^2			0,9774	

Таблица А.14 – Результаты определения коэффициента трения силикон – древесина

Материал контактного элемента		силиконовая резина		
Образец древесины		лиственница		
Влажность образца древесины, %		52		
Направление сдвига относительно волокон		поперек волокон		
Площадь контактной поверхности, мм ²		490,9		
№ опыта	Усилие прижатия КЭ N , Н	Контактное давление q , МПа	Усилие сдвига P , Н	Коэффициент трения f
1	150	0,306	200	0,667
2	260	0,530	310	0,596
3	400	0,815	390	0,488
4	560	1,141	495	0,442
5	670	1,365	545	0,407
6	810	1,650	605	0,373
7	940	1,915	650	0,346
8	1080	2,200	710	0,329
9	1180	2,404	762	0,323
10	1320	2,689	814	0,308
11	1590	3,239	990	0,311
12	1870	3,809	1300	0,348
13	2040	4,156	1380	0,338

График зависимости коэффициента трения f от контактного давления q . Показаны 13 точек данных, соединенных линией, и квадратичная регрессия $y = 0,0488x^2 - 0,2891x + 0,7233$ с $R^2 = 0,9755$.

Уравнение квадратичной регрессии	$f = 0,0488q^2 - 0,2891q + 0,7233$
Величина достоверности аппроксимации R^2	0,9755

Таблица А.15 – Результаты определения коэффициента трения силикон – древесина

Материал контактного элемента		силиконовая резина		
Образец древесины		лиственница		
Влажность образца древесины, %		16		
Направление сдвига относительно волокон		поперек волокон		
Площадь контактной поверхности, мм ²		1 963,5		
№ опыта	Усилие прижатия КЭ <i>N</i> , Н	Контактное давление <i>q</i> , МПа	Усилие сдвига <i>P</i> , Н	Коэффициент трения <i>f</i>
1	80	0,041	150	0,938
2	195	0,099	365	0,936
3	300	0,153	550	0,917
4	360	0,183	660	0,917
5	560	0,285	900	0,804
6	850	0,433	1200	0,706
7	1050	0,535	1390	0,662
8	1200	0,611	1560	0,650
9	1350	0,688	1700	0,630
10	1440	0,733	1800	0,625

Уравнение квадратичной регрессии: $y = 0,3589x^2 - 0,8033x + 1,0084$
 $R^2 = 0,9706$

Уравнение квадратичной регрессии	$f = 0,3589q^2 - 0,8033q + 1,0084$
Величина достоверности аппроксимации R^2	0,9706

Таблица А.16 – Результаты определения коэффициента трения силикон – древесина

Материал контактного элемента		силиконовая резина		
Образец древесины		ЛДСП		
Влажность образца древесины, %		-		
Направление сдвига относительно волокон		-		
Площадь контактной поверхности, мм ²		490,9		
№ опыта	Усилие прижатия КЭ N , Н	Контактное давление q , МПа	Усилие сдвига P , Н	Коэффициент трения f
1	110	0,224	180	0,818
2	180	0,367	208	0,578
3	260	0,530	220	0,423
4	340	0,693	240	0,353
5	460	0,937	255	0,277
6	580	1,182	270	0,233
7	700	1,426	300	0,214
8	850	1,732	315	0,185
9	1160	2,363	350	0,151
10	1450	2,954	390	0,134
11	1800	3,667	430	0,119
12	2300	4,685	490	0,107
13	2750	5,602	535	0,097

Коэффициент трения f

Контактное давление q , МПа

$y = 0,2802x^{-0,665}$
 $R^2 = 0,9934$

Уравнение степенной регрессии	$f = 0,2802q^{-0,665}$
Величина достоверности аппроксимации R^2	0,9934

Таблица А.17 – Результаты определения коэффициента трения силикон – древесина

Материал контактного элемента		силиконовая резина		
Образец древесины		ЛДСП		
Влажность образца древесины, %		-		
Направление сдвига относительно волокон		-		
Площадь контактной поверхности, мм ²		1 963,5		
№ опыта	Усилие прижатия КЭ <i>N</i> , Н	Контактное давление <i>q</i> , МПа	Усилие сдвига <i>P</i> , Н	Коэффициент трения <i>f</i>
1	170	0,087	235	0,691
2	430	0,219	460	0,535
3	670	0,341	580	0,433
4	850	0,433	640	0,376
5	1090	0,555	680	0,312
6	1300	0,662	710	0,273
7	1440	0,733	760	0,264
8	1680	0,856	800	0,238
9	1920	0,978	810	0,211
10	2300	1,171	830	0,180
11	2700	1,375	890	0,165

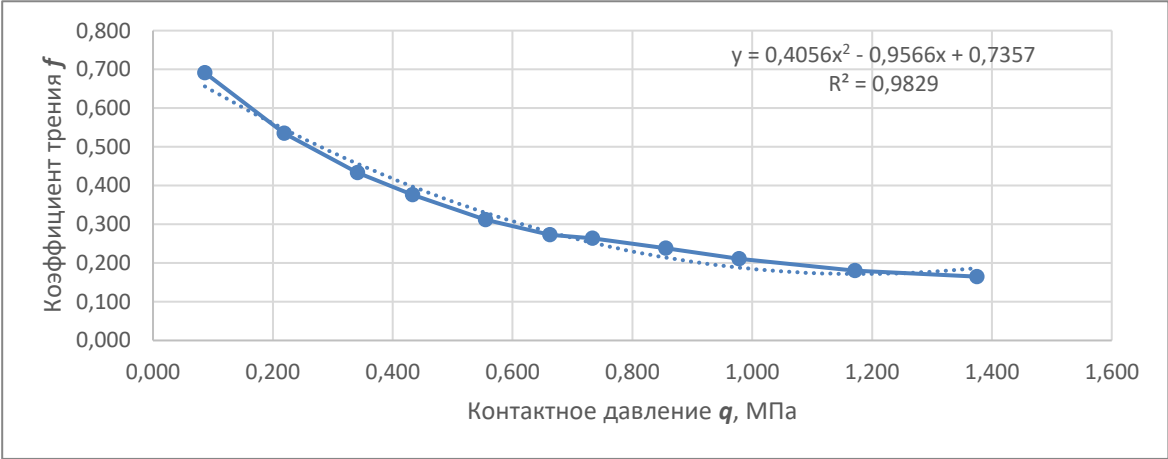


График зависимости коэффициента трения f от контактного давления q . Показаны экспериментальные данные (синие точки) и полиномиальная аппроксимация (сплошная синяя линия). Дotted line shows the trend. The equation $y = 0,4056x^2 - 0,9566x + 0,7357$ and $R^2 = 0,9829$ are displayed on the graph.

Уравнение степенной регрессии	$f = 0,4056q^2 - 0,9566q + 0,7357$
Величина достоверности аппроксимации R^2	0,9829

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Утверждаю
 Исполняющий обязанности директора
 филиала САФУ в г. Северодвинске
 Никулина Н. В.



«04» марта 2025 г.

АКТ

о внедрении в учебный процесс филиала Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова в г. Северодвинске результатов диссертационной работы Дужевского Игоря Александровича на тему: «Совершенствование конструкции грузозахватных устройств для перемещения изделий из древесины»

Мы, нижеподписавшиеся, представители кафедры кораблестроения института судостроения и морской арктической техники филиала САФУ в г. Северодвинске к.т.н., доцент, заведующая кафедрой Лебедева Е.Г., к.т.н., доцент, Протасова С.В. составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Дужевского И.А. внедрены в курс «Грузоподъемные машины и оборудование» по специальности 26.05.01 Проектирование и постройка кораблей, судов и объектов океанотехники, специализация «Подъемно-транспортные средства технологического оснащения судостроительного производства» при изучении раздела «Грузозахватные приспособления (захваты для штучных грузов)».

Директор института
 судостроения и морской
 арктической техники


 подпись Ивлев М.Л.

Заведующая кафедрой
 кораблестроения


 подпись Лебедева Е.Г.

Доцент кафедры
 кораблестроения


 подпись Протасова С.В.



АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
ЦЕНТР СУДОРЕМОНТА
ЗВЕЗДОЧКА



1971



2004



2018

СПРАВКА

об использовании результатов исследований,
полученных при выполнении диссертационной работы
«Совершенствование конструкции грузозахватных устройств для перемещения
изделий из древесины»
ДУЖЕВСКОГО ИГОРЯ АЛЕКСАНДРОВИЧА

Реализация научно-обоснованных рекомендаций Дужевского И.А. направлена на совершенствование конструкции фрикционных грузозахватных устройств с саможамными контактными элементами для перемещения клееных деревянных конструкций и изделий из древесины с учётом анизотропных и реологических свойств древесины и сохранением качества контактной поверхности.

Настоящая справка подтверждает, что в АО «ЦС «Звездочка» с целью оптимизации технологического процесса при изготовлении судовой мебели на специализированном производстве для практического применения приняты результаты исследований и рекомендации из работы Дужевского Игоря Александровича по совершенствованию конструкции грузозахватных устройств для перемещения изделий из древесины.

Начальник производства №3

В.М. Воробьёв

