

На правах рукописи



ПРОХОРОВ

Владимир Вячеславович

**ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА СКЛЕИВАНИЯ ДРЕВЕСИНЫ
БЕСКОНТАКТНЫМ ИНДУКЦИОННЫМ НАГРЕВОМ
КЛЕЕВОЙ КОМПОЗИЦИИ**

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

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Екатеринбург 2025

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

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

Официальные оппоненты: **Варанкина Галина Степановна**
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова», кафедра технологии материалов, конструкций и сооружений из древесины, профессор

Газеев Максим Владимирович
доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», кафедра механической обработки древесины, заведующий кафедрой

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

Защита диссертации состоится **03 июля 2025 г. в 10⁰⁰** часов на заседании диссертационного совета 24.2.424.01, созданного на базе ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет» по адресу: 620100, г. Екатеринбург, ул. Сибирский тракт, д.37, зал заседаний Ученого совета – аудитория 401.

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

Автореферат разослан «___» _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.424.01,
доктор технических наук, профессор



Шишкина
Елена Евгеньевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Клееная древесина широко применяется в различных отраслях промышленности, в производстве строительных деревянных конструкций (КДК), фанеры, мебели и пр. Поэтому исследование и разработка эффективных технологических решений склеивания древесины является приоритетной задачей.

Известны два основных направления склеивания древесины – холодным и горячим способом с нагревом клеевой композиции через массив древесины.

Основой соединения из древесины является клеевая композиция на основе полимерных смол. Для интенсификации полимеризации клеевого шва клеевую композицию нагревают. В используемых для склеивания древесины способах тепловое воздействие на клеевую композицию осуществляют кондуктивным, конвективным нагревом, инфракрасным излучением, токами промышленной и сверхвысокой частоты (СВЧ). Передача теплоты осуществляется непосредственно через материал – древесину от паровых, водяных и электрических энергоисточников в клеевой шов. По этой технологии прогрев композиции происходит неравномерно, клеевой шов формируется неоднородно, сопровождается энергопотерями в окружающую среду и массив древесины, что снижает качество склеивания и производительность процесса.

В работе рассмотрено инновационное решение совершенствования процесса склеивания древесины бесконтактным индукционным нагревом непосредственно клеевого шва при условии придания клеевой композиции свойств магнитного материала. Для этого в композицию вводят ферромагнитный наполнитель, который в создаваемом индукционном поле равномерно нагревается совместно с массой композиции, ускоряет полимеризацию клеевого шва в соединении древесины.

Решение задачи локального индукционного нагрева клеевого соединения без промежуточного прогрева массива древесины позволяет интенсифицировать процесс склеивания, повысить энергоэффективность операции склеивания древесины, представляет научно-практический интерес и является актуальной.

Степень разработанности темы исследования.

Исследованием процессов склеивания древесины занимались российские ученые: В.И. Азаров, И.П. Бердинских, В.Г. Бирюков, Г.С. Варанкина, И.Т. Глебов, Д.А. Кардашов, В.П. Кондратьев, В.А. Куликов, А.Н. Чубинский, Б.В. Лабудин, В.И. Мелехов, Н.И. Москвитин, И.И. Соловьев, А.А. Тамби, Р.З. Темкина, С.А. Угрюмов, А.А. Федяев. Известны работы зарубежных ученых: Р. Хоувик (США), Г. Саломон (США), Х. Сердио (США), Се Чунг Ян (Япония) и др. Вопросы применения непосредственно контактного нагрева клеевой композиции через карбоновый резистор впервые рассмотрены в работах Санкт-Петербургской государственной лесотехнической академии (В.А. Куликов, Г.С. Варанкина, А.Н. Чубинский и др.).

Объект исследования – клеевая композиция с ферромагнитным наполнителем нагреваемая в электромагнитном поле индуктора.

Предмет исследования – режимы бесконтактного индукционного нагрева ферромагнитной клеевой композиции.

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

Цель работы – совершенствование технологии склеивания древесины бесконтактным индукционным нагревом клеевой композиции с ферромагнитным наполнителем.

Задачи исследования:

1. Выполнить аналитический обзор способов склеивания древесины.
2. Обосновать возможность применения индукционного нагрева клеевой композиции с ферромагнитным наполнителем для интенсификации процесса склеивания древесины.
3. Разработать математическую модель процесса индукционного нагрева ферромагнитной клеевой композиции.
4. Обосновать выбор ферромагнитного наполнителя; установить взаимосвязь интенсивности нагрева ферромагнитного наполнителя и скорости полимеризации клеевого соединения.
5. Разработать методику экспериментальных исследований процесса склеивания древесины индукционным нагревом ферромагнитной клеевой композиции.
6. Создать экспериментальную установку; определить тепловые характеристики нагрева ферромагнитных компонентов клеевой композиции.
7. Предложить новые технические решения по совершенствованию технологии склеивания древесины с применением индукционного нагрева.

Научная новизна результатов исследований:

1. Доказана возможность интенсификации процесса склеивания древесины бесконтактным электромагнитным индукционным нагревом ферромагнитной клеевой композиции.
2. Разработана и экспериментально подтверждена математическая модель процесса бесконтактного индукционного нагрева ферромагнитного наполнителя в клеевой композиции при склеивании древесины.
3. Определены граничные условия размерных характеристик ферромагнитных наполнителей клеевой композиции.

На защиту выносятся:

1. Научно обоснованные результаты исследований термодинамического равновесия ферромагнитных наполнителей клеевой композиции при индукционном нагреве.
2. Результаты экспериментальных исследований процесса склеивания древесины в электромагнитном поле индуктора с учетом количественных и качественных характеристик ферромагнитных наполнителей клеевой композиции.
3. Математическая модель процесса бесконтактного индукционного нагрева ферромагнитного наполнителя в клеевой композиции.

Теоретическая и практическая значимость:

1. Экспериментально подтверждена возможность интенсификации процесса склеивания древесины путем применения ферромагнитных наполнителей в клеевой композиции нагреваемых бесконтактно электромагнитным полем индуктора.
2. Определены термодинамические характеристики доступных для практического применения ферромагнитных наполнителей клеевой композиции при индукционном нагреве.
3. Разработана энергоэффективная технология склеивания древесины с применением ферромагнитной клеевой композиции и индукционным нагревом клеевого шва; предложены оригинальные конструкции прессового оборудования для

производства фанеры с индукционным бесконтактным нагревом ферромагнитной клеевой композиции.

Методология и методы исследования.

При проведении исследований применены методы математического моделирования, натурного эксперимента, планирования экспериментальных исследований, теории вероятностей и математической статистики, с использованием вычислительных программных комплексов и современного инструментального сопровождения.

Достоверность результатов исследований основывается на достаточном объеме теоретических и экспериментальных исследований с применением методов математического моделирования, достоверной сходимостью результатов теоретических и экспериментальных исследований.

Личный вклад автора заключается в проведении аналитического обзора состояния вопроса по теме исследований, постановке цели и задач исследования, разработке математической модели процесса индукционного нагрева ферромагнитного наполнителя в клеевой композиции, методики проведения исследований, создании экспериментальной установки, получении, обработке и анализе результатов исследований индукционного нагрева ферромагнитных наполнителей клеевой композиции, формулировании выводов и рекомендаций, написании статей по теме исследований, патентовании технических решений.

Реализация результатов работы.

Результаты и рекомендации исследований приняты в АО «Архангельский фанерный завод» для совершенствования технологического процесса производства фанеры, применены в учебном процессе САФУ имени М.В. Ломоносова.

Апробация работы.

Основные результаты исследований представлены на научно-практических конференциях в рамках XLV, XLVI, XLVII Ломоносовских чтений в г. Северодвинске в 2016, 2017, 2018 г.; на Всероссийских научно-практических конференциях «Актуальные вопросы инновационного развития Арктического региона РФ» (г. Северодвинск, 2019, 2020, 2021, 2022, 2024), на Международной научно-практической конференции «Наука, образование, общество» (г. Тамбов, 2019), на VII Международной научно-технической конференции, посвященной памяти профессора В.И. Комарова (г. Архангельск, 2023).

Публикации.

По результатам исследований опубликовано 15 работ, в том числе 3 в изданиях по перечню ВАК, получены 4 патента на изобретение.

Структура и объем диссертации.

Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка научно-технических источников из 122 наименований. Работа представлена на 159 страницах, содержит 90 рисунков, 67 таблиц, 1 приложение.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении отражена актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследований, приведены основные положения диссертации, вынесенные на защиту, обоснована научная новизна.

В первой главе выполнен системный анализ состояния вопроса исследования, проведена первичная структуризация объекта исследования. Проведен аналитический

обзор технологических процессов склеивания древесины и древесно-композитных материалов. Исследованием процессов склеивания древесины занимались российские ученые: В.И. Азаров, И.П. Бердинских, В.Г. Бирюков, Г.С. Варанкина, И.Т. Глебов, Д.А. Кардашов, В.П. Кондратьев, В.А. Куликов, А.Н. Чубинский, Б.В. Лабудин, В.И. Мелехов, Н.И. Москвитин, И.И. Соловьев, А.А. Тамби, Р.З. Темкина, С.А. Угрюмов, А.А. Федяев. Известны работы зарубежных ученых: Р. Хоувик (США), Г. Саломон (США), Х. Сердио (США), Се Чунг Ян (Япония) и др. Вопросы применения непосредственно контактного нагрева клеевой композиции через карбоновый резистор впервые рассмотрены в работах Санкт-Петербургской государственной лесотехнической академии (В.А. Куликов, Г.С. Варанкина, А.Н. Чубинский и др.).

Проведен анализ применяемых режимов склеивания древесины. Отмечено, что применение горячего способа склеивания древесины, позволяет интенсифицировать процесс полимеризации клеевого шва. Применение горячего способа склеивания целесообразно в производстве сравнительно тонких материалов, для которых возможен быстрый равномерный прогрев по всему объему – фанеры, древесных плит. Рассмотрены клеевые композиции применяемые для склеивания древесины горячим способом с использованием термореактивных клеев. Определяющим является правильный и обоснованный выбор клеевого состава, который удовлетворяет большинству предъявляемых требований при изготовлении изделий из древесины. Основным критерием при этом следует считать взаимодействие клеящего полимера и соединяемых материалов. Целесообразно при склеивании древесины использование преимущественно термореактивных клеев. Рассмотрены варианты модификаторов и наполнителей клеевых композиций. Отверждение карбамидоформальдегидных клеев сопровождается усадкой, термическим напряжением и растрескиванием клеевого шва. При использовании карбамидоформальдегидных смол эти недостатки устраняют введением наполнителей и пластификаторов. Выполнен анализ применяемых способов нагрева клеевой композиции при склеивании древесины. Отмечено что известные способы нагрева массива древесины подразделяются по месту подвода тепла к склеиваемым деталям на два класса: с внешним нагревом и местным предварительным нагревом древесины. При внешнем нагреве тепло подводится к клеевому слою извне через массив древесины. Из-за инерции теплового потока прогрев клеевого шва проходит неравномерно с запаздыванием. Перенос энергии от внешней горячей поверхности к склеиваемой конструкции осуществляется теплопроводностью. Обращено внимание на инновационное решение бесконтактного нагрева клеевого шва в электромагнитном поле, создаваемом индуктором, при условии придания клеевой композиции магнитных свойств. Для этого в композицию вводят технологичные фрагментированные ферромагнитные элементы (наполнитель), которые в создаваемом индукционном поле нагреваются совместно с массой композиции и ускоряют ее полимеризацию. В качестве наполнителей клеевой композиции для объемного равномерного нагрева клеевого шва индукционным способом могут быть эффективно применены измельченные ферромагнитные мелкодисперсные материалы. Индукционный нагрев клеевой композиции с введенным ферромагнитным наполнителем позволяет интенсифицировать процесс формирования клеевого шва. Особенностью нагрева является избирательный прогрев только объема клеевого шва без нагрева древесины. Индукционный нагрев позволяет интенсифицировать процесс склеивания древесины при меньшем энергопотреблении, высоком качестве клеевого соединения, без промежуточных потерь теплоты в

древесине. Индукционный нагрев материалов используется в металлообработке и достаточно хорошо изучен, однако в технологии склеивания древесины не применялся. Обозначены цель и задачи исследования. Совершенствование процесса склеивания древесины бесконтактным индукционным нагревом клеевой композиции с ферромагнитным наполнителем актуально, представляет научно-практический интерес и является предметом наших исследований.

Во второй главе рассмотрена математическая модель процесса бесконтактного индукционного нагрева ферромагнитного наполнителя в клеевой композиции для склеивания древесины.

При расчете нагрева ферромагнитных материалов учтены факторы, влияющие на интенсивность процесса полимеризации клеевого соединения. При индукционном воздействии, ферромагнитный наполнитель равномерно избирательно нагревает массу клеевой композиции и ускоряет процесс полимеризации клеевого шва.

В результате проведенных разведывательных опытов на пяти ферромагнитных наполнителях, вводимых в различные клеевые композиции, выполнен регрессионный анализ. Принята двухфакторная математическая модель:

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 \quad (1)$$

где y – зависимая переменная (время нагрева);

x_1, x_2 – независимые переменные (температура, дисперсность);

a_0, a_1, a_2 – коэффициенты модели, которые необходимо найти, чтобы модель точно описывала данные.

С учетом особенностей каждого вида наполнителя построена частная математическая модель, которая показывает, как изменяется время нагрева при изменении температуры и дисперсности наполнителя.

Выполнена оценка общей тенденции для всех видов наполнителей. Построена уточненная математическая модель, в которую введен третий фактор (вид наполнителя) через фиктивные переменные.

Для 5 наполнителей используют $5-1 = 4$ фиктивные переменные.

Вид наполнителя:	D1	D2	D3	D4
Опилки стали Fe 95% (базовый)	0	0	0	0
Измельченные окатыши обожженные Fe_2O_3	1	0	0	0
Измельченные окатыши не обожженные Fe_2O_3	0	1	0	0
Порошок ферромагнитный Fe 90%	0	0	1	0
Ферромагнитная сечка из стальной проволоки	0	0	0	1

После преобразований, математическая модель имеет вид:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{31} * D_1 + b_{32} * D_2 + b_{33} * D_3 + b_{34} * D_4 \quad (2)$$

где b_0 – среднее время нагрева для базового наполнителя.

Коэффициенты $b_{31}... b_{34}$ показывают, насколько отличается время нагрева других наполнителей от базового.

Вектор параметров модели, согласно методу наименьших квадратов, имеет вид:

$$a = (F^T F)^{-1} F^T y. \quad (3)$$

Проверку статистической значимости коэффициентов выполняли по критерию Стьюдента. Дисперсия отклика определяется выражением:

$$S_y^2 = \frac{1}{n-m} \sum_{i=1}^n (y_i - f_a(x_i))^2. \quad (4)$$

Значимость коэффициентов оценивается по формуле:

$$T_i = \frac{a_i}{\sqrt{S_y^2 \cdot c_{ii}}}. \quad (5)$$

где c_{ii} это i -й диагональный элемент дисперсионной матрицы Фишера $(F^T F)^{-1}$

Проверка адекватности модели проведена по критерию Фишера:

$$F = \frac{Q_n}{n-m} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n (r_i - 1)}{q_p} < F_{кр}. \quad (6)$$

Для определения интенсивности нагрева проведен анализ полученной модели с помощью частных производных по каждому фактору с последующим решением системы уравнений:

$$\frac{df}{dx_1} = a_1 = 0, \quad \frac{df}{dx_2} = a_2 = 0. \quad (7)$$

По оптимальным значениям факторов рассчитывается минимальное значение функции времени нагрева $f_{\min}$.

Математическая модель температурных процессов нагреваемого клеевого шва с ферромагнитным наполнителем построена на примере цельнотельного материала, помещенного внутри индуктора цилиндрической формы (рис. 1).

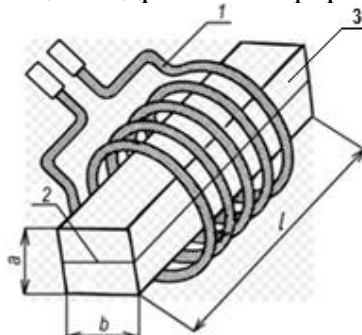


Рис. 1 Пространственная модель нагрева клеевого шва с ферромагнитным наполнителем цилиндрическим индуктором:
1 – индуктор; 2 – клеевой шов; 3 – древесина
l – длина; b – ширина; a – высота

Индуктор оказывает электромагнитное воздействие на ферромагнитный клеевой шов и вызывает возникновение в нем вихревых токов, протекающих по сечению шва. Количество выделенной тепловой энергии dQ_n за время dt определяется в соответствии с законом Джоуля-Ленца.

$$dQ_n = RI^2 dt, \quad (8)$$

где R – сопротивление клеевого шва, с которым взаимодействует переменный по величине электрический ток I .

Сопротивление ферромагнитного наполнителя определяется геометрическими размерами и физическими свойствами материала:

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (9)$$

где ρ – удельное сопротивление материала изделия;

l – длина клеевого шва;

S – площадь поперечного сечения клеевого шва.

Приближенные линейные зависимости удельного электрического сопротивления от температуры основаны на введении понятия «температурный коэффициент сопротивления».

Для проверки на адекватность математической модели проведены экспериментальные исследования.

В третьей главе приведены методики проведения экспериментальных исследований процесса бесконтактного индукционного нагрева ферромагнитной клеевой композиции для склеивания древесины, характеристики экспериментальной установки (рис. 2).

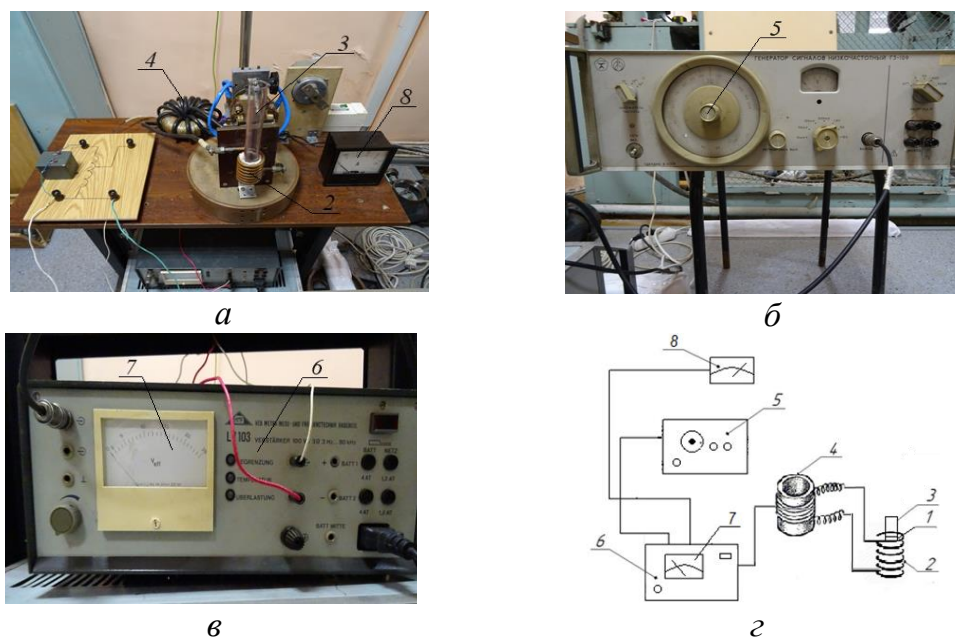


Рис. 2 Общий вид экспериментальной установки

1 – навеска ферромагнитного наполнителя, 2 – индуктор,
3 – контейнер с ферромагнитным наполнителем, 4 – нагрузочный
трансформатор, 5 – генератор, 6 – высокочастотный усилитель,
7 – вольтметр

При проведении опытов навеску ферромагнитного наполнителя 1 массой 20 гр. помещали в индуктор 2, производится нагрев в электромагнитном поле индуктора и определяется температура нагрева (рис. 4, з). Опыты по склеиванию проводили на образцах шпона из древесины березы по ГОСТ 33120-2014, которые помещали в индуктор и фиксировали клиновым замком.

В генераторе 5 устанавливают значение частоты тока. Высокочастотный усилитель 6 обеспечивает требуемую мощность нагрева ферромагнитного наполнителя. Частота тока 3-10 кГц, подбирается емкостью конденсаторов. Установлена резонансная частота индукционного тока 7 кГц для обеспечения требуемой мощности нагрева ферромагнитного наполнителя.

Исследовали нагрев ферромагнитных наполнителей: порошка ферромагнитного Fe 90%; ферромагнитных опилок из стали Fe 95%; измельченных окатышей обожженных Fe_2O_3 , не обожженных Fe_2O_3 , применяемых в металлургической промышленности; ферромагнитной сечки из стальной проволоки. Окатыши – гранулированный рудный концентрат, продукт обогащения железной руды и последующего окомковывания и обжига (рис. 3).

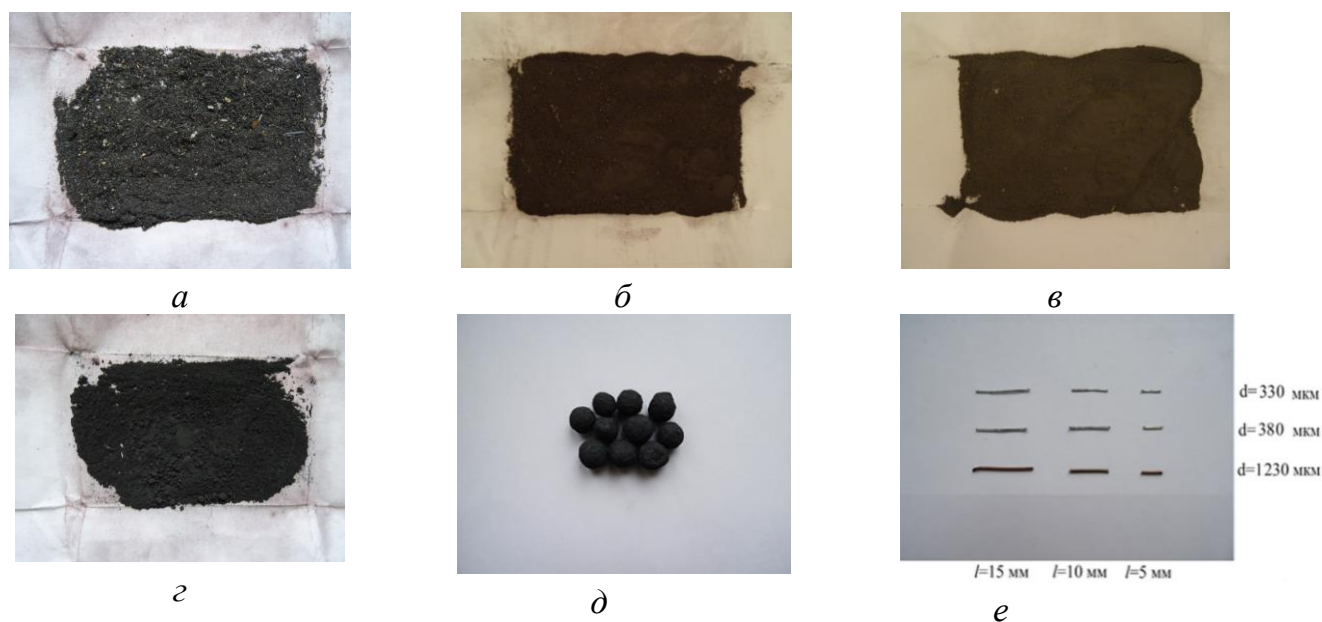


Рис. 3 Ферромагнитные наполнители клеевой композиции
a – ферромагнитные опилки из стали Fe 95%; *б* – измельченные окатыши обожженные Fe_2O_3 ; *в* – измельченные окатыши не обожженные Fe_2O_3 ;
г – порошок ферромагнитный Fe 90%; *д* – рудные окатыши;
е – ферромагнитная сечка из стальной проволоки: *l* – длина, *d* – диаметр

Методические сетки опытов индукционного нагрева ферромагнитных наполнителей и клеевой композиции приведены в таб. 1, 2.

Таблица 1

Индукционный нагрев ферромагнитных наполнителей

№	Наименование фактора	Обозначение	Единицы измерения	Значения факторов
1	Вид ферромагнитного наполнителя	1,2,3,4,5	–	Ферромагнитные опилки из стали Fe 95%, ферромагнитные наполнители из окатышей обожженных, не обожженных, порошок ферромагнитный Fe 90%, ферромагнитная сечка из стальной проволоки
2	Размерный состав фракций	d	мкм	250-1230
3	Содержание Fe	c	%	65-95
Оценочные показатели				
1	Температура термодинамического равновесия	t	$^{\circ}\text{C}$	25-70
2	Продолжительность нагрева	τ	сек	5-60

Постоянными факторами приняты:

порода древесины

- береза;

толщина шпона

- 1,5 мм;

марка смолы

- КФ-МТ-15, ЭДП;

шероховатость поверхности шпона, R_m , не более

- 120 мкм;

расход клея на основе смолы КФ-МТ-15

- 125 г/м²;

Переменные факторы: количество вводимого ферромагнитного наполнителя C_f , %; дисперсность частиц наполнителя S , мм; содержание Fe в наполнителе c , %; давление запрессовки при склеивании p , МПа; время выдержки под давлением τ , сек.

Таблица 2

Определение прочности клеевого соединения древесины

№	Наименование фактора	Обозначение	Единицы измерения	Значения факторов
1	Вид ферромагнитного наполнителя	1,2,3,4,5	—	Ферромагнитные опилки из стали (Fe 95%), измельченные окатыши обожженные, измельченные окатыши не обожженные, порошок ферромагнитный (Fe 90%), ферромагнитная сечка (Fe 95%)
2	Масса ферромагнитного наполнителя	C_f	гр	5-25
3	Размер фракций наполнителя	S	мкм	250-1050
4	Содержание Fe в наполнителе	c	%	75-95
5	Порода древесины	B	—	береза
6	Влажность древесины	W	%	10
7	Давление запрессовки	p	МПа	0,5-1,2
8	Время выдержки под давлением	τ	мин.	7-11
9	Шероховатость контактной поверхности древесины	R_m обр.	мкм	120
Оценочные показатели				
1	Температура нагрева клеевой композиции	T	°C	25-70
2	Время отверждения клеевой композиции	t	мин	40
3	Определение усилия сдвига в клеевом соединении	F	Н	400-1300

Определяли влияние вида ферромагнитного наполнителя на время полимеризации клеевой композиции. Применяли клеевую композицию на основе карбамидной и эпоксидной смолы. Вводили в композицию ферромагнитный наполнитель, с размером фракции 250-1230 мкм. Все результаты измерений заносили в таблицу формата Excel.

Склеенные образцы шпона с различными видами ферромагнитных наполнителей на основе карбамидной смолы КФ-МТ-15 и эпоксидной смолы ЭДП представлены на рис.4.

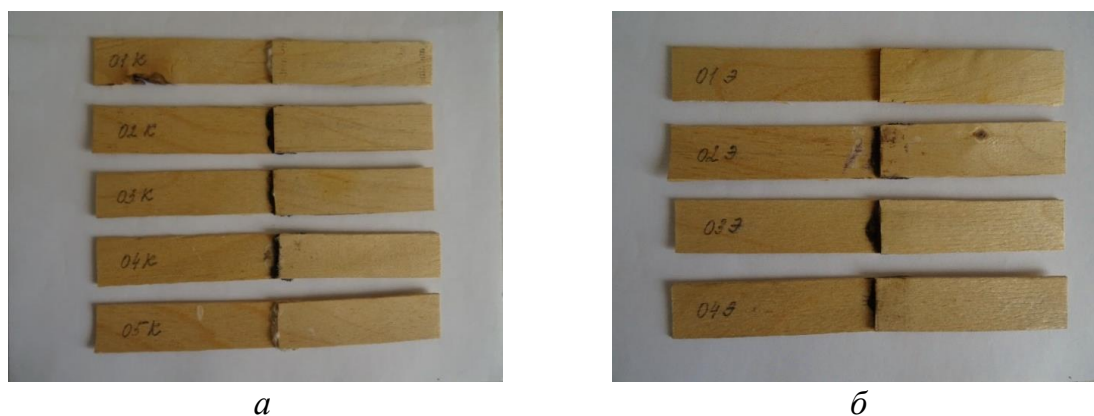


Рис. 4 Образцы склеенного шпона

а – на основе карбамидного клея; б – на основе эпоксидного клея

Испытания на прочность клеевого соединения образцов шпона выполнены по ГОСТ 21554.5.

У контрольных и экспериментальных образцов шпона склеенных карбамидной, эпоксидной и ферромагнитной клеевой композицией, разрушение соединения происходит по древесине, т.е. сохраняется прочность соединения 100 % (рис. 5, а, б).

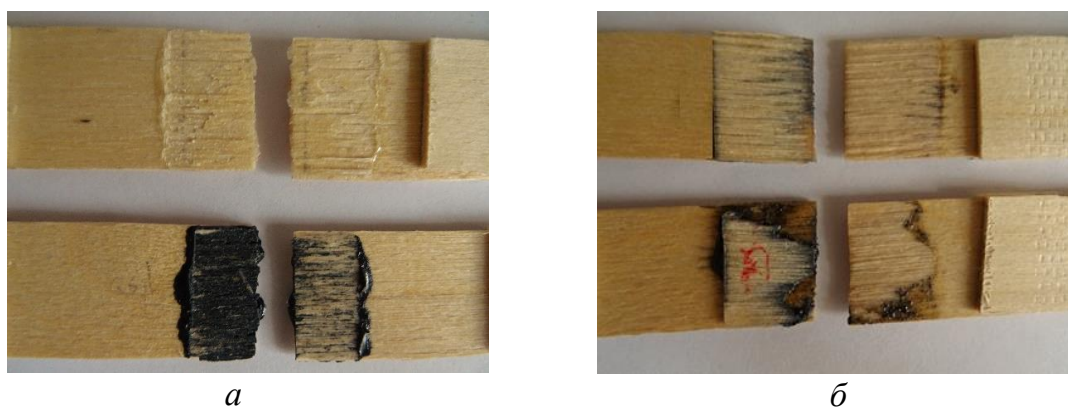


Рис. 5 Характер разрушения клеевого соединения при сдвиге по древесине

а – на основе карбамидной клеевой композиции; б – на основе эпоксидной клеевой композиции

В четвертой главе приведен анализ результатов экспериментальных исследований. Отмечено, что, нагрев ферромагнитных опилок из стали Fe 95% (фракционный состав №1), измельченных окатышей не обожженных Fe_2O_3 (№3) и ферромагнитной сечки из стальной проволоки (№5) происходит с наибольшей

интенсивностью. Динамика термодинамического равновесия ферромагнитных наполнителей приведена на рис. 6.

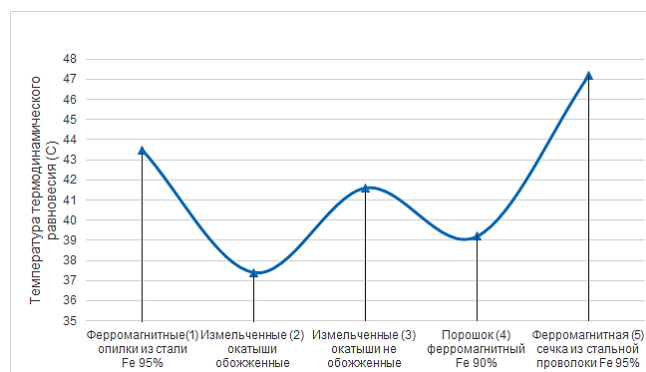


Рис. 6. Индукционный нагрев ферромагнитных наполнителей током частотой $f = 7$ кГц

Нагрев ферромагнитного наполнителя из сечки стальной проволоки (сталь 45) размерным составом фракций $d=330 \div 1230$ мкм, длиной $l=5 - 15$ мм представлен на рис. 7. Размер элементов сечки выбран с учетом сопоставимой толщины клеевого шва 330 мкм. С увеличением фракционного состава сечки возрастает температура термодинамического равновесия.

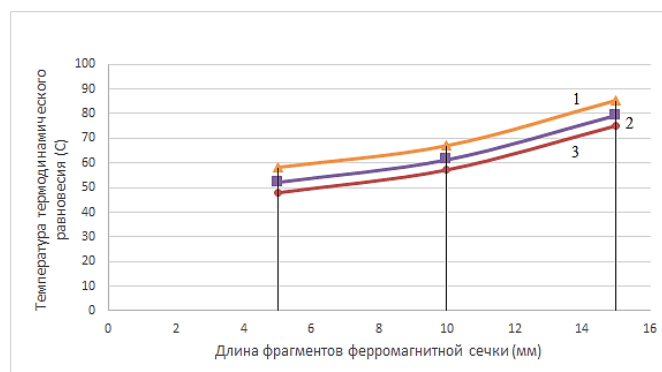


Рис. 7. Индукционный нагрев ферромагнитной сечки из стальной проволоки током частотой $f = 7,3$ кГц
1 – фракции 1230 мкм; 2 – фракции 380 мкм; 3 – фракции 330 мкм

Установлено, что в качестве наполнителей клеевой композиции для объемного равномерного нагрева клеевого шва индукционным способом могут быть эффективно применены измельченные ферромагнитные мелкодисперсные материалы: ферромагнитные опилки Fe 95%, наполнитель из измельченных окатышей не обожженных Fe_2O_3 , ферромагнитная сечка. При этом интенсивность нагрева наполнителя из не обожженных измельченных окатышей на 22-25 % выше, чем обожженных. Фракционный состав ферромагнитных наполнителей композиции сопоставим по размерным и качественным характеристикам со стандартными наполнителями (каолин и др.), применяемыми при склеивании древесины, что позволяет равномерно формировать контактное поле клеевого шва.

Прочность клеевого соединения с ферромагнитными наполнителями представлена на рис. 8, 9.

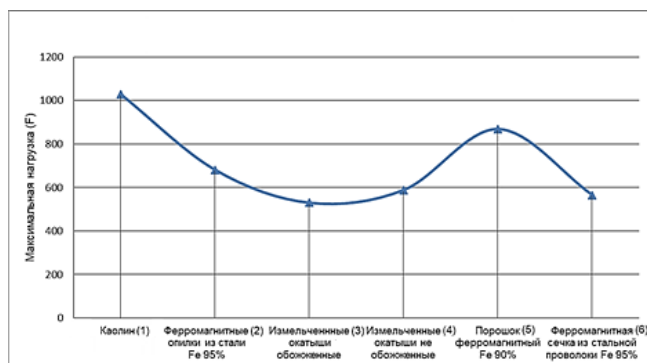


Рис. 8. Прочность клеевого соединения с наполнителями на основе карбамидной клеевой композиции

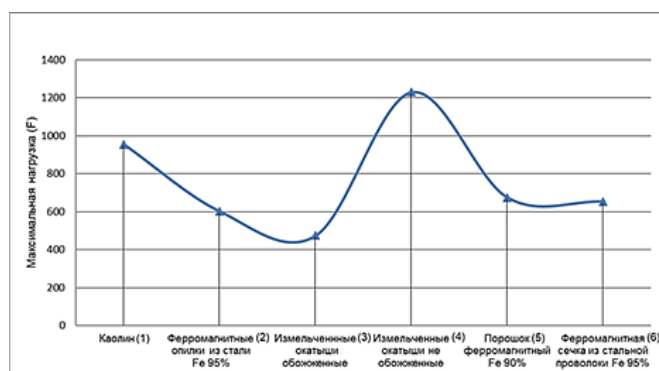


Рис. 9. Прочность клеевого соединения с наполнителями на основе эпоксидной клеевой композиции

Наибольшая прочность клеевого соединения при испытаниях на сдвиг наблюдается у образцов шпона, склеенных композицией с наполнителем из порошка Fe 90%. Отмечено, что фракционный состав ферромагнитного наполнителя аналогичен каолину.

Установлена линейная зависимость температуры нагрева ферромагнитных наполнителей в зависимости от подведенной мощности индукционного нагрева (таб. 3).

Таблица 3

Температура термодинамического равновесия ферромагнитных наполнителей в зависимости от мощности индукционного нагрева

Мощность индукционного нагрева	Температура нагрева				
	Ферромагнитные опилки из стали Fe 95%	Окатыши обожженные Fe ₂ O ₃	Окатыши не обожженные Fe ₂ O ₃	Порошок ферромагнитный Fe 90%	Ферромагнитная сечка из стальной проволоки Fe 95%
25 Вт	31,2 °С	26 °С	28,3 °С	26,5 °С	39,8 °С
60 Вт	43,5 °С	37,4 °С	41,6 °С	39,2 °С	47,2 °С
100 Вт	57,5 °С	53,2 °С	56,5 °С	53,2 °С	62,1 °С
120 Вт	64,5 °С	60,4 °С	64,1 °С	60,4 °С	73,4 °С
150 Вт	75,1 °С	71,1 °С	75,4 °С	71,1 °С	81,6 °С
170 Вт	82,1 °С	78,2 °С	82,9 °С	78,2 °С	88,3 °С
200 Вт	92,6 °С	88,9 °С	94,2 °С	88,9 °С	96,2 °С

В пятой главе на основе результатов исследований представлены технические решения совершенствования технологии и прессового оборудования для производства фанеры на участке формирования пакета шпона.

Предложен состав ферромагнитной клеевой композиции на основе карбамидной смолы КФ-МТ-15: наполнитель – мелкодисперсный зернистый ферромагнитный материал в количестве 1,5 мас.ч. на 100 мас.ч. карбамидной смолы, каолин 0,5 мас.ч. на 100 мас.ч. карбамидной смолы, отвердитель – сульфат аммония 1,5 мас.ч. на 100 мас.ч. карбамидной смолы. Наполнитель готовят из ферромагнитных окатышей – гранулированного рудного концентрата, продукта обогащения железосодержащих руд (*патент на изобретение RU 2715840*).

Для формирования и склеивания пакета шпона с индукционным избирательным нагревом клеевой композиции предложены три варианта конструкций пресса.

1. Пресс с избирательным индукционным нагревом клеевой композиции в пакете шпона (*патент на изобретение RU 2832342*). Пресс для склеивания шпона с ферромагнитной клеевой композицией, содержит установленные одна над другой плиты с нагревательными элементами. Нагревательный элемент выполнен в виде многovitкового овального индуктора из гибкого проводника. Нагрев ферромагнитной клеевой композиции осуществляется бесконтактно в продольном низкочастотном магнитном поле индуктора без промежуточных потерь тепла в объеме древесины пакета (рис. 10).

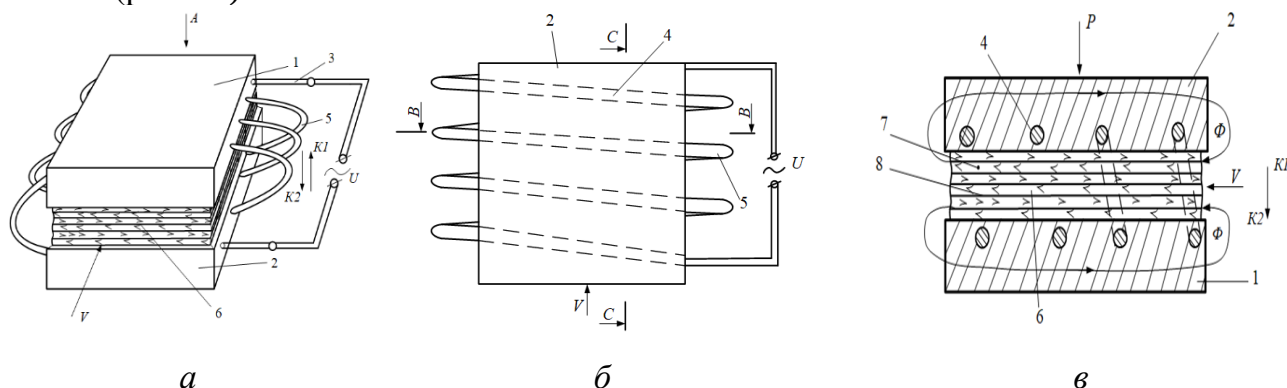


Рис. 10 Пресс с индукционным нагревом ферромагнитной клеевой композиции в пакете шпона

а – общий вид; *б* – вид А; *в* – вид С-С

1,2 – верхняя и нижняя подвижные плиты; 3 – многovitковый овалный индуктор; 4 – прямолинейные витки индуктора; 5 – торцевые петлевые витки индуктора; 6 – пакет шпона; 7 – листы шпона; 8 – ферромагнитная клеевая композиция

2. Пресс с комбинированным индукционным нагревом клеевой композиции в полупакете шпона и ферромагнитного аккумулятора тепла (*патент на изобретение RU 2823654*). Пресс для склеивания листов шпона терморезактивной клеевой композицией содержит установленные одна над другой плиты и нагревательные промежуточные элементы (аккумуляторы). Нагревательные элементы выполнены в виде тонких плоских пластин из ферромагнитного материала, которые размещены между полупакетами из листов шпона контактно с лицевой поверхностью граничных листов полупакета шпона. Нагрев пластин аккумулятора осуществляется

бесконтактно в магнитном поле многовиткового овального индуктора, размещенного в плитах пресса (рис. 11).

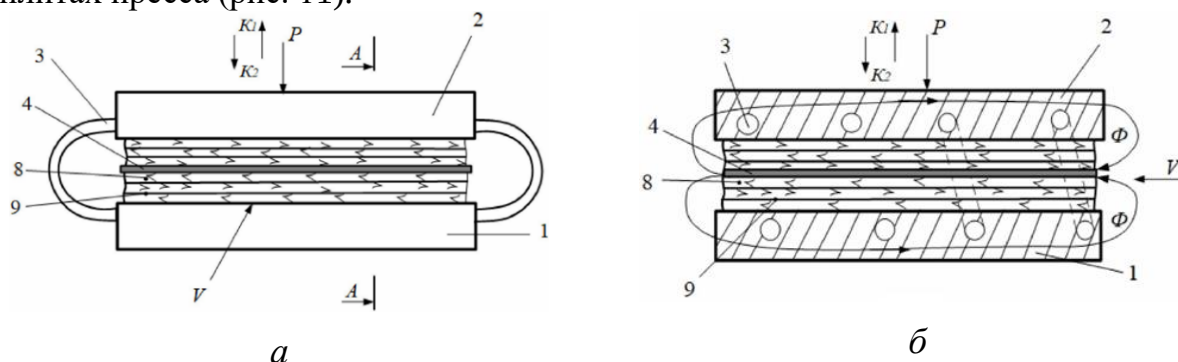


Рис. 11 Пресс с комбинированным нагревом пакета шпона

a – общий вид; *б* – разрез А-А

1,2 – верхняя и нижняя подвижные плиты; 3 – многовитковый овальный индуктор; 4 – нагревательный элемент (аккумулятор); 8 – полупакет шпона

3. Пресс с комбинированным индукционным нагревом профилированного пакета шпона с клеевой композицией и ферромагнитным аккумулятором тепла (патент на изобретение RU 2833904). Пресс содержит установленные одна над другой плиты с профильными пресс-формами, нагревательные элементы. Нагревательные элементы выполнены в виде тонколистовых цельных или составных пластин из ферромагнитного материала. Профиль поверхности пластин соответствует рельефу поверхности пресс-форм. В плитах или пресс-формах пресса, выполненных из инертного материала, установлен петлевой индуктор, выполненный с возможностью бесконтактного нагрева пластин в электромагнитном поле, а пластины выполнены с возможностью передачи тепла к термореактивной клеевой композиции контактно через массив древесины шпона (рис. 12).

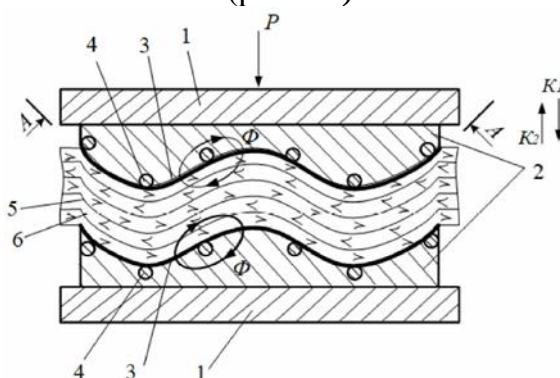


Рис. 12 Пресс с комбинированным индукционным нагревом профильного пакета шпона и клеевой композиции

a – общий вид; *б* – петлевой индуктор

1 – верхняя и нижняя подвижные плиты; 2 – пресс-формы;
3 – профильные нагревательные элементы; 4 – петлевой индуктор;
5 – термореактивная клеевая композиция; 6 – пакет шпона

Сравнительные показатели энергопотребления процесса производства фанеры на 1 м³ на участке прессования при средней стоимости электроэнергии 10 руб. за 1 киловатт/час приведены в таб. 4, рис. 13.

Таблица 4

Энергопотребление процесса производства фанеры на 1 м³, руб.

Вид нагрева	Энергопотребление, руб.
кондуктивный	10650
омический	5610
индукционный	864

Таким образом энергопотребление при индукционном нагреве клеевой композиции в пакете шпона может быть снижено в 8-12 раз.

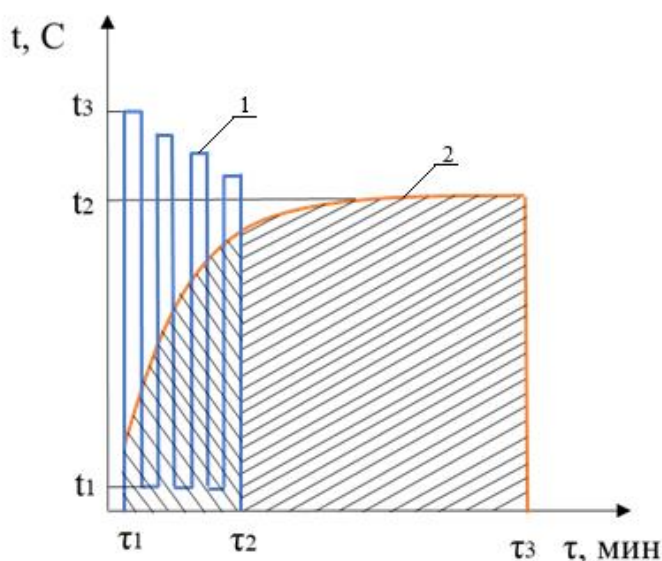


Рис. 13 Энергопотребление процесса производства фанеры

1 - индукционный циклический нагрев композиции; 2 – кондуктивный нагрев пакета шпона

Применение технических решений конструкций прессов в технологии производства фанеры позволяет сократить рабочий цикл, обеспечить подвод тепла непосредственно в клеевую ферромагнитную композицию без энергопотерь в материале, снизить энергозатраты, увеличить производительность и эффективность технологического процесса производства клееных изделий.

ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

В результате проведенных исследований научно обоснована и доказана возможность интенсификации процесса склеивания древесины бесконтактным индукционным нагревом клеевой композиции.

1. Индукционное тепловое бесконтактное воздействие на ферромагнитную клеевую композицию обеспечивает ускоренную полимеризацию клеевого соединения и формирование клеевого шва с нормированными прочностными характеристиками без промежуточных потерь в древесине. Нагрев клеевой композиции рекомендуется производить импульсным воздействием 60 – 120 сек.

2. Подобраны ферромагнитные наполнители клеевой композиции для склеивания древесины в электромагнитном индукционном поле. Предложенные

ферромагнитные наполнители сопоставимы по фракционному составу и качественным характеристикам со стандартными наполнителями, применяемыми при склеивании древесины, что позволяет их вводить в клеевую композицию для склеивания древесины в пределах рекомендуемого состава композиции.

3. Определены границы фракционного состава ферромагнитных наполнителей в соответствии с размерной характеристикой клеевого шва 250-1230 мкм.

4. Создана оригинальная математическая модель процесса бесконтактного индукционного нагрева ферромагнитного наполнителя в клеевой композиции для склеивания древесины позволяющая определять динамику нагрева.

5. Экспериментально определена резонансная частота индукционного нагрева $f = 7 \pm 0,15$ кГц для нагрева ферромагнитного наполнителя клеевой композиции, позволяющая определить технологические параметры применяемой ферромагнитной клеевой композиции для склеивания древесины.

6. Определен диапазон температур индукционного нагрева общедоступных для практического применения ферромагнитных наполнителей. Нагрев ферромагнитных опилок из стали Fe 95%, измельченных окатышей не обожженных Fe_2O_3 и ферромагнитной сечки из стальной проволоки происходит с наибольшей интенсивностью.

7. Определены прочностные характеристики клеевого соединения образцов шпона. Установлено, что прочностные характеристики клеевого соединения с применением ферромагнитной композиции соответствуют прочностным нормативным требованиям (ГОСТ 14759). Доказано, что разрушение клеевого соединения происходит по цельной древесине.

8. Предложен базовый рецептурный состав ферромагнитной клеевой композиции с наполнителями из ферромагнитных опилок из стали Fe 95%, измельченных окатышей не обожженных Fe_2O_3 и ферромагнитной сечки из стальной проволоки. Клеевая композиция в составе: наполнитель – мелкодисперсный зернистый ферромагнитный материал в количестве 1,5 мас.ч. на 100 мас.ч. карбамидной смолы, каолин 0,5 мас.ч. на 100 мас.ч. карбамидной смолы, отвердитель – сульфат аммония 1,5 мас.ч. на 100 мас.ч. карбамидной смолы. *Патент RU 2715840.*

9. Разработаны конструктивные решения прессового оборудования для склеивания шпона индукционным локальным нагревом клеевой композиции и формированием качественного клеевого шва. *Патенты RU 2832342, RU 2823654, RU 2833904.*

10. Рекомендации по совершенствованию технологии склеивания древесины ферромагнитной клеевой композицией с индукционным нагревом приняты предприятием АО «Архангельский фанерный завод».

11. Показано, что энергоэффективность индукционного нагрева непосредственно клеевой композиции с ферромагнитным наполнителем по сравнению с применяемыми технологиями составляет 8-12 раз.

Основное содержание диссертации опубликовано:

в изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Мелехов, В.И. Бесконтактный нагрев ферромагнитных наполнителей клеевой композиции при склеивании древесины / В.И. Мелехов, И.И. Соловьев, Н.Г. Пономарева, **В.В. Прохоров** // Системы. Методы. Технологии. 2023. № 4 (60). С. 155-160.

2. Мелехов, В.И., 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. 77-86.

3. Ключин, Н.М. Упруго-деформационные характеристики прессованной древесной шихты / Н.М. Ключин, В.И. Мелехов, О.Д. Мюллер, А.М. Воронин, **В.В. Прохоров**, Т.В. Тюрикова // Лесотехнический журнал. 2018. Т. 8. № 4 (32). С. 173-180.

в других изданиях:

4. **Прохоров, В.В.** Применение индукционного нагрева при склеивании изделий из древесины в судостроительной промышленности / **В.В. Прохоров** // Научно-технические ведомости Севмашвтуза, 2016, №1. С. 28-31.

5. **Прохоров, В.В.** Экспериментальный стенд, предназначенный для исследования процесса склеивания древесных заготовок / **В.В. Прохоров**, Н.М. Ключин, А.М. Воронин // Научный альманах. – 2018. – №11-2 (49). – С. 53-56.

6. **Прохоров, В.В.** Режим склеивания и его влияние на качество клеевого соединения / **В.В. Прохоров**, Н.М. Ключин, А.М. Воронин // Научный альманах. – 2019. – №3-3(53). – С. 71-74.

7. **Прохоров, В.В.** Экспериментальный стенд для исследования процесса склеивания заготовок из древесины в судостроительной промышленности / **В.В. Прохоров**, Н.М. Ключин, А.М. Воронин // Сборник материалов региональной научно-практической конференции преподавателей, аспирантов, магистрантов и студентов, специалистов организаций и предприятий. – 2019. – С. 254-257.

8. Мелехов, В.И. Интенсификация процесса склеивания древесины индукционным нагревом / В.И. Мелехов, **В.В. Прохоров** // Актуальные вопросы инновационного развития Арктического региона РФ: сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции Сев.(Арктич.) федер. ун-т им. М.В. Ломоносова. – Архангельск: ИД САФУ, 2020. – С. 90-94.

9. **Прохоров, В.В.** Экспериментальное исследование характеристик ферромагнитных наполнителей, вводимых в клеевую композицию / **В.В. Прохоров** // Ломоносовские научные чтения студентов, аспирантов и молодых ученых– 2021. Сборник материалов конференции: в 2-х томах. Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова», 2021. – С. 460-464.

10. Мелехов, В.И. Интенсификация склеивания древесины бесконтактным нагревом клеевого шва / В.И. Мелехов, И.И. Соловьев, **В.В. Прохоров**, В.А. Слуцков, Н.М. Ключин // Проблемы механики целлюлозно-бумажных материалов. Материалы VII Международной научно-технической конференции имени профессора В.И. Комарова. Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова». RUSS, 2023. – С. 157-161.

11. Мелехов, В.И. Прочностные характеристики ферромагнитной клеевой композиции / В.И. Мелехов, И.И. Соловьев, **В.В. Прохоров**, Е.В. Сазанова, И.А. Дужевский, А.М. Воронин // Актуальные вопросы инновационного развития Арктического региона РФ: сборник материалов Всероссийской научно-практической

конференции Сев.(Арктич.) федер. ун-т им. М.В. Ломоносова. – Архангельск: ИД САФУ, 2025. – С. 522-527.

патенты:

12. Патент на изобретение № 2715840. Способ склеивания древесины. Авторы: Мелехов В.И., Соловьев И.И., **Прохоров В.В.**, Тюрикова Т.В. Заявка № 2019123090 от 22.07.2019. Приоритет: 22.07.2019. Опубликовано: 03.03.2020 Бюл. № 7.

13. Патент на изобретение № 2823654. Пресс для склеивания листов шпона. Авторы: Мелехов В.И., Соловьев И.И., **Прохоров В.В.**, Сазанова Е.В. Заявка № 2024113707 от 21.05.2024. Приоритет: 21.05.2024. Опубликовано: 26.07.2024 Бюл. № 21.

14. Патент на изобретение № 2832342. Пресс для склеивания шпона. Авторы: Мелехов В.И., Соловьев И.И., **Прохоров В.В.**, Сазанова Е.В. Заявка № 2024113701 от 21.05.2024. Приоритет: 21.05.2024. Опубликовано: 23.12.2024 Бюл. № 36.

15. Патент на изобретение № 2833904. Пресс для склеивания профильных изделий из шпона. Авторы: Мелехов В.И., Соловьев И.И., **Прохоров В.В.**, Сазанова Е.В. Заявка № 2024115076 от 03.06.2024. Приоритет: 03.06.2024. Опубликовано: 30.01.2025 Бюл. № 4.

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