

ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет
имени М.В. Ломоносова»

На правах рукописи



Прохоров Владимир Вячеславович

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

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
д.т.н., профессор
Мелехов Владимир Иванович

Архангельск 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	4
1 Состояние вопроса и задачи исследования.....	10
1.1 Технологические процессы склеивания древесины и древесно- компонитных материалов	10
1.1.1 Холодное склеивание.....	10
1.1.2 Горячее склеивание.....	11
1.2 Режимы склеивания древесины.....	15
1.3 Клеевые композиции для склеивания древесины.....	19
1.4 Модификаторы и наполнители клеевых композиций.....	23
1.5 Способы нагрева клеевой композиции.....	29
1.6 Цель и задачи исследования	39
2 Индукционный нагрев ферромагнитных материалов.....	40
2.1 Индукционный нагрев мелкодисперсных ферромагнитных материалов.....	40
2.2 Математическая модель процесса бесконтактного индукционного нагрева ферромагнитного наполнителя в клеевой композиции для склеивания древесины.....	48
3 Экспериментальные исследования процесса бесконтактного индукционного нагрева ферромагнитной клеевой композиции для склеивания древесины.....	51
3.1 Экспериментальная установка.....	52
3.2 Ферромагнитные наполнители клеевой композиции.....	58
3.3 Нагрев клеевой композиции с ферромагнитным наполнителем.....	61
3.4 Характеристики клеевых композиций.....	66
3.5 Склеивание шпона для производства фанеры ферромагнитными клеевыми композициями.....	68
3.5.1 Склеивание шпона с применением ферромагнитной клеевой композиции.....	71

3.6 Прочность клеевого соединения древесины с ферромагнитным адгезивом.....	73
4 Обсуждение результатов исследования.....	76
4.1 Динамика процесса нагрева ферромагнитных наполнителей.....	76
4.2 Прочностные характеристики клеевого соединения шпона.....	109
4.3 Выводы по главе.....	124
5 Совершенствование технологии производства фанеры на участке формирования пакета шпона.....	125
5.1 Технология бесконтактного нагрева клеевой композиции.....	125
5.2 Новые технические решения конструкции прессового оборудования.....	128
5.3 Экономический эффект от снижения энергопотребления на участке прессования.....	137
Общие выводы и рекомендации.....	142
Список литературы.....	144
Приложения.....	158

ВВЕДЕНИЕ

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 актуальным.

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 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Технологические процессы склеивания древесины и древесно-композитных материалов

Склеивание древесины представляет собой технологический процесс формирования неразъемного соединения деталей посредством адгезионного взаимодействия клеевого состава с поверхностями склеиваемых элементов.

История применения технологии склеивания древесины насчитывает длительный период, однако лишь в начале XX века начали использовать клеевые составы на основе синтетических смол. Первыми из таких материалов были фенолформальдегидные смолы. В 1930-х годах появились полиэфирные и позднее эпоксидные смолы, применение которых позволило существенно повысить адгезионную прочность клеев и расширить спектр их применения. Были созданы клеевые композиции с высокими показателями прочности и теплостойкости, получившие название конструкционных. В настоящее время клеевые материалы широко распространены в производстве фанеры, мебели, столярно-строительных конструкций, древесностружечных и древесноволокнистых плит и других изделий.

1.1.1 Холодное склеивание

На практике склеивание древесины осуществляется двумя основными способами: холодным и горячим, с нагревом или без нагрева склеиваемых поверхностей. Холодное склеивание производится при температуре окружающей среды в диапазоне от 18 до 20 °С. Однако возможен более широкий температурный интервал (18-40 °С), оказывающий влияние на продолжительность процесса склеивания.

При изготовлении крупномерных деревянных конструкций преимущественно используется холодное склеивание. Продолжительность выдержки под давлением при этом зависит от вида клея и размеров заготовок и составляет от 5 до 12 часов. При холодном способе склеивания необходимо большое количество прессового оборудования и производственных площадей, усложняется непрерывность производственного процесса.

1.1.2 Горячее склеивание

При склеивании древесины, клеевую композицию нагревают, что позволяет интенсифицировать процесс полимеризации. Температура горячего склеивания варьируется от 70 до 200 °С с продолжительностью выдержки под давлением 8-10 минут, в зависимости от вида клея и заготовок [1, 6]. Нижний предел температурного интервала определяется максимально допустимым значением нагрева древесины при использовании клеев холодного отверждения. Превышение этого порога приводит к разрушению контактной зоны древесины. Верхний предел температурного интервала обусловлен развитием остаточных напряжений в древесине при высоких температурах [18].

При повышенных температурах клеевой композиции происходит запуск процесса полимеризации, заканчивающийся полным ее отверждением. Теплота от нагретой древесины распространяется по всему объему клеевой композиции, в результате чего при температуре клея 120-130 °С его технологическая полимеризация завершается за несколько минут.

В процессе изготовления фанерной продукции применяют горячий способ склеивания. При увеличении толщины числа слоев шпона для достижения оптимальной температуры в слоях, удаленных на разное расстояние от нагревательных элементов, потребуется различное время прогрева.

К достоинствам применения горячего способа склеивания можно отнести:

- универсальность способа, что позволяет применить его с различной эффективностью для склеивания при изготовлении древесных материалов.
- при применении горячего способа склеивания уменьшается продолжительность прессования и выдержки соединяемых деталей при нагреве.

К недостаткам способа можно отнести:

- усложнение конструкции прессового оборудования, оснащенного системой нагревания, появление термических напряжений в клеевом шве и интенсивное выделение образующихся при отверждении клеев токсичных продуктов.

Для интенсификации процесса полимеризации клеевой композиции применяют различные способы нагрева: контактный (кондуктивный), конвективный, инфракрасным излучением, токами промышленной и сверхвысокой частоты (СВЧ). Тепловая энергия передается в клеевой слой через массив древесины, при этом сопровождается потерями тепла в древесине, что вызывает неоднородный прогрев и различную скорость полимеризации клеевого шва в зонах сопрягаемых клеевых поверхностей.

– При контактном (кондуктивном) способе нагрева заготовки прогреваются неравномерно как по толщине, так и по площади контакта. Это объясняется частичным удалением влаги с периферийной зоны древесины, в результате чего происходит отвод части тепла и снижение температуры в этой области. Центральные же участки древесины испытывают более интенсивный нагрев за счёт проникновения в них влаги в виде пара. Чрезмерная продолжительность нагрева клеевого шва способствует появлению термических напряжений, что негативно сказывается на прочности клеевого соединения.

– Конвективный нагрев древесины заключается в первоначальном прогреве внешних слоев заготовок и накоплении тепла внутри материала. Поэтому прогрев и теплопередача в клеевом шве происходит с запаздыванием, и его окончательная полимеризация осуществляется после распрессовки при дальнейшей выдержке конструкции при температуре окружающей среды.

– Инфракрасное излучение используется преимущественно при нагреве тонких древесных материалов, обеспечивая быстрый прогрев клеевого шва в поверхностных слоях. Время воздействия обычно составляет 10-20 минут, что позволяет придать конструкции транспортную прочность. Данный метод неприменим для полной полимеризации клеевого слоя по всей площади крупномерных деталей.

– Способ нагрева клеевого слоя аккумулярованным в древесине теплом, используется, как правило, для единичных деталей и не получил широкого распространения в массовом производстве.

– Нагрев клеевого слоя при помощи токов промышленной и сверхвысокой частоты (СВЧ) производится в специализированных установках сложной конструкции с высокой энергоемкостью. Данный метод ограничен требованиями техники безопасности из-за использования высоких напряжений, а также возможным негативным воздействием на древесину кислот и щелочей, содержащихся в клеевой композиции [4-10].

Рассмотренные способы склеивания древесины заключаются в том, что тепловое воздействие на клеевую композицию осуществляют через теплопередачу, неравномерно. Среди современных направлений интенсификации процесса склеивания древесины представляет интерес новый подход локального нагрева непосредственно клеевой композиции в магнитном поле индуктора без потерь тепла в древесине.

Известные способы нагрева подразделяются по месту подвода тепла к склеиваемым деталям на три класса: с внешним нагревом, внутренним

нагревом и местным предварительным нагревом древесины (рис.1.1). При внешнем нагреве тепло подводится к клеевому слою извне через массив древесины. Из-за инерции теплового потока прогрев клеевого шва проходит с запаздыванием. Перенос энергии от внешней горячей поверхности к склеиваемой конструкции осуществляется теплопроводностью [18].

Применяют различные способы нагрева или подвода тепла к склеиваемым заготовкам из древесины [2, 3, 4].

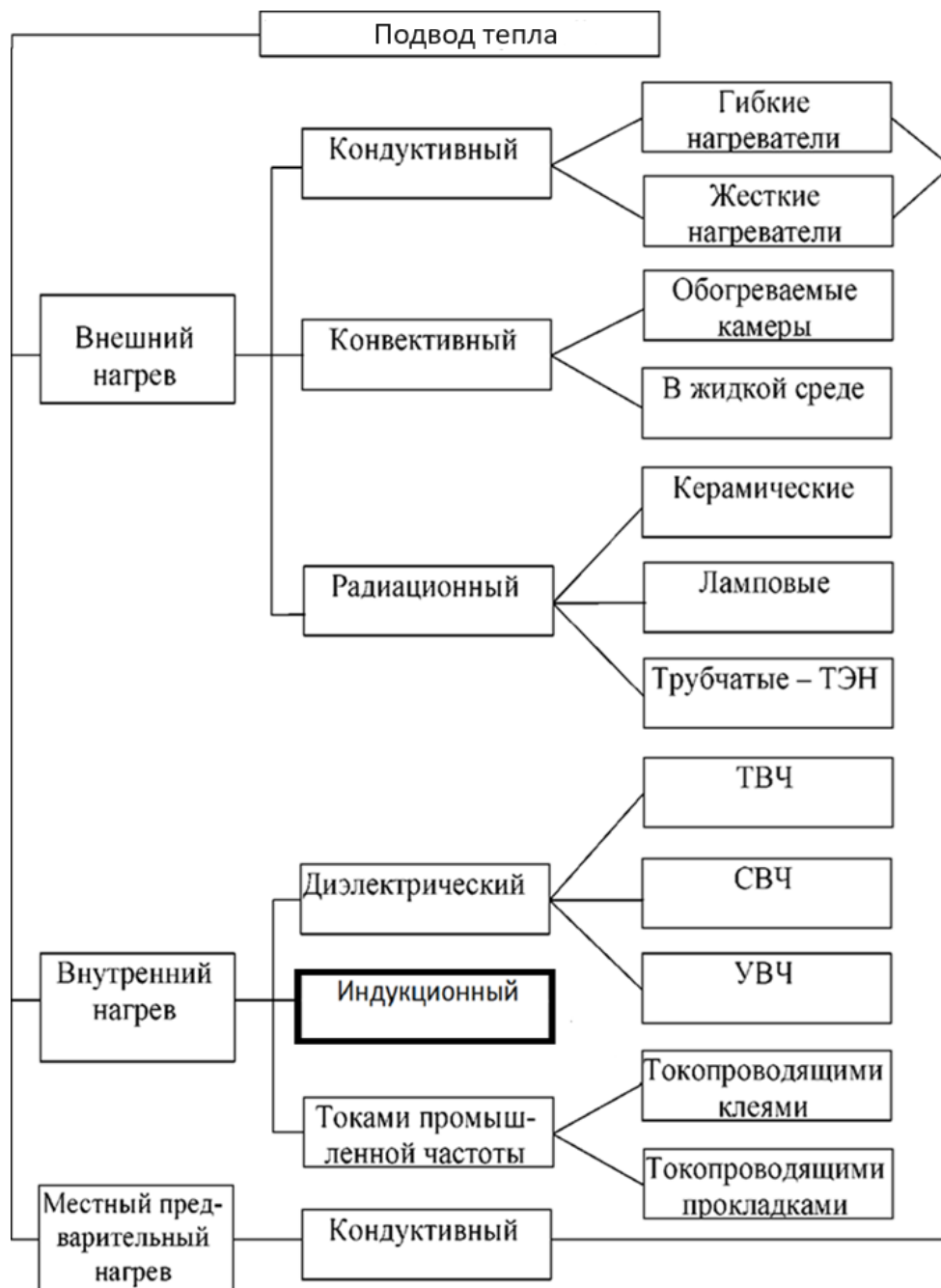


Рис.1.1. Подвод тепла в клеевую композицию

1.2 Режимы склеивания древесины

Технология склеивания деревянных изделий представляет собой строго регламентированную последовательность операций: подготовка поверхности материалов, нанесение клея, прессование с выдержкой под давлением и последующее выдерживание после завершения процесса прессования. Под режимом склеивания подразумевается набор факторов, которые обеспечивают формирование качественного клеевого соединения, отвечающего заданным требованиям. К таким факторам относятся состояние клея, наносимое его количество, параметры окружающей воздушной среды производственного помещения, температура процесса склеивания, уровень давления на материалы, а также продолжительность выдержки под давлением и последующего периода выдержки после освобождения из-под прессы [60].

Состояние клея характеризуется концентрацией, вязкостью и температурой. При применении горячего способа склеивания, присутствие в клее избыточной влаги вызывает выпадение смолы из раствора, из-за чего не образуется сплошного клеевого шва и понижается прочность соединения.

Качество клеевого соединения существенно зависит от количества используемого клея. Недостаточный расход клеевого состава приводит к формированию прерывистого шва, что значительно снижает прочностные характеристики соединения. С другой стороны, избыточное нанесение клея приводит к образованию утолщённого клеевого слоя, в котором возникают внутренние напряжения, способные вызвать появление микротрещин. Для каждого конкретного изделия и клеевой композиции существуют строго установленные нормы расхода, несоблюдение которых отрицательно влияет на прочность соединения.

Температурный режим в производственных помещениях также существенно влияет на характеристики клея, его способность к

желатинизации и смачиванию поверхности древесины. Например, для поливинилацетатных клеев рекомендуется поддерживать температуру не ниже 25 °С, поскольку при снижении температуры их способность к смачиванию ухудшается. При использовании карбамидоформальдегидных и фенолформальдегидных клеев оптимальная температура в помещениях составляет 15-20 °С [111].

Вязкость клеевого состава напрямую связана с его концентрацией. При одинаковых условиях клеи с меньшей концентрацией обладают меньшей вязкостью. Этот фактор является важным при склеивании, поскольку недостаточное смачивание поверхности древесины клеем может привести к образованию пустот, уменьшению площади эффективного контакта и, как следствие, снижению прочности клеевого шва.

Влажность древесины является критическим фактором, влияющим на качество клеевого соединения. Рекомендуемая влажность массивной древесины перед склеиванием колеблется от 6 до 15%. Для мебельных изделий оптимальная конечная влажность древесины составляет $(8\pm 2)\%$, а для столярно-строительных изделий – в диапазоне 10-12% (рис. 1.1) [86, 111].

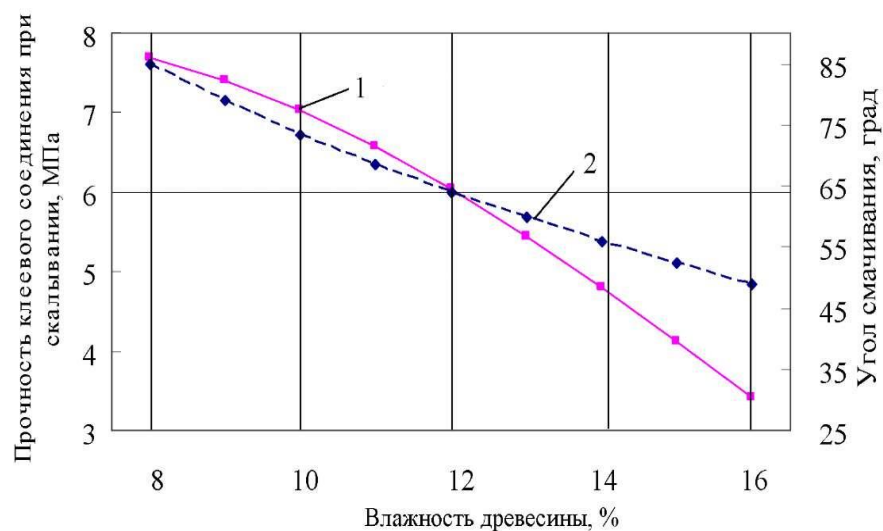


Рис. 1.1. Зависимость прочности клеевых соединений
от влажности древесины:

- 1 – зависимость прочности клеевого соединения древесины от % влажности;
- 2 – зависимость смачиваемости древесины от % влажности.

Склеиваемые элементы должны хорошо соприкасаться по всей поверхности изделия. Увеличение влажности древесины препятствует глубокому проникновению клея в поверхностные слои материала. При этом снижение шероховатости древесины положительно влияет на качество клеевого соединения, обеспечивая лучшее смачивание и снижая расход клея.

На качество склеивания также существенно влияет состояние воздуха в производственных помещениях. В воздухе, как правило, присутствуют влага, пыль, микроорганизмы, а также возможны загрязнения маслом от оборудования. Эти факторы способствуют образованию на древесине инактивированного слоя, ухудшающего адгезию клея. Особенно нежелательно попадание пыли, которая закупоривает микропоры и мелкие трещины на поверхности древесины, что уменьшает эффективную площадь контакта клея с материалом. Помимо физических загрязнений, возможно наличие «химических» загрязнений, предотвращение которых достигается снижением уровня запыленности в цехах, механической очисткой поверхностей древесины после обработки или применением продувки сжатым воздухом. Чтобы избежать «химического» загрязнения, рекомендуется склеивать отфрезерованные заготовки в течение 2-8 часов после их обработки [110].

Важным фактором, определяющим качество клеевого шва, является величина давления, прилагаемого к склеиваемым материалам. Оптимальные параметры давления зависят от породы древесины, ее влажности и качества подготовленных поверхностей. При увеличении толщины древесины требуется увеличение давления склеивания. В большинстве случаев, вследствие неровностей поверхностей, значительных размеров заготовок и возможного разбухания древесины, необходимо увеличивать давление прессования. Рекомендуемое давление для синтетических клеев составляет 0,5-0,7 МПа [60].

Для достижения необходимой прочности клеевого соединения изделия выдерживаются под давлением в течение определённого времени, продолжительность которого зависит от вида клея, породы древесины и условий прессования. Например, при использовании карбамидоформальдегидных клеев для массивной древесины холодным методом время выдержки составляет от 3 до 7 часов, тогда как для поливинилацетатных клеев оно сокращается до 0,5-1 часа [60].

При применении горячего способа склеивания древесины, процесс полимеризации клеевого шва сокращается в несколько раз. Горячий способ склеивания применяют в производстве сравнительно тонких материалов, для которых возможен быстрый равномерный прогрев по всему объёму – фанеры, древесно-стружечных плит. В данном случае, возможно использование только термореактивных клеев. Наиболее распространёнными клеями являются карбамидные и фенолформальдегидные клеи. Время горячего склеивания для смол типа КФ вдвое ниже, чем для смол СФЖ.

1.3 Клеевые композиции для склеивания древесины

Для склеивания изделий из древесины и древесно-композитных материалов применяют синтетические смолы и на их основе клеи холодного и горячего отверждения: фенолоформальдегидные, карбамидоформальдегидные, резорцино-формальдегидные и др.

Определяющим является правильный и обоснованный выбор клеевого состава, который удовлетворял бы большинству предъявляемых требований при изготовлении изделий из древесины. Основным критерием при этом следует считать взаимодействие клеящего полимера и склеиваемого материала.

Клеи поливинилацетатные (ПВА) – продукт полимеризации винилацетата в водной среде. Белая однородная жидкость со слабым эфирным запахом. Склеивание ПВА основано на диффузном слипании отдельных частиц в сплошную пленку. Ее можно изготавливать непластифицированной (Д) и пластифицированной дибутилфталатом (ДФ).

ПВАД – белая однородная жидкость, обладающая длительной жизнеспособностью, нетоксична, устойчива к биологическим воздействиям. ПВАД применяют для склеивания массивной древесины [66].

Клей на основе поливинилацетата (ПВА) широко применяется для соединения древесины, не подвергающейся в процессе эксплуатации воздействию влаги и значительным статическим нагрузкам. Среди основных преимуществ данного клея можно выделить высокие адгезионные характеристики, экологическую безопасность, удобство использования благодаря готовности к немедленному применению и быструю скорость отверждения при комнатной температуре. Наиболее распространёнными марками ПВА являются Д50М, Д50С, Д50В, ДБ48/4Н, ДБ47/7С и другие [32].

Фенолоформальдегидные смолы и клеевые составы на их основе позволяют создавать высокопрочные и водостойкие соединения, превосходящие по этим характеристикам карбамидоформальдегидные клеи. Такие клеи могут быть одно- или многокомпонентными, выпускаться в жидком виде или в виде твердых пленок, предназначенных для холодного или горячего склеивания.

Особенностью однокомпонентных фенолформальдегидных клеев является их способность отверждаться исключительно при нагреве без добавления дополнительных отвердителей. Многокомпонентные клеи характеризуются повышенными показателями вязкости и концентрации. Для отверждения фенолформальдегидных смол при комнатной температуре используются специальные отвердители, такие как керосиновый контакт Петрова или нафталинсульфокислоты [58].

В состав фенолформальдегидных клеев вводят различные наполнители (лигниновую муку, древесную муку, целлюлозу, стекловолокно, текстильные волокна) для увеличения объема и улучшения технологических характеристик. Данные клеи находят применение в производстве фанеры, клееных конструкций и других изделий, к которым предъявляются высокие требования по водостойкости, механической прочности и долговечности. Недостатком таких смол является относительно высокая токсичность, связанная с содержанием формальдегида (классы эмиссии: E0,5; E1; E2) [32].

Карбамидоформальдегидные (карбамидные) смолы производятся методом поликонденсации карбамида с формальдегидом и являются одними из самых распространённых клеев для древесины. Основными преимуществами карбамидоформальдегидных клеев по сравнению с фенолформальдегидными являются их прозрачность, устойчивость к световому воздействию и меньшая степень токсичности.

Тем не менее, данные клеи имеют и недостатки, среди которых выделяют сложность процесса синтеза, невозможность длительного хранения

и транспортировки из-за ограниченного срока годности, повышенную хрупкость клеевого соединения, а также высокую токсичность конечного продукта. Такие проблемы характерны для смол марок КФ-НФП, КФ-МТ, КФ-МТ-05, КФ-МТ-15. Для устранения указанных недостатков были разработаны улучшенные варианты карбаминоформальдегидных смол, такие как КФ-А, КФ-115-53, КФ-115-55, которые синтезируются методом глубокой конденсации в кислой среде [24].

Несмотря на существующие недостатки, применение при склеивании фанеры, древесностружечных волокнистых плит, клеев на основе карбаминоформальдегидных смол целесообразно, в связи с высокой прочностью соединений, низкой стоимостью, небольшим временем горячего отверждения. Основные свойства карбаминоформальдегидных клеев представлены в табл.1.2 [24].

Таблица 1.2

Характеристика карбаминоформальдегидных смол и клеев

Наименование показателя	Марки смол			
	КФ-Б	КФ-Ж	КФ-БЖ	КФ-Р
1. Вязкость по ВЗ-246, с	30-50	40-60	50-80	25-120
2. Массовая доля сухого остатка, %	66 ±1	67 ±2	65,5 ±2	64 ±1
3. Массовая доля щелочи, %	7,5-8,5	7,5-8,7	7,5-8,5	6,8-7,5
4. Продолжительность желатинизации при 100 °С, с	40-60	40-65	Не более 70	Не более 70
5. Массовая доля свободного формальдегида, %, не более	0,25	0,90	0,15	0,15
6. Предел прочности при скалывании по клеевому слою после вымачивания в воде в течение 24 ч, МПа, не менее	6,6	6,5	Не норм.	6,6

В качестве наполнителей для клеевой композиции используют: древесную, пшеничную и ржаную муку, каолин.

Для массового склеивания древесины чаще всего применяют клеи горячего отверждения на основе карбамидоформальдегидных смол: КФ-Ж, КФ-МТ, КФ-Б, КФ-БЖ.

Резорциновые клеи во многом сходны с фенолформальдегидными клеями и отличаются хорошей влагостойкостью и водостойкостью. Они представляют собой двухкомпонентные составы на основе резорциноформальдегидной смолы и отвердителя, которые смешиваются непосредственно перед нанесением. Резорциновые клеи формируют характерный красно-коричневый клеевой слой, заметный на древесине светлых пород. В качестве наполнителей используются древесная мука и мел. Несмотря на высокую долговечность и технологичность соединений, резорциновые клеи имеют высокую стоимость и относятся к токсичным составам. Рекомендуемая температура древесины при их нанесении составляет около 20 °С, а срок жизнеспособности клея можно увеличить путем предварительного охлаждения состава до 10-15 °С перед добавлением отвердителя. Предварительная обработка древесины должна проводиться не ранее чем за сутки до склеивания [60].

Эпоксидные клеи, производимые на основе эпоксидных смол, также являются двухкомпонентными, состоящими из смолы и отвердителя, которые смешиваются непосредственно перед применением. Они выпускаются в жидком и кристаллизованном виде, образуя после отверждения прозрачный и устойчивый клеевой слой. Процесс полимеризации эпоксидных клеев продолжительный, в состав вводятся наполнители (мел, гипс, древесные опилки, стеклоткани) [60].

Эпоксидные клеи обладают универсальностью, доступностью в использовании, водонепроницаемостью, устойчивостью к трещинам и усадке, хорошим качеством склеивания. Наряду с достоинствами имеют недостатки: высокую стоимость и сложность нанесения.

1.4 Модификаторы и наполнители клеевых композиций

Отверждение карбаминоформальдегидных клеев сопровождается усадкой, которая приводит к возникновению внутренних напряжений и растрескиванию смолы. При использовании карбаминоформальдегидных смол эти недостатки устраняют введением наполнителей и пластификаторов. В качестве наполнителей в клеевую композицию добавляют: древесную муку, крахмал, каолин, некоторые минеральные вещества.

Модификация клеевых составов предполагает направленное изменение их свойств путём добавления различных веществ. В качестве модификаторов могут выступать как отдельные компоненты, так и другие виды клеев. Модифицирующие добавки улучшают эксплуатационные и технологические характеристики клеев. Различают химическую модификацию, основанную на добавлении веществ, изменяющих адгезионные, когезионные и эластичные свойства клея, и физическую, реализуемую посредством различных видов физического воздействия (тепло, излучение, вибрация). Исследованиями установлено, что снижение содержания свободного фенола в смолах позволяет проводить отверждение при более низких температурах без значительного изменения скорости процесса. [20, 53, 56, 58].

По степени влияния на скорость отверждения модифицирующие добавки делятся на эффективные (резорцин, параформальдегид, смола Р-1, бихромат аммония) и малоэффективные (уротропин, бикарбонат натрия, сернокислый аммоний). Однако применение некоторых эффективных модификаторов ограничено их высокой стоимостью и большим расходом (до 15-18% от массы смолы) [111].

Для создания быстроотверждающихся клеев на основе карбаминоформальдегидных смол можно применить отвердители, более активные, чем хлорид аммония NH_4Cl . Результаты получены при

использовании комбинированного отвердителя, включающего хлористый аммоний и железоаммонийные квасцы $\text{NH}_4\text{Fe}(\text{SO}_4)_2$ (таб. 1.1) [56].

Таблица 1.1

Влияние состава отвердителя на время желатинизации и вязкость клея
на основе смолы КФ-Ж

Состав отвердителя на 100 мас.ч. смолы		$t_{\text{ж}}$ при $T=100^\circ\text{C}$, с	η , с			
NH_4Cl	$\text{NH}_4\text{Fe}(\text{SO}_4)_2$		t=0	t=1ч	t=2ч	t=3ч
t=1,0	0	81	79	84	89	92
t=1,0	0,1	73	79	88	94	108
t=1,0	0,2	64	80	91	113	129
t=1,0	0,3	58	79	92	122	137
t=1,0	0,4	54	81	107	150	210
t=1,0	0,5	48	80	109	148	—

Введение комбинированного отвердителя позволяет сократить цикл склеивания шпона в прессе на 20-25%, однако при этом существенно снижается жизнеспособность рабочего раствора клея (рис. 1.2).

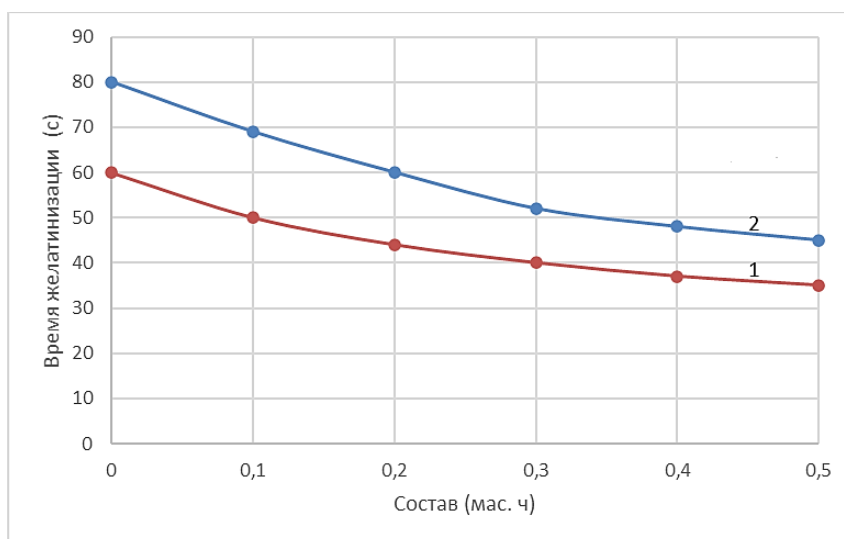


Рис. 1.2. Влияние содержания железоаммонийных квасцов в карбомидоформальдегидном связующем на время желатинизации клея
1 – КФ-О; 2 – КФ-Ж

Для продления жизнеспособности клея с комбинированным отвердителем можно использовать лигносульфонаты в количестве, не превышающем 3-5 мас. ч. на 100 мас. ч. раствора связующего. При введении лигносульфонатов в карбамидо- и фенолформальдегидные олигомеры они адсорбируются в поверхностном слое вследствие высокой поверхностной активности. Это приводит к уменьшению поверхностного натяжения и повышению его способности смачивать древесину. Однако лигносульфонаты обладают низкой когезионной прочностью и адгезионной способностью, что отрицательно влияет на прочность и водостойкость клеевого соединения. С увеличением содержания лигносульфонатов в растворе клея вязкость последнего возрастает, а скорость отверждения уменьшается [56].

Воздействие железоаммонийных квасцов ускоряет отверждение карбамидоформальдегидных олигомеров, что целесообразно использовать при изготовлении фанеры из древесины хвойных пород при низких температурах плит пресса, не приводящих к образованию паровоздушной смеси в пакете с высоким избыточным давлением. Температуру склеивания можно снизить до 95-105 °С, при этом продолжительность будет соответствовать существующим режимам, без снижения производительности прессового оборудования [58].

Модификация смол карбамидоформальдегидными клеями позволяет не только ускорить процесс склеивания, но и получать клеевые соединения, прочность которых соответствует нормативным требованиям, предъявляемым к соединениям на фенолформальдегидных клеях.

Повышение производительности прессового оборудования при склеивании древесины может быть достигнуто путем сокращения времени желатинизации связующего, то есть ускорения его отверждения. Это достигается повышением температуры прессования, модификацией связующего, применением высокоактивных отвердителей. Однако следует

отметить, что ускорение отверждения нередко сопровождается ухудшением других свойств клеев, поэтому целесообразно подбирать условия, позволяющие получать удовлетворяющие потребителя результаты при высокой скорости склеивания.

В зависимости от характера взаимодействия со связующей смолой дисперсные добавки делят на активные и инертные. К активным относят органические компоненты, способные набухать и вступать в химическое взаимодействие с клеевой композицией, благодаря чему они повышают прочность клеевого шва и улучшают адгезионные характеристики композиции (крахмал, мука зерновых культур). Следует подчеркнуть, что «активность» наполнителя условна: усиливая одни эксплуатационные параметры, он может негативно влиять на другие, причём эффект проявляется лишь при определённой доле наполнителя в клеевой композиции.

Инертные наполнители представляют собой минеральные порошки (мел, каолин, тальк и др.), нерастворимые в смоле и химически с ней не реагирующие. Их основная функция – объёмное заполнение, позволяющее регулировать вязкость композиции, снижать расход смолы и ограничивать глубину её проникновения в поры древесины.

Для надёжного технологического эффекта частицы должны образовывать с полимером однородную дисперсию, не замедлять кинетику отверждения и не ухудшать стабильность клея при хранении. По химической природе наполнители подразделяются на органические (древесная, злаковая и бобовая мука, крахмал, лигнин, измельчённая кора) и неорганические (каолин, мел, асбест, гипс, мелкодисперсные ферромагнитные порошки). Органические фракции активно сорбируют воду, набухают, повышают вязкость и препятствуют стеканию смолы, одновременно снижая внутренние напряжения в отверждённом слое благодаря сохранению молекулярной подвижности [111].

Неорганические же добавки почти не влияют на реологию, однако эффективно закупоривают анатомические сосуды древесины, предотвращая фильтрационные потери клея, так как каолин повышает концентрацию клеевого раствора и обеспечивает максимальную прочность на скалывание при оптимальном соотношении с фенолоформальдегидной смолой. Экспериментальные данные показывают, что комбинированное использование органического (древесная мука) и минерального (каолин) наполнителей в системе КФ-МТ-15 целесообразно для широкого применения в производстве фанеры и мебельных плит [69].

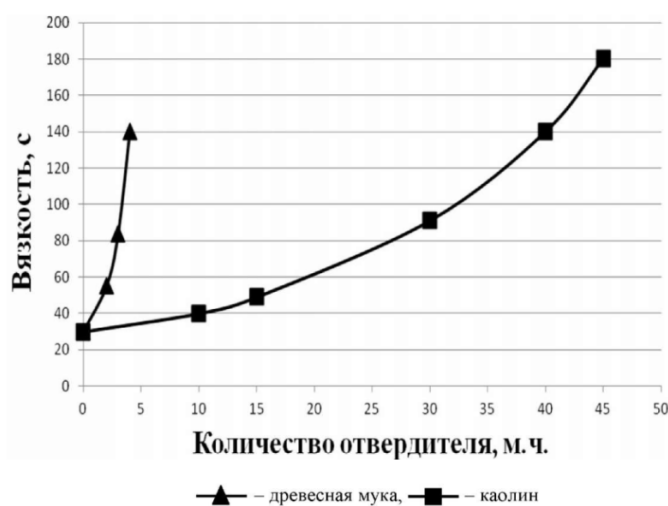


Рис. 1.7 Зависимость вязкости клея от количества и вида используемого наполнителя



Рис. 1.8 Зависимость прочности склеивания от количества и вида используемого наполнителя

Модификация клеевой карбонидной композиции ферромагнитным наполнителем позволяет интенсифицировать процесс полимеризации клеевого шва. Ферромагнитный наполнитель является инертным. Содержит фракции сухого измельченного материала, включающего окись-закись железа, чистое железо, никель или другой магнитный материал, используемый в качестве катализатора разогрева клеевого шва.

Применяется при склеивании изделий из древесины индукционным нагревом. В зависимости от применения ферромагнитного наполнителя, возможно использование металлических частиц различной дисперсности и степени намагниченности.

1.5 Способы нагрева клеевой композиции

Для интенсификации полимеризации клеевого соединения при изготовлении изделий из древесины, применяют три основных способа нагрева клеевого шва: кондуктивный (контактный), конвективный и высокочастотный.

Кондуктивный (контактный нагрев) основан на использовании гибких или жестких электро- или маслонагревателей плотно прижатых к наружной поверхности пакета, благодаря чему теплота в древесине передается теплопроводностью.

Нагрев применяется при склеивании фанеры, древесно-стружечных и столярных плит, когда толщина древесины не превышает 15-20 мм. На практике древесину нагревают плитами гидравлического пресса при температуре 95-200 °С. Схема контактного нагрева склеиваемой древесины представлена на рис. 1.3 [18].



Рис. 1.3. Схема контактного нагрева древесины.

1 – нагретые плиты пресса; 2 – склеиваемая древесина; К – краевая зона; С – срединная зона; Ц. С. П. – центральное сечение

Градиент температур между приповерхностной зоной, контактирующей с плитами и центральным сечением пакета обуславливает перераспределение влаги по толщине: парожидкостные потоки перемещаются из нагретых областей к более холодным, а рост массовой доли клея в шве дополнительно повышает теплопроводность [29].

При контактном нагреве следует учитывать коэффициент теплопроводности древесины λ , Вт/(м °С). Он показывает количество теплоты, которое проходит в секунду через стенку из древесины площадью 1 м², толщиной 1 м при разности температур на противоположных сторонах стенки 1 °С. Зависит от породы древесины, влажности, температуры, плотности, структурного направления.

Коэффициент теплопроводности λ древесной породы определяется по формуле:

$$\lambda = \lambda_t \cdot K_p \cdot K_x, \quad (1.1)$$

где λ_t – коэффициент теплопроводности, определенный по диаграмме, по заданной влажности и средней температуре древесной породы;

K_p – коэффициент, учитывающий влияние плотности, определяется по таблице с учетом базисной плотности породы;

K_x – коэффициент, учитывающий структурное направление (радиальное, тангенциальное, вдоль волокон).

При увеличении плотности и влажности древесины ее теплопроводность возрастает вдоль и поперек волокон древесины. Например, при положительных температурах и влажности 20%, максимальная теплопроводность древесины плотностью 400 кг/м³ будет равна 0,438 Вт/(м °С).

В объеме древесины происходит интенсивное парообразование. Температура нагревателей при контактном нагреве обычно превышает 100 °С. Пар, перемещаясь внутри заготовок, начинает конденсироваться. Внутренние слои склеиваемого материала увлажняются, а находящиеся ближе к нагревателям – теряют влагу.

При увеличении давления насыщенного водяного пара он перемещается из приповерхностной зоны склеиваемого пакета, формируя по периметру древесины участок А-А (рис. 1.3), ширина которого прямо пропорциональна паропроводности пресса. Выход пара способствует

уменьшению влажности древесины. По завершению цикла прессования снимают внешнее давление на склеиваемые заготовки [18].

Контактный подвод тепла обуславливает неоднородное распределение температур как по толщине, так и по площади контакта, вследствие чего наблюдается различное время отверждения клеевого шва. Длительное выдержка полимеризованного клеевого слоя в зоне повышенных температур способствует накоплению остаточных термических напряжений, приводящих к ослаблению соединения.

Конвективный способ нагрева применяют для интенсификации процесса склеивания массивных деталей из древесины. Заготовки помещают в камеру с циркуляцией нагретой паровоздушной смеси. Перенос тепла к поверхности осуществляется потоками, движущимися естественной либо принудительной циркуляцией.

Рабочей средой служит воздух, нагретый до 70 °С и непрерывно циркулирующий камере, с помещенными склеиваемыми заготовками. Превышение температурного предела, приводит к разрушению древесины отвердителями клеев, применяемыми для холодного склеивания.

Конвективный способ теплообмена обеспечивает прогрев наружных зон склеиваемых изделий. Вследствие чего прогрев и полимеризация клеевого шва происходит с запаздыванием. Окончательная полимеризация клеевого соединения происходит при дальнейшей выдержке конструкции при температуре окружающей среды.

Преимущество метода заключается в технологической простоте и сокращении времени нахождения изделия под прессом примерно в 4–6 раз относительно холодного способа склеивания. При этом скорость склеивания в достаточной степени определяется размерами сечений склеиваемых заготовок [18, 29].

Недостатком такого способа склеивания является неравномерность нагрева склеиваемого материала, в результате чего более интенсивно нагреваются его наружные поверхности.

Способ нагрева инфракрасным (ИК) излучением. При инфракрасном излучении тепло передаётся лучами с длиной волны 10^{-4} – 10^{-6} м, способными передавать энергию от горячего тела к холодному. При проникновении в поверхность древесины на глубину до 2-3 мм, в этой зоне создаётся равномерное распределение температуры. ИК-диапазон (0,75–750 мкм) расположен между видимой и радиочастотной областями. Инфракрасное излучение частично поглощается древесиной, разогревая ее наружные поверхности [18].

Используется для нагрева тонколистовых материалов, обеспечивая быстрый прогрев зоны контакта и ускоренную полимеризацию клея. Транспортная прочность клеевого соединения достигается за 10-20 мин. Для крупномерных деталей, требующих равномерного прогрева по всей площади контакта данный способ не применяется.

Способ нагрева клеевого слоя электрическим током. Способ нагрева клеевого шва основан на использовании тепла, которое выделяется при прохождении электрического тока через токопроводящий клеевой слой. Для обеспечения активного сопротивления клеевого слоя в него в качестве проводника электрического тока вводят графит – электропроводящий наполнитель с содержанием углерода 98%.

Волокна графита равномерно распределяются в процессе перемешивания, хорошо контактируют друг с другом. Таким образом, клеевой слой становится токопроводником. Температура нагрева в зависимости от силы тока достигает 200 - 250 °C [18, 29].

Схема нагрева клеевого шва представлена на рис. 1.4. При помощи плоских электродов электрический ток подводится к клеевому слою, при напряжении 220-380 В. Контакт клея с электродами обеспечивается через

избыточный клей, выходящий из клеевого соединения при сдавливании склеиваемого материала. Процесс полимеризации ускоряется в 20-40 раз.

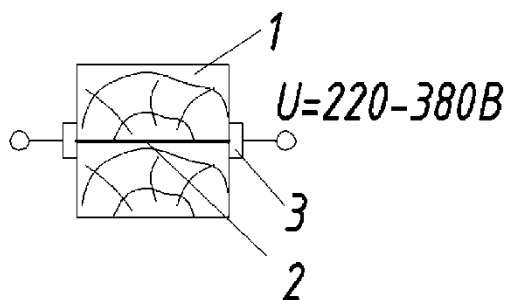


Рис. 1.4. Схема нагрева клеевого слоя.

1 – склеиваемая заготовка; 2 – клеевой шов; 3 – электрод

Данный способ нагрева достаточно сложен в применении, ограничен требованиями техники безопасности.

Способ нагрева в поле токов высокой частоты (ТВЧ). Нагрев клеевого соединения в поле токов высокой частоты (ТВЧ) реализуют путем помещения пакета между обкладками конденсатора, к которым подключается генератор ТВЧ. Созданное электромагнитное поле одновременно воздействует на макромолекулы древесины и полимерной композиции.

Полярные группы молекул колеблются в такт изменению поля, их взаимное трение вызывает рассеяние энергии и превращение ее в тепло. Чем больше содержание связанной влаги, тем быстрее материал нагревается в поле ТВЧ (табл.1.3) [18].

Таблица 1.3

Диэлектрические свойства материалов

Материал	Тангенс угла потерь $\text{tg}\delta$	Относительная диэлектрическая проницаемость ϵ
Древесина влажностью 8-10%	0,05-0,07	4
Жидкий синтетический клей	0,5-0,8	25-60
Сухой отверждённый клей	0,07-0,1	3-6

Для достижения наибольшей интенсивности нагрева клеевого слоя в склеиваемой заготовке, его размещают между пластинами конденсатора таким образом, чтобы силовые линии электромагнитного поля были направлены вдоль плоскости клеевых слоёв (рис.1.5).

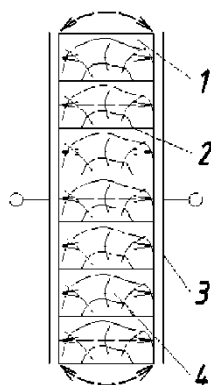


Рис. 1.5. Схема нагрева пакета в электрическом поле ТВЧ.

1 — склеиваемые заготовки; 2 — клеевые слои; 3 — пластины конденсатора;
4 — силовые линии электромагнитного поля

Интенсификация процесса склеивания достигается за счет увеличения частоты электрического поля. При частоте поля 20 МГц температура шва увеличивается до 160 °С за 15 секунд. Тогда как при частоте 10 МГц она достигает лишь 110 °С за то же время. Нижний предел частоты находится в районе 3-5 МГц, а верхний ограничивается допустимой неравномерностью нагрева склеиваемого материала [18].

К преимуществам нагрева в поле ТВЧ относятся: равномерный нагрев древесины по всему объему и избирательность нагрева. Недостатками являются: сложность и энергоёмкость оборудования, а также необходимость тщательного экранирования рабочей зоны расположения электродов.

Нагрев в поле токов сверхвысокой частоты (СВЧ). Под СВЧ нагревом понимают процесс, в котором энергия до 300 ГГц проникает в нагреваемый материал в виде электромагнитной волны и преобразуется в тепло. Нагрев производится в направлении от поверхности к центру за счет теплопроводности материала.

Преобразование электромагнитной энергии в тепловую зависит от материала, температуры и частоты. Происходит равномерное выделение тепла по всему объему. Эффективность преобразования энергии электрического поля в тепло возрастает прямо пропорционально частоте колебаний. С увеличением частоты электромагнитных колебаний, уменьшается глубина проникновения волн в нагреваемую древесину.

Достоинством СВЧ нагрева является: высокий КПД преобразования энергии, тепловая безинерционность, возможность применения равномерного и избирательного нагрева.

К недостаткам можно отнести: нагрев заготовок токами сверхвысокой частоты осуществляются в специальных энергоемких, сложных по конструкции установках, способ ограничен требованиями техники безопасности. При этом такой нагрев клеевого соединения оказывает деструктивное воздействие на древесину кислот и щелочей клеевой композиции.

Индукционный нагрев. Представляет интерес 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. Патент №RU2715840 «Способ склеивания древесины» [116].

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.

Склеиваемая древесина, содержащая в клеевой композиции ферромагнитный наполнитель, помещается внутри индуктора. Переменное магнитное поле индуктора вызывает появление в ферромагнитном материале наполнителя индукционного тока, в результате чего он нагревается. Нагрев клеевой композиции происходит равномерно. Температура нагрева и распределение ее внутри клеевого шва зависят от времени нагрева и энергии, переданной ферромагнитному наполнителю за это время (рис.1.6).

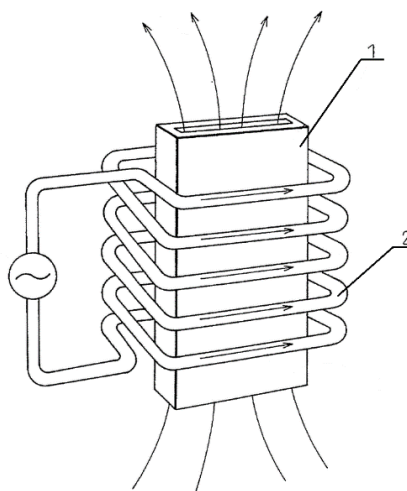


Рис. 1.6. Схема индукционного нагрева

1 – нагреваемая заготовка; 2 – спиральный индуктор

Основное достоинство индукционного нагрева заключается в передаче энергии от источника к нагреваемому телу с помощью электромагнитного поля.

Другой особенностью индукционного нагрева является зависимость глубины проникновения электромагнитной энергии в материал от его электромагнитных характеристик и частоты питающего индуктор тока.

Индукционный нагрев дает возможность интенсифицировать процесс склеивания древесины при меньшем энергопотреблении, высоком качестве клеевого соединения, без потерь теплоты в древесине. Достаточно хорошо изучен и используется в металлообработке, однако в технологии склеивания древесины не применялся.

Совершенствование процесса склеивания древесины бесконтактным индукционным нагревом клеевой композиции с ферромагнитным наполнителем актуально, представляет научно-практический интерес и является предметом наших исследований.

В результате проведенного анализа установлено что:

1. Горячее склеивание является основным видом промышленного склеивания древесины. Обладает преимуществами и недостатками. Основной недостаток горячего склеивания заключается в том, что невозможно обеспечить равномерный нагрев клеевого шва в склеиваемой древесине. Имеются многочисленные исследования, однако надежного способа полимеризации клеевой композиции в шве не установлено.

2. Рассмотренные способы склеивания древесины состоят в том, что тепловое воздействие на клеевую композицию осуществляют через теплоотдачу, неравномерно. В связи с этим представляет интерес непосредственно нагрев клеевого шва без промежуточного нагрева древесины.

3. Индукционный нагрев, обладающий рядом достоинств, практически не применяется при производстве клееных изделий из древесины. Существующие способы нагрева клеевого шва не обеспечивают одновременно надежного и быстрого склеивания деревянных конструкций. Необходим поиск новых технических решений совершенствования горячего способа склеивания.

1.6 Цель и задачи исследования

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

Для достижения цели определены **задачи**:

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.

2 ИНДУКЦИОННЫЙ НАГРЕВ ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

При расчете нагрева ферромагнитных материалов необходимо знать факторы, влияющие на интенсивность процесса. Определяющим фактором, является вид ферромагнитного наполнителя вводимый в клеевую композицию. При индукционном воздействии, ферромагнитный наполнитель равномерно нагревается совместно с массой композиции и ускоряет процесс полимеризации клеевого шва.

2.1 Индукционный нагрев мелкодисперсных ферромагнитных материалов

В теории и практике индукционного нагрева применяются различные методы расчета: аналитические, численные и инженерные.

Аналитические методы расчета основываются на анализе физических закономерностей электромагнитной индукции и на явлениях, при помощи которых энергия передается волнами электромагнитного поля в нагреваемую среду [3]. В связи с этим сделаны основополагающие выводы о влиянии на нагрев поверхностного и кольцевого эффекта.

Недостатками аналитических методов расчета являются: сложность применяемого математического аппарата, трудности, связанные с учетом зависимостей в системе «индуктор – нагреваемый ферромагнитный наполнитель». Эта задача решается при помощи программного обеспечения, что, в конечном счете, способствует простоте их применения. Наибольшее распространение получили программы полевого моделирования, основанные на методе конечных элементов: ANSYS, Comsol Multiphysics, в основе которых находятся эффективные вычислительные алгоритмы [113]. При помощи программ можно производить расчет в статике и динамике электромагнитных и тепловых полей. При этом необходимо отметить, что

программы не ориентированы на рассмотрение процессов в динамике нагрева с учетом реальных характеристик источника питания.

При проектировании индуктора и установленных технологических параметров установки, в основе методов расчета включены схемы замещения с вносимым в электрическую цепь индуктора сопротивлением [83, 89, 93].

При склеивании клеевой композицией, в которую включены ферромагнитные материалы необходимо учитывать кольцевой эффект. Кольцевой эффект является разновидностью поверхностного эффекта. Он объясняется асимметрией магнитного поля витка или соленоида. Во внутренней полости магнитное поле значительно сильнее, чем снаружи, вследствие чего главная часть электромагнитной энергии поступает в проводник изнутри (рис. 2.1). Кольцевой эффект повышает активное сопротивление проводников.

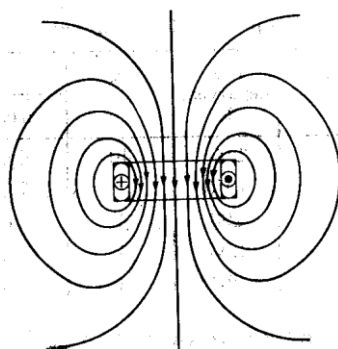


Рис. 2.1 Магнитное поле индуктора

Мерой проявления кольцевого эффекта принимается глубина проникновения тока Δ , величина которой зависит от частоты первичного тока и физических свойств нагреваемого объекта [89].

$$\Delta = \frac{1}{k} \sqrt{\frac{2}{\omega \mu_0 \mu \sigma}} = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega \mu_0 \mu}} = 503 \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}}, \quad (2.1)$$

где $k = \sqrt{\frac{\omega \sigma \mu}{2}}$ – интенсивность затухания электромагнитной волны при ее движении в материале изделия;

$\omega = 2\pi f$ – угловая частота изменения магнитной и электрической напряженности во времени;

σ – электрическая проводимость материала изделия;

ρ – удельное электрическое сопротивление материала изделия;

μ – относительная магнитная проницаемость материала изделия;

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ – магнитная проницаемость вакуума;

f – частота тока в индукторе.

В нашем случае глубина проникновения тока в ферромагнитный наполнитель принимается равной толщине клеевого слоя, в котором сосредоточено 60% полного тока и выделяется 85% мощности [82]. Это явление имеет существенное значение при индукционном нагреве, на котором основываются существующие методики выбора тепловых расчетов. При этом допускается, что вся тепловая энергия выделяется в пределах клеевого шва, глубина которого соответствует глубине проникновения тока [93].

Существующие методики расчета тепловых и электромагнитных полей [83, 89, 93], основываются на усредненных значениях параметров, характеризующих свойства нагреваемого ферромагнитного материала в клеевой композиции.

К основным параметрам, которые характеризуют физические свойства нагреваемых ферромагнитных наполнителей относятся: удельное электрическое сопротивление, магнитная проницаемость, теплоемкость, теплопроводность. Эти параметры взаимосвязаны и зависят от температуры, что оказывает большое влияние на процесс нагрева клеевого шва. Например, удельное сопротивление, которое возрастает в процессе нагрева, приводит к изменению активного сопротивления ферромагнитного наполнителя, и, следовательно, выделяемой мощности. Теплоемкость, также зависящая от

температуры, оказывает влияние на теплосодержание массы нагреваемого ферромагнитного наполнителя. Теплопроводность характеризует скорость нагрева глубинных слоев материала. Магнитная проницаемость влияет на характер распределения тока по глубине ферромагнитного наполнителя.

Таким образом, применение индукционного нагрева для склеивания древесины ферромагнитной клеевой композицией, требует уточнения методик расчета с учетом параметров и характеристик установки.

Применение усредненных значений выделяемой в клеевом шве теплоты, которая осуществляет его нагрев, на участке, соответствующем расчетной глубине проникновения тока [85, 93], может привести к значительным неточностям в расчетах. Это обусловлено существенным изменением в процессе индукционного нагрева исследуемого параметра в пределах рассматриваемого слоя, в результате изменения электрического сопротивления и магнитной проницаемости. Так же, в процессе нагрева изменяются теплофизические свойства ферромагнитного наполнителя (теплоемкость и теплопроводность), влияющие на процесс теплопередачи.

Применяющиеся в настоящее время компьютерные технологии расчета, позволяют устранить указанные недостатки. Интерес представляет метод структурного моделирования, основанный на разделении сложного для оценки объекта исследования на отдельные простые функциональные блоки, достаточно точно описанные математическими выражениями.

Инженерные методы расчета применяют с учетом толщины слоя ферромагнитного наполнителя, соответствующей глубине проникновения тока. Происходящие процессы расширяют зону нагрева клеевой композиции с ферромагнитным наполнителем за счет теплопроводности. В отдельных случаях, глубина проникновения тока, в клеевое соединение с ферромагнитным наполнителем, может изменяться по величине более чем на порядок. Поэтому целесообразно исследовать температурные процессы,

происходящие при применении индукционного нагрева на отдельные характеризующие электротехнологию слои [36].

При исследовании процесса нагрева на малых глубинах проникновения тока, данный метод позволяет исследовать динамику процесса нагрева. При этом вычислительная ошибка значительно уменьшается за счет учета токов, которые протекают в глубинных слоях. В соответствии с [85] величина греющего тока, протекающего в пределах поверхностного слоя, в $\sqrt{2}$ раз меньшего его значения на поверхности

$$J_{\Delta} = \frac{J_{me}}{\sqrt{2}}, \quad (2.2)$$

а за его пределами отсутствует. Кроме этого, существенным может оказаться влияние тока, сконцентрированного в глубинных слоях.

По результатам разведывательных опытов для каждого из пяти ферромагнитных наполнителей, вводимых в различные клеевые композиции, выполнен регрессионный анализ. В качестве уравнения регрессии взята двухфакторная математическая модель:

$$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 \quad (2.3)$$

где y – зависимая переменная (время нагрева);

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

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

Для каждого наполнителя построена отдельная математическая модель, которая показывает, как изменяется время нагрева ферромагнитного наполнителя при изменении температуры и дисперсности.

Чтобы понять особенности нагрева каждого наполнителя, необходимо оценить общую тенденцию для всех наполнителей вместе. Для этого построена единая математическая модель, куда включили третий фактор (вид наполнителя) через фиктивные переменные.

Для 5 наполнителей используют $5-1 = 4$ фиктивных 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:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{31} * D_1 + b_{32} * D_2 + b_{33} * D_3 + b_{34} * D_4 \quad (2.4)$$

где b_0 – среднее время нагрева для базового наполнителя.

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

Используя полученную модель можно определить за какое время нагреется наполнитель при известных температуре и дисперсности, что позволит оптимизировать процесс нагрева при склеивании древесины (рис. 2.2).

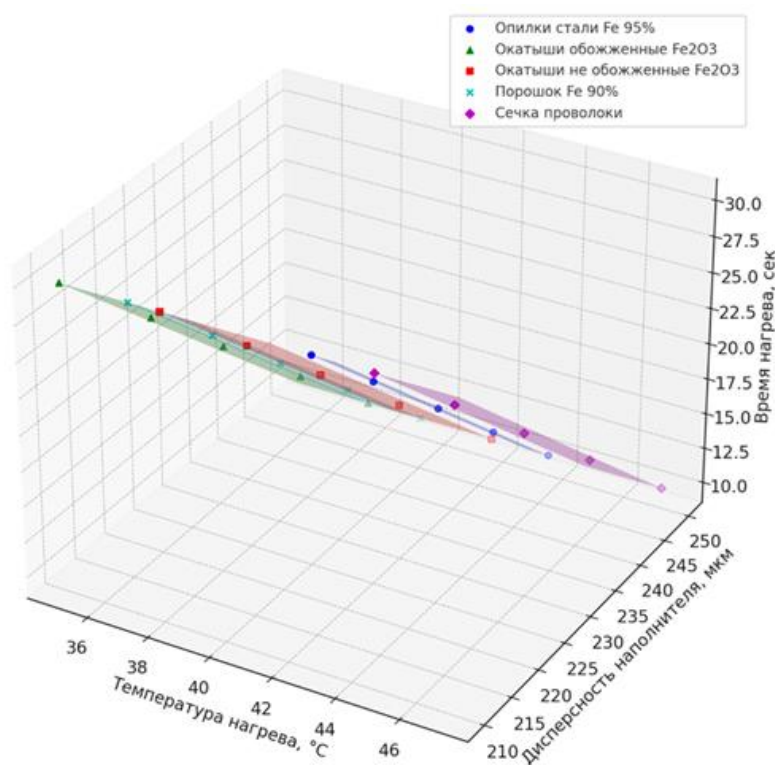


Рис. 2.2 Регрессионные модели времени нагрева ферромагнитных наполнителей

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

$$a = (F^T F)^{-1} F^T y. \quad (2.5)$$

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

$$S_y^2 = \frac{1}{n-m} \sum_{i=1}^n (y_i - f_a(x_i))^2. \quad (2.6)$$

где двухфакторная модель имеет вид:

$$f_a(x_i) = a_0 + a_1 x_{1i} + a_2 x_{2i}. \quad (2.7)$$

Значимость коэффициентов оценивается по формуле:

$$T_i = \frac{a_i}{\sqrt{S_y^2 \cdot c_{ii}}}. \quad (2.8)$$

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

Проверка адекватности модели по критерию Фишера осуществляется по формуле:

$$F = \frac{Q_n}{n-m} : \frac{\sum_{i=1}^n (r_i - 1)}{q_p} < F_{кр}. \quad (2.9)$$

В результате получена двухфакторная регрессионная модель для каждого из пяти видов ферромагнитных наполнителей, вводимых в клеевую композицию:

$$f = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2. \quad (2.10)$$

где x_1 – температура нагрева ферромагнитного наполнителя;

x_2 – дисперсность ферромагнитного наполнителя;

f – время нагрева ферромагнитного наполнителя.

На основании построенной модели можно графически представить данные в виде плоскостей, характеризующих зависимость времени нагрева ферромагнитных наполнителей от температуры нагрева и дисперсности.

Полученные модели позволяют определить оптимальные условия (температуру и дисперсность) ферромагнитных наполнителей, обеспечивающие минимальное время нагрева. Для определения минимального времени нагрева (точки минимума) проводится анализ полученной модели с помощью частных производных по каждому фактору с последующим решением системы уравнений:

$$\frac{df}{dx_1} = a_1 = 0, \quad \frac{df}{dx_2} = a_2 = 0. \quad (2.11)$$

После нахождения оптимальных значений факторов рассчитывается минимальное значение функции времени нагрева $f_{\min}$, соответствующее найденным оптимальным условиям.

2.2 Математическая модель процесса бесконтактного индукционного нагрева ферромагнитного наполнителя в клеевой композиции для склеивания древесины

Математическая модель температурных процессов нагреваемого клеевого шва строится на примере прямоугольных заготовок, помещенных внутри индуктора цилиндрической формы (рис. 2.3).

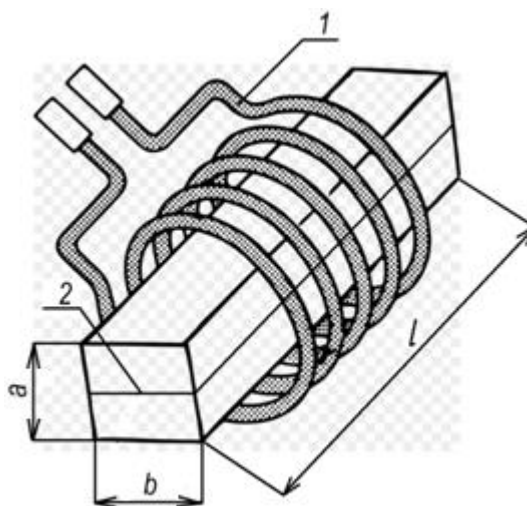


Рис. 2.3 Эскиз пространственной модели нагрева клеевого шва с ферромагнитным наполнителем цилиндрическим индуктором:
1 – индуктор; 2 – клеевой шов; l – длина; b – ширина; a – высота

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

$$dQ_n = RI^2 dt, \quad (2.12)$$

где R – сопротивление изделия, по которому протекает переменный по величине электрический ток I .

Сопротивление ферромагнитного наполнителя определяется геометрическими размерами и физическими свойствами материала:

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (2.13)$$

где ρ – удельное сопротивление материала изделия;

l – длина клеевого шва;

S – площадь поперечного сечения клеевого шва.

Вследствие ярко выраженной температурной зависимости удельного электрического сопротивления, данный параметр является одним из основных показателей, характеризующий режима нагрева.

Приближенные линейные зависимости удельного электрического сопротивления от температуры. Они основаны на введении понятия температурный коэффициент сопротивления, который характеризует интенсивность изменения удельного сопротивления под воздействием температуры.

Зависимость удельного электрического сопротивления от температуры имеет вид:

$$\rho = \rho_{20}(1 + \alpha_1(T_2 - T_1)), \quad (2.14)$$

где ρ_{20} – удельное электрическое сопротивление при температуре 20 °С;

α_1 – температурный коэффициент сопротивления материала ферромагнитного наполнителя;

T_1, T_2 – начальное (20 °С) и текущее значение температуры нагрева.

Количество тепла, передаваемое нагретым изделием в окружающую среду dQ_n , определяется в соответствии с выражением:

$$dQ_n = \alpha S_0(T - T_0)dt, \quad (2.15)$$

где α – коэффициент теплоотдачи в окружающую среду;

S_0 – площадь склеиваемого изделия;

T_0 – температура окружающей среды, °С.

Коэффициент теплоотдачи, нелинейно зависящей от температуры, включает в себя конвективную и радиационную (лучистую) составляющие:

$$\alpha = \alpha_k + \alpha_p. \quad (2.16)$$

Конвективная составляющая коэффициента теплоотдачи через древесину в соответствии с [112] описывается выражением:

$$\alpha_k = 1,86 \sqrt[4]{T - T_0}. \quad (2.17)$$

Радиационная составляющая коэффициента теплоотдачи:

$$\alpha_p = C_0 \varepsilon_k \frac{\left(\frac{T+273,15}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_0+273,15}{100}\right)^4}{T - T_0}, \quad (2.18)$$

где C_0 – излучающая способность абсолютно черного тела;

ε_k – коэффициент теплового излучения, зависящий от материала (для стали $\varepsilon_k=0,8$).

Тепловая энергия $dQ_z = dQ_n - dQ_n$, оставшаяся в клеевом шве и в древесине, повышает его температуру

$$dQ_r = mCdT. \quad (2.19)$$

где m – масса ферромагнитного наполнителя;

C – теплоемкость ферромагнитного наполнителя.

Преобразование по Карсону-Хевисайду [6] и совмещенные уравнения (2.12), (2.15), (2.19), имеют в операторной форме вид:

$$T = (RI^2 - \alpha S_0(T - T_0)) \frac{1}{mCp}, \quad (2.20)$$

где $p = \alpha + j\beta$ – комплексная переменная.

Структурная схема математической модели нагрева клеевого шва с ферромагнитным наполнителем индукционным способом представлена на рис. 2.4.

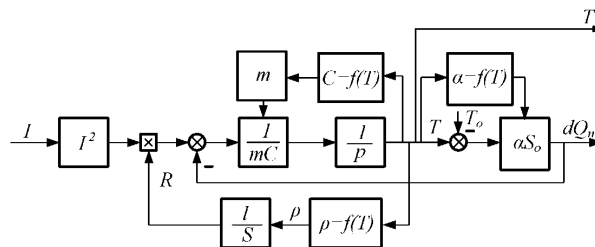


Рис. 2.4 Структурная схема математической модели нагрева клеевого шва индукционным способом

Для проверки модели на адекватность проведены экспериментальные исследования.

3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА БЕСКОНТАКТНОГО ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА ФЕРРОМАГНИТНОЙ КЛЕЕВОЙ КОМПОЗИЦИИ ДЛЯ СКЛЕИВАНИЯ ДРЕВЕСИНЫ

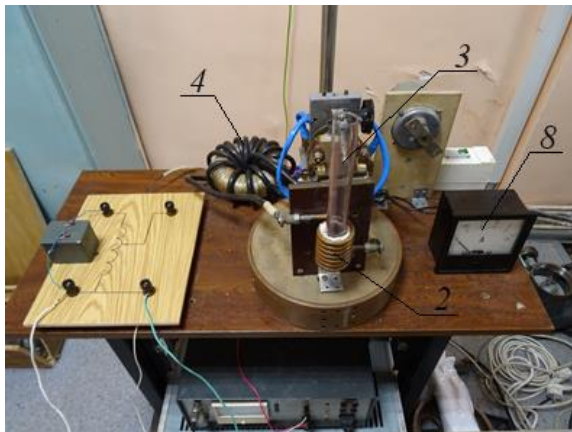
Программа экспериментальных исследований:

- экспериментальная установка;
- выбор ферромагнитного наполнителя;
- определение тепловых характеристик ферромагнитных наполнителей;
- определение температуры термодинамического равновесия клеевых композиций с ферромагнитным наполнителем;
- план эксперимента, методическая сетка опытов;
- подготовка экспериментальных образцов древесины для склеивания;
- определение прочностных характеристик клеевого соединения древесины;
- статистическая обработка результатов эксперимента в программе «Microsoft Excel»
- построение матрицы факторов для каждого сочетания, вводимого в клей ферромагнитного наполнителя, получение уравнений регрессии, проверка статистической значимости коэффициентов регрессии по критерию Стьюдента, проверка адекватности полученных уравнений по критерию Фишера.

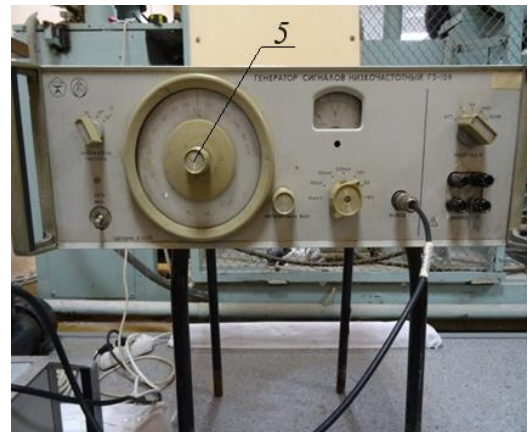
3.1 Экспериментальная установка

Установка предназначена для бесконтактного индукционного нагрева ферромагнитного наполнителя клеевой композиции. В состав установки входят: индуктор, генератор, высокочастотный усилитель, катушка индуктивности, контрольно-измерительные приборы. Аппаратурное сопровождение измерений позволяет регистрировать информацию в непрерывном режиме. Общий вид экспериментальной установки представлен на рис. 3.1.

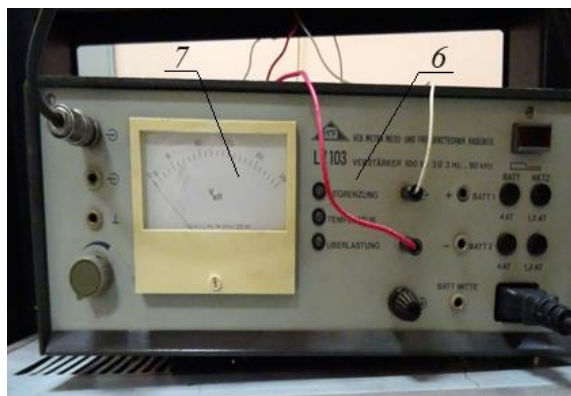
Определены граничные условия частоты и величины тока, температуры нагрева ферромагнитного материала.



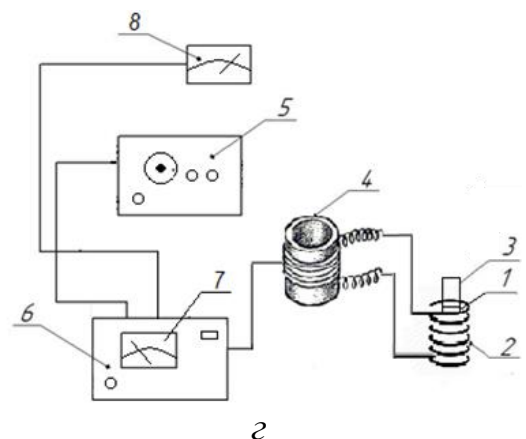
а



б



в



г

Рис. 3.1 Экспериментальная установка

При проведении опытов навеска ферромагнитного наполнителя 1 массой 20 гр. помещается в индуктор 2, производится нагрев в

электромагнитном поле индуктора и определяется температура нагрева (рис. 3.1, з). Опыты по склеиванию проводили на образцах шпона из древесины березы по ГОСТ 33120-2014, которые помещали в индуктор и фиксировали клиновым замком. В катушке индуктивности 4 создается электромагнитное поле, в которое помещены образцы древесины с клеевой композицией с ферромагнитным наполнителем.

В генераторе 5 устанавливают значение частоты тока. Высокочастотный усилитель 6 обеспечивает требуемую мощность нагрева ферромагнитного наполнителя. Частота тока 3-10 кГц, которая осуществляется подбором конденсаторов.

Технические характеристики:

1. Источник питания ГЗ-109 (Г). Частота тока 3 – 10 кГц; напряжение $U = 220$ В.

2. Усилитель мощности LV-103 (У); напряжение $U = 100$ В.

3. Нагрузочный трансформатор (НТ). Коэффициент трансформации по току $K_T = 60$; ток $I = 1$ А.

4. Регулируемый блок емкостей МППП, 500 В и СВВ, 630 В; емкость 0,22 мкФ.

5. Индуктор катушечного типа (ЛИ). Число витков в катушке $\omega = 7$; диаметр провода 6 мм; $N=100$ Вт.

6. Температура нагрева 303 - 473 К.

Электрическая схема экспериментальной установки представлена на рис. 3.2.

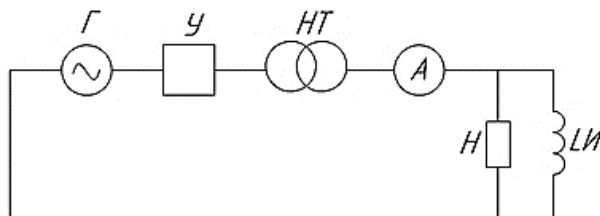


Рис. 3.2 Электрическая схема экспериментальной установки:

Г – источник питания ГЗ-109; У – усилитель мощности LV-103;

НТ – нагрузочный трансформатор; Н- нагрузка;

ЛИ – индуктор катушечного типа; А – амперметр

Нагрев ферромагнитного наполнителя производится путем трансформации электрической энергии в высокочастотное магнитное поле высокой мощности. Наводятся вихревые токи (токи Фуко), которые вызывают нагрев ферромагнитного наполнителя. Опыты проводили в индукторе (рис. 3.3).

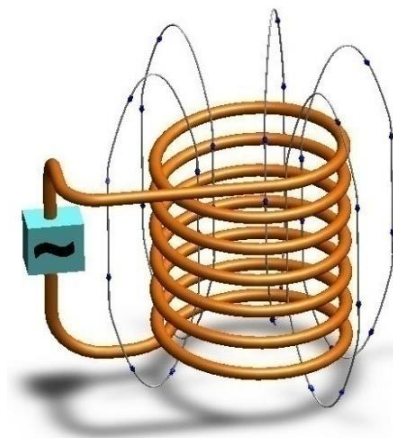


Рис. 3.3 Распределение силовых линий магнитного поля в индукторе

Проанализированы различные виды индукторов. Для проведения работ по склеиванию изделий из древесины выбран цилиндрический индуктор (рис. 3.4, а), обеспечивающий равномерный прогрев клеевого шва и позволяющий сократить время полимеризации клеевой композиции с ферромагнитным наполнителем.

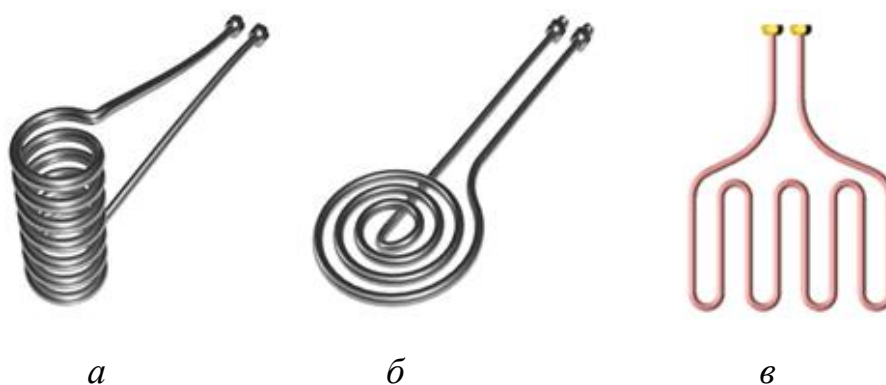


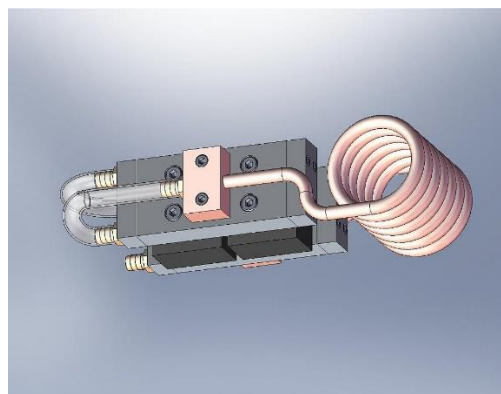
Рис. 3.4 Формы индукторов:

а – цилиндрический; б – спиралевидный; в – плоский

Для снятия характеристик индукционного нагрева изготовлен индуктор цилиндрической формы (рис. 3.5).



а



б



в

Рис. 3.5 Экспериментальный индуктор
а – индуктор; б – 3-D модель индуктора;
в – теплоизоляция индуктора

Для предотвращения теплового радиационного воздействия поверхности витков индуктора теплоизолировали асбестом (рис. 3.5, в).

Установили мощность индуктора в зависимости от изменения частотных характеристик тока. Определили граничные значения частоты тока индуктора.

Выходные параметры регистрировали по показаниям вольтметра 7 и амперметра 8, определяли подводимую мощность индукционной установки (рис. 3.1):

$$P = UI, \quad (3.1)$$

где P – подведенная мощность;

U – напряжение;

I – сила тока.

Требуемая мощность индукционной установки обеспечивалась подбором оптимальной емкости конденсаторов. Проведен расчет и выбор оптимальной емкости конденсаторов для интервала частот 3 – 10 кГц.

Расчет емкости конденсаторов:

$$L = \frac{1}{\omega^2 c}, \quad (3.2)$$

где L – индуктивность;

ω – циклическая частота протекающего тока;

c – емкость конденсатора.

$$\omega = 2\pi f, \quad (3.3)$$

где f – частота колебаний тока;

$$c = \frac{1}{\omega^2 L}, \quad (3.4)$$

Для получения максимальной мощности установили частоту тока 7 кГц, емкость конденсаторов 0,25 мкФ (рис. 3.6).

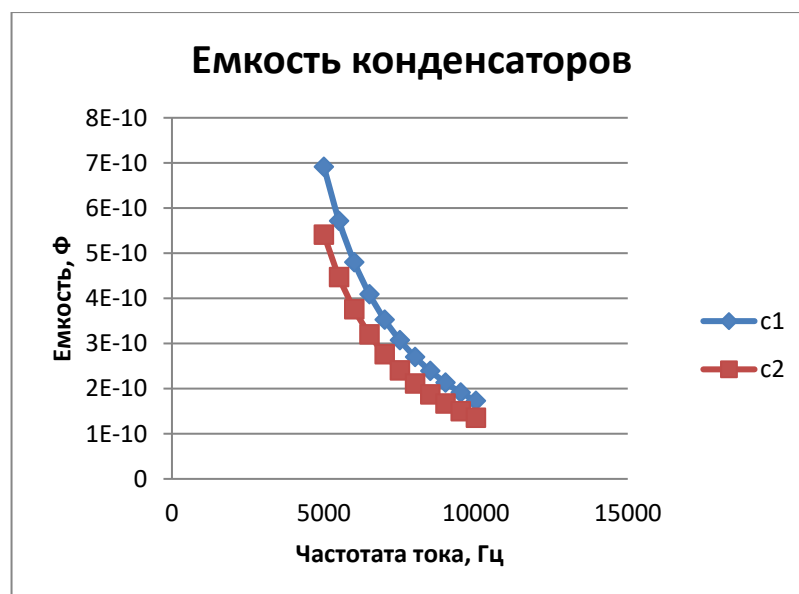


Рис. 3.6 Определение напряженности электромагнитного поля

При работе установки с определенной частотой применены бумажные конденсаторы МПГП, 500 В (рис. 3.7, а) и керамические конденсаторы СВВ, 630 В (рис. 3.7, б). При подборе емкости, производили последовательное и параллельное соединение конденсаторов в цепи переменного тока. Выбранная емкость конденсаторов при работе индукционной установки обеспечивает надежный нагрев ферромагнитного наполнителя в клеевой композиции.



а



б

Рис. 3.7 Конденсаторы

а – бумажные; б – керамические

Степень нагрева ферромагнитного наполнителя определяли в диапазоне частот 5,3 кГц – 10 кГц (таб. 3.1).

Таблица 3.1

Частоты тока индукционного нагрева ферромагнитного наполнителя

Ферромагнитный наполнитель	Время нагрева	Частота тока				
		5,3 кГц	7 кГц	8,5 кГц	9,2 кГц	10 кГц
ферромагнитные опилки	15, 30 сек	5,3 кГц	7 кГц	8,5 кГц	9,2 кГц	10 кГц
окатыши обожженные	15, 30 сек	5,3 кГц	7 кГц	8,5 кГц	9,2 кГц	10 кГц
окатыши не обожженные	15, 30 сек	5,3 кГц	7 кГц	8,5 кГц	9,2 кГц	10 кГц
порошок ферромагнитный	15, 30 сек	5,3 кГц	7 кГц	8,5 кГц	9,2 кГц	10 кГц
ферромагнитная сечка	15, 30 сек	5,3 кГц	7 кГц	8,5 кГц	9,2 кГц	10 кГц

3.2 Ферромагнитные наполнители клеевой композиции

Использовали ферромагнитные наполнители: порошок ферромагнитный Fe 90%; ферромагнитные опилки из стали Fe 95%; измельченные окатыши обожженные Fe_2O_3 , не обожженные Fe_2O_3 , применяемые в металлургической промышленности; ферромагнитная сечка из стальной проволоки. Окатыши – гранулированный рудный концентрат, продукт обогащения железной руды и последующего окомковывания и обжига (рис. 3.8).

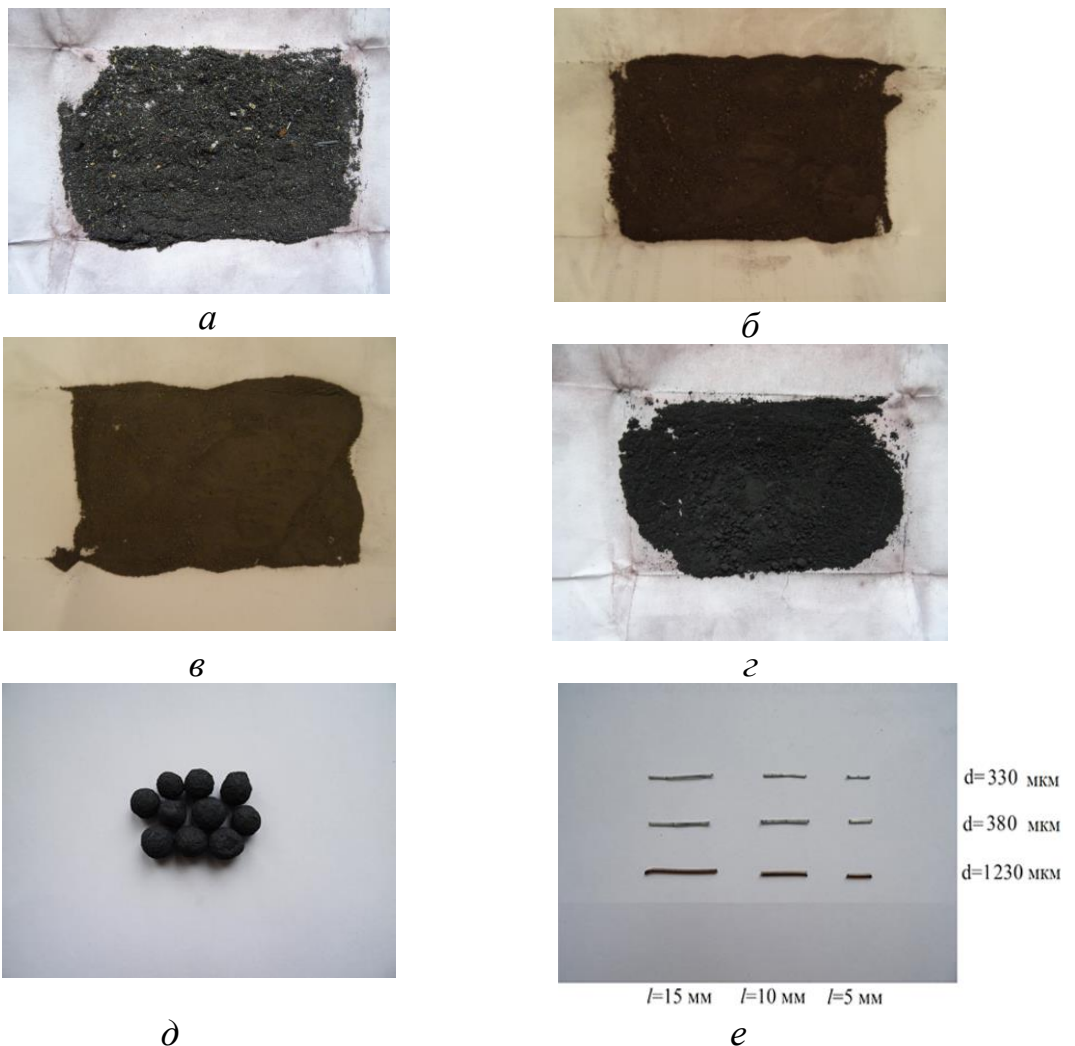


Рис. 3.8 Ферромагнитные наполнители

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

Измельчали окатыши до однородного фракционного состава 250 мкм. Мелкодисперсный ферромагнитный наполнитель содержит Fe 65 – 70 %.

Гранулометрический состав ферромагнитного материала определяли путем просеивания его через ряд сит. Использовали набор лабораторных сит с размерами ячеек сетки 1,25-0,071 мм (рис. 3.9).



Рис. 3.9 Сита лабораторные с размерами ячеек сетки 0,63-0,14 мм

Для определения температуры нагрева цельнотельного ферромагнитного материала подготовили сечку из стальной проволоки $d=300 \div 1230$ мкм, $l=5 \div 15$ мм.

Далее осуществляли нагревание ферромагнитного наполнителя с фиксацией температурных и массовых характеристик. Методическая сетка опытов представлена в таб. 3.2.

Методическая сетка опытов нагрева ферромагнитных наполнителей

Таблица 3.2

Методическая сетка опытов нагрева ферромагнитных наполнителей

№	Наименование фактора	Обозначение	Единица	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	°C	25-70
2	Продолжительность нагрева	τ	сек	5-60

Принято шесть проб. Проводили индукционный нагрев наполнителей из ферромагнитных опилок из стали Fe 95%, из окатышей обожженных Fe_2O_3 , не обожженных Fe_2O_3 , порошка ферромагнитного Fe 90%, ферромагнитной сечки из стальной проволоки. Продолжительность индукционного нагрева 120 сек. Величину тока фиксировали амперметром М903, температуру нагрева – термопарой ТХК(L). Регистрировали температуру термодинамического равновесия при нагреве ферромагнитных наполнителей.

3.3 Нагрев клеевой композиции с ферромагнитным наполнителем

На пластмассовую и стеклянную подложку наносили клеевую композицию с ферромагнитным наполнителем и помещали в индуктор. Фиксировали температуру нагрева ферромагнитного наполнителя в карбамидной (рис.3.10, *а, б*) и эпоксидной клеевой композиции (рис. 3.10, *в, г*).

*а**б**в**г*

Рис. 3.10 Нагрев ферромагнитных наполнителей в карбамидной и эпоксидной клеевой композиции

а – ферромагнитный порошок Fe 90%; *б* – ферромагнитная сечка;
в – ферромагнитный порошок; Fe 90%; *г* – ферромагнитная сечка

Использовали контактный и бесконтактный способы измерения температуры нагрева ферромагнитного наполнителя в клеевой композиции. При контактном способе, помещали щуп и термопару в клеевую композицию, производили фиксацию температуры до установившегося значения.

Для измерения температуры термодинамического равновесия применяли аппаратуру: лазерный бесконтактный цифровой пирометр Mastech MS6530B, термометр контактный цифровой ТК-5.06, мультиметр цифровой PeakMeter 8229 (рис. 3.11).

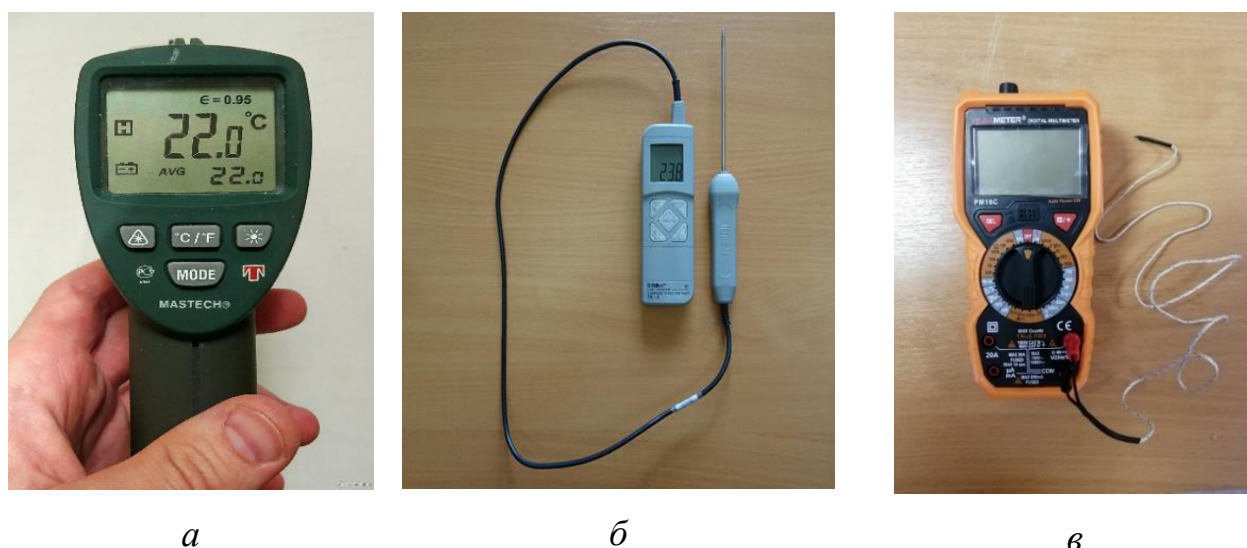


Рис. 3.11 Аппаратура для измерения температуры нагрева ферромагнитных наполнителей клеевой композиции

а – лазерный бесконтактный цифровой пирометр Mastech MS6530B;
б – термометр контактный цифровой ТК-5.06; *в* – мультиметр цифровой PeakMeter 8229

Лазерный бесконтактный цифровой пирометр Mastech MS6530B, позволяет проводить регистрацию температуры твердых и жидких тел на расстоянии. Измерение происходит с помощью лазерного луча, который наводится на объект измерения. В приборе предусмотрена подсветка

ЖК дисплея. Регистрацию параметров температурного режима производят в градусах С. Цифровой пирометр температуры имеет сертификат РосТеста (рис. 3.11, а).

Таблица 3.3

Характеристика универсального электронного пирометра

Характеристики	MastechMS6530B
Разрядность ЖК дисплея	888,8
Диапазон измерений температуры, °C	-20 - +537
Диапазон измерений температуры, °F	-4 - +999
Разрешающая способность	0.1°C / 0.1°F
Оптическое разрешение	12 : 1
Мощность излучения лазерного луча, мВт	< 0.1
Последовательный порт RS 232	Да
Питание	9В (тип 6F22, "Крона")
Сервис	Автоотключение питания Фиксация результатов измерений DATA HOLD Подсветка дисплея

На точность определения температуры t , которая регистрируется по показаниям электронного пирометра Mastech MS6530B, оказывает влияние коэффициент отражения, который учитывали для уменьшения погрешности измерений.

Термометр контактный цифровой ТК-5.06, предназначенный для измерения температуры различных сред, относительной влажности воздуха путем непосредственного контакта зонда с объектом измерения. Термометр состоит из электронного блока и сменных зондов. Применен термочувствительный элемент зонда с термоэлектрическими преобразователями по ГОСТ Р 8.585 (рис. 3.11, б).

Таблица 3.4

Характеристика термометра контактного цифрового ТК-5.06

Характеристики	ТК-5.06
Диапазон измеряемых температур, °C	от -199 до +1300
Относительная погрешность, %	$\pm 0,5$ +ед.мл.разр
Цена единицы младшего разряда, °C	0,1
Количество типов сменных зондов	24
Диапазон измерения относительной влажности, %	от 3 до 97
Абсолютная погрешность измерения относительной влажности, %	3
Условия эксплуатации	
–температура окружающей среды, °C	от -20 до +50
–относительная влажность, %	не более 80 % при T = 35 °C
–атмосферное давление, кПа	86 – 106
Напряжение питания, В	1,5 x 2

На точность определения температуры t , которая фиксируется по показаниям контактного термометра ТК-5.06 влияет начальная температура окружающей среды. Для устранения эффекта инерционности прибора, каждое измерение проводили начиная с отметки 20 °C.

Мультиметр цифровой PeakMeter 8229 с подключенной хромель-копелевой термопарой. Термопара инертная к электромагнитному полю, выполнена из немагнитного материала. Погрешность измерений $\pm 2,5$ °C (рис. 3.11, в).

Таблица 3.5

Характеристика мультиметра цифрового PeakMeter 8229

Характеристики	PM 8229
Диапазон измеряемых температур, °C	от 0 до 1000
Абсолютная погрешность, °C	$\pm 2,5$
Условия эксплуатации	
–температура окружающей среды, °C	до +50
–относительная влажность, %	не более 80 % при T = 35 °C
–атмосферное давление, кПа	80 – 100
Напряжение питания, В	1,5 x 2

Рассмотренные приборы позволили выбрать достоверный метод измерения. Для проведения измерений использовался мультиметр цифровой с подключенной термопарой.

3.4 Характеристики клеевых композиций

Для производства фанеры и клееной древесины применяют карбаминоформальдегидные смолы. Они имеют следующие преимущества: быстро отверждаются при нагревании (от 15 до 120 с), обладают высокой прочностью склеивания и светлой окраской, запасы сырья для их производства практически не ограничены.

Основные показатели марок карбаминоформальдегидного смол приведены в таб. 3.6.

Таблица 3.6

Основные показатели марок карбаминоформальдегидного концентрата

Марка смолы	Массовая доля, %		Вязкость по ВЗ-246, с	рН, отн. ед.	Время желатинизации при температуре 100 °С, с	Предел прочности образцов фанеры после вымачивания, МПа, не менее
	сухого остатка	свободного формальдегида, не более				
КФ-О	65-67	0,25	30-50 45-70(Ф)	7,5-8,5	40-60	1,6
КФ-Ж	65-69	0,90	20-40 (Ф) 40-60(М)	7,5-8,7	40-65	1,5
КФ-НФП	68-70	0,12	25-50 80-120(Ф)	7,0-8,5	35-70	1,7
КФ-МТ-15	63,5-67,5	0,15	50-80	7,5-8,5	не более 70	не норм.
КФ-НВ	53-55	0,15	25-120	6,8-7,5	то же	1,6
КФ-МТ-05	64-68	0,05	50-100	7,0-8,5	50-80	1,7
КФ-ЕС (Ф)	64-68	0,05	80-120	7,2-8,2	не более 75	1,5
КФ-Н-54	53-55	0,15	20-150	6,5-7,0	35-70	1,6
СБКФ	67-70	2,50	60-120	6,0-7,0	20-40	1,6

Массовая доля, %, общего формальдегида должна быть не менее 60; общего карбамида – не менее 25; метанола – не более 0,2; хромовых производных (уронов) – 3-15; метилольных групп – 20-25. Выполнение этих требований обеспечивает возможность получения высококачественных карбамидоформальдегидных смол и продукции на их основе [76].

Эпоксидные смолы, благодаря высоким адгезионным, механическим и электрическим свойствам, применяют для склеивания древесины. Они термопластичны и приобретают термореактивные свойства с введением отвердителей. При этом с нагреванием или без нагрева, переходят в отвержденное необратимое состояние, не выделяя побочных продуктов. В отвержденном состоянии эти смолы обладают высокой химической прочностью и влагостойкостью [76].

Составы эпоксидных клеев, рекомендуемых для склеивания древесины приведены в таблице 3.7.

Таблица 3.7

Составы эпоксидных клеев, рекомендуемых для склеивания древесины

Компонент	Состав клея, мас.ч., марки		
	ЭПЦ-1	ЭПЦ-2	ЭОРЦ-1
Эпоксидная смола: ЭД-20 ЭД-16	100 -	100 -	- 100
Полиэфир: МГФ-9 ТГМ-3	20-30 -	- 20-30	- -
Окситерпеновый растворитель	-	-	40
Кубовые остатки гексаметилендиамина	25	25	30
Полиэтиленполиамин	10	10	15
Портландцемент	100-200	100-200	100-200

3.5 Склеивание шпона для производства фанеры ферромагнитными клеевыми композициями

Для обеспечения быстрого и надежного склеивания древесины, необходимо определить режим склеивания. Необходимо учитывать факторы, от которых зависит время полимеризации и качество отверждения клеевого шва. Качество склеивания древесины модифицированными клеями с ферромагнитным наполнителем определяли экспериментально.

Постоянными факторами приняты:

порода древесины	- береза;
толщина шпона	- 1,5 мм;
марка смолы	- КФ-МТ-15;
шероховатость поверхности шпона, R_m , не более	- 120 мкм;
расход клея на основе смолы КФ-МТ-15	- 125 г/м ² ;

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.

Методическая сетка опытов по склеиванию образцов шпона представлена в табл. 3.8.

Методическая сетка опытов склеивания шпона

Таблица 3.8

Методическая сетка опытов склеивания шпона

№	Наименование фактора	Обо- зна- чение	Еди- ница	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_{ϕ}	гр	5-25
3	Размер фракций наполнителя	S	мкм	250-1050
4	Содержание Fe в наполнителе	c	%	75-95
5	Порода древесины	Б	—	береза
6	Влажность древесины	W	%	10
7	Давление запрессовки	ρ	МПа	0,5-1,2
8	Время выдержки под давлением	τ	мин.	7-11
9	Шероховатость контактной поверхности древесины	Rm 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

При формировании ферромагнитной клеевой композиции с применением карбамидной смолы введен наполнитель из каолина и ферромагнитного материала (8+10) (таб. 3.9). Для равномерного смешивания карбамидную и эпоксидную смолу обрабатывали в электромагнитном поле.

Таблица 3.9

Состав карбамидного клея

Компоненты	Содержание %
карбамидная смола	80
наполнитель каолин	8
ферромагнитный наполнитель	10
отвердитель сульфат аммония	2

При формировании клеевой композиции на основе эпоксидной смолы вводили ферромагнитный наполнитель с отвердителем, равномерно перемешивали и помещали в электромагнитное поле индуктора. Нагревали до температуры термодинамического равновесия (таб. 3.10).

Таблица 3.10

Состав эпоксидного клея

Компоненты	Содержание %
эпоксидная смола	80
ферромагнитный наполнитель	10
отвердитель полиэтиленполиамин	10

3.5.1 Склеивание шпона с применением ферромагнитной клеевой композиции

Образцы приготовлены из шпона березы по ГОСТ 33120-2014, длиной 70 мм, шириной 20 мм, соединенные с перекрытием 10 мм. Влажность образцов 10-12%. Ориентация волокон продольная. Направление усилия прижатия – поперек волокон. Направление усилия сдвига – вдоль волокон.

Основные требования к шпону регламентируются ГОСТ 99-96 «Шпон лущеный».

Оптимальные толщины шпона из древесины:

лиственных пород – 1,15 мм; 1,5 мм; 1,8 мм;

хвойных пород – 1,8 мм; 2,2 мм; 3,4 мм.

Величина микронеровностей по ГОСТ 15612-85 не более: 200 мкм для шпона из древесины лиственных пород; 320 мкм для шпона из древесины хвойных пород. На поверхности шпона не должно быть пыли, масляных пятен и других загрязнений.

Образцы с заранее нанесенной клеевой композицией на основе карбамидной и эпоксидной смолы помещали в цилиндрический индуктор, подпрессовывали и фиксировали с помощью клинового устройства (рис. 3.12). Частота тока генератора 7 кГц. Напряжение высокочастотного усилителя 19 В.

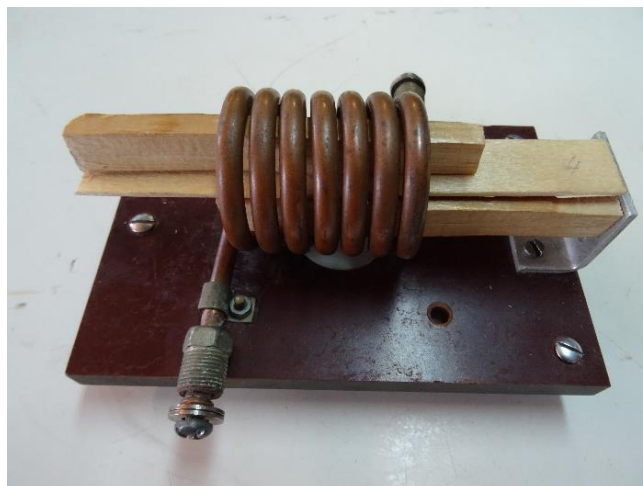
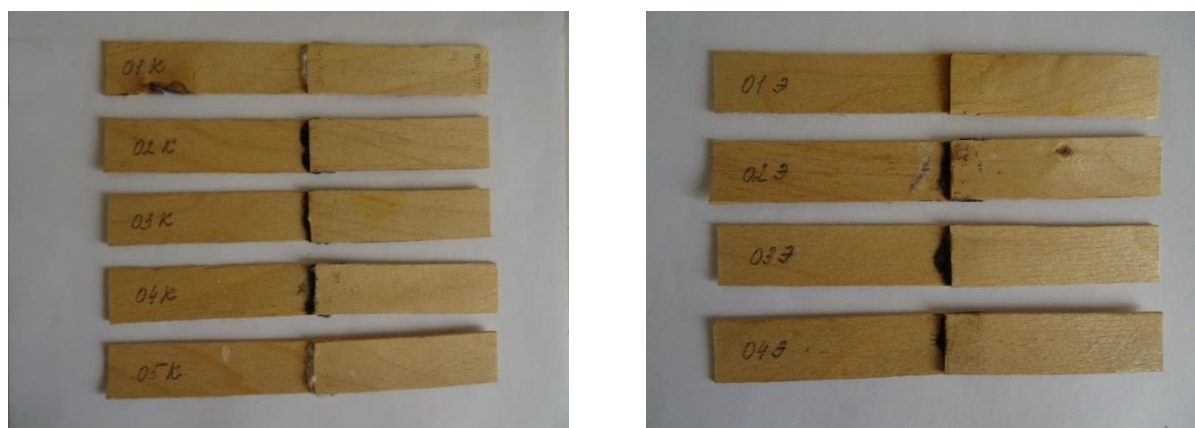


Рис. 3.12 Приспособление для склеивания образцов шпона в индукторе

Применяли клеевую композицию на основе карбамидной и эпоксидной смолы. Вводили ферромагнитный наполнитель, с размером фракции 250-1230 мкм. При проведении опытов определяли влияние вида ферромагнитного наполнителя на время полимеризации клеевой композиции. (глава 4). Все результаты измерений заносили в таблицу формата Excel.

Склеенные образцы шпона с различными видами ферромагнитных наполнителей (рис. 3.13).



а

б

Рис. 3.13 Образцы склеенного шпона

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

Испытания на сдвиг проводили на склеенных образцах (рис. 3.14).



Рис. 3.14 Образцы шпона для испытаний на сдвиг

Определяли прочностные характеристики клеевого соединения образцов шпона на универсальной испытательной машине по ГОСТ 21554.5-1978.

3.6 Прочность клеевого соединения древесины с ферромагнитным адгезивом

Для определения статической прочности клеевого соединения древесины при сдвиге применяли универсальную двухзонную испытательную машину МТ 130. Проводили испытания образцов на сдвиг и измеряли величину нагрузки с погрешностью не более $\pm 1\%$ от измеряемой величины. Диапазон измеряемых нагрузок 1-100 кН (рис. 3.15).

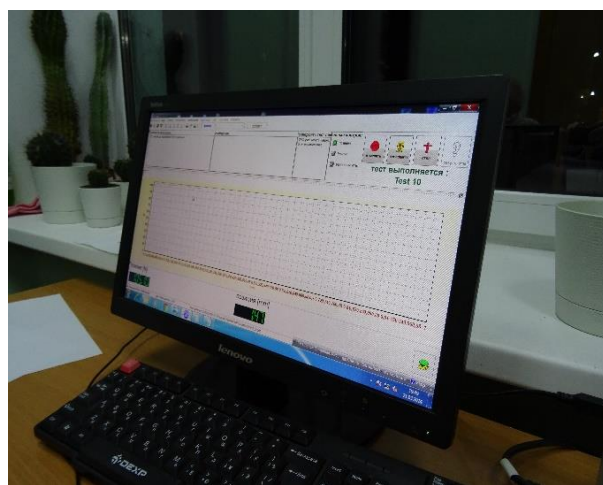
*а**б**в*

Рис. 3.15 Испытательная машина МТ-130

а – закрепленный образец древесины; *б* – компьютер с программным обеспечением; *в* – приспособление для передачи растягивающего усилия на образец

Для закрепления образцов древесины использовали приспособление, состоящее из двух захватов, соединенных с нагружающим механизмом машины и передающих линейное усилие по оси образца (рис. 3.16, в).

Для надежного закрепления на полки образцов с двух сторон приклеивали элементы шпона длиной 50-65 мм, шириной 20 мм. Прочность клеевого соединения образцов шпона при сдвиге определяли по ГОСТ 14759-1969. Образцы, разрушение которых произошло не в рабочей части исключены. Характер разрушения клеевого соединения показан на рис. 3.16-3.17.

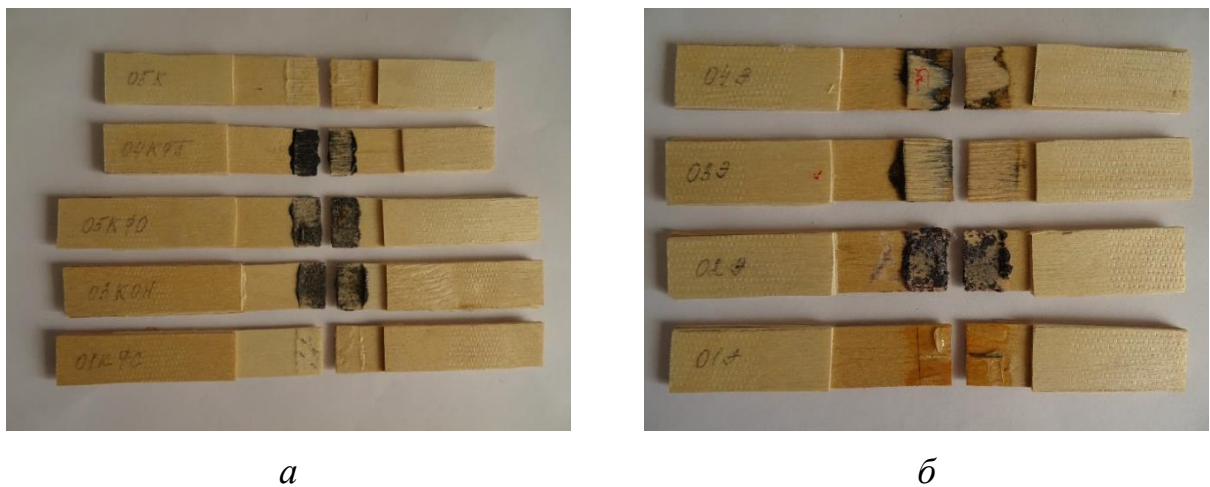


Рис. 3.16 Образцы шпона после испытаний на сдвиг

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

Проводили склеивание контрольных образцов без ферромагнитных наполнителей и с ферромагнитным наполнителем. У контрольных и экспериментальных образцов шпона, склеенных карбамидной и эпоксидной клеевой композицией, разрушение соединения происходит по древесине, т.е. сохраняется прочность соединения 100 % (рис. 3.17, а, б).

*a**б*

Рис. 3.17 Характер разрушения клеевого соединения при сдвиге по древесине
a – на основе карбамидной клеевой композиции; *б* – на основе эпоксидной
клеевой композиции

4 ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

4.1 Динамика процесса нагрева ферромагнитных наполнителей

Для осуществления интенсивного нагрева клеевого шва необходимо выбрать ферромагнитный наполнитель, вводимый в клеевую композицию. Для этого проведены эксперименты по нагреву различных видов ферромагнитных наполнителей на различных частотах работы индукционной установки 5,3 кГц – 10 кГц. Нагрев производили в течении 15 и 30 сек. (рис. 4.1-4.21).

В качестве ферромагнитного наполнителя для клеевой композиции выбрано 5 видов: порошок ферромагнитный Fe 90%, ферромагнитные опилки из стали Fe 95%, измельченные окатыши обожженные Fe_2O_3 , не обожженные Fe_2O_3 , ферромагнитная сечка из стальной проволоки.

В зависимости от емкости конденсаторов, устанавливалась частота работы индукционной установки. При нагреве ферромагнитных наполнителей, задавались одинаковые выходные значения параметров работы установки.

Таблица 4.1

Характеристики работы индукционной установки

Емкость конденсаторов, мкФ	Напряжение, В	Ток, А	Частота тока, Гц
0,44 мкФ	19 В	0,85 А	5,3 кГц
0,25 мкФ			7 кГц
0,17 мкФ			8,5 кГц
0,15 мкФ			9,2 кГц
0,12 мкФ			10 кГц

Таблица 4.2

Нагрев ферромагнитного наполнителя током с частотой 5,3 кГц

№ опыта	Наполнитель	Время нагрева	Температура нагрева	Частота тока
1	ферромагнитные опилки	15 сек	24 °С	5,3 кГц
2	ферромагнитные опилки	30 сек	24,5 °С	
3	окатыши обожженные	15 сек	24 °С	
4	окатыши обожженные	30 сек	23,9 °С	
5	окатыши не обожженные	15 сек	23,4 °С	
6	окатыши не обожженные	30 сек	23,8 °С	
7	порошок ферромагнитный	15 сек	23,3 °С	
8	порошок ферромагнитный	30 сек	23,5 °С	

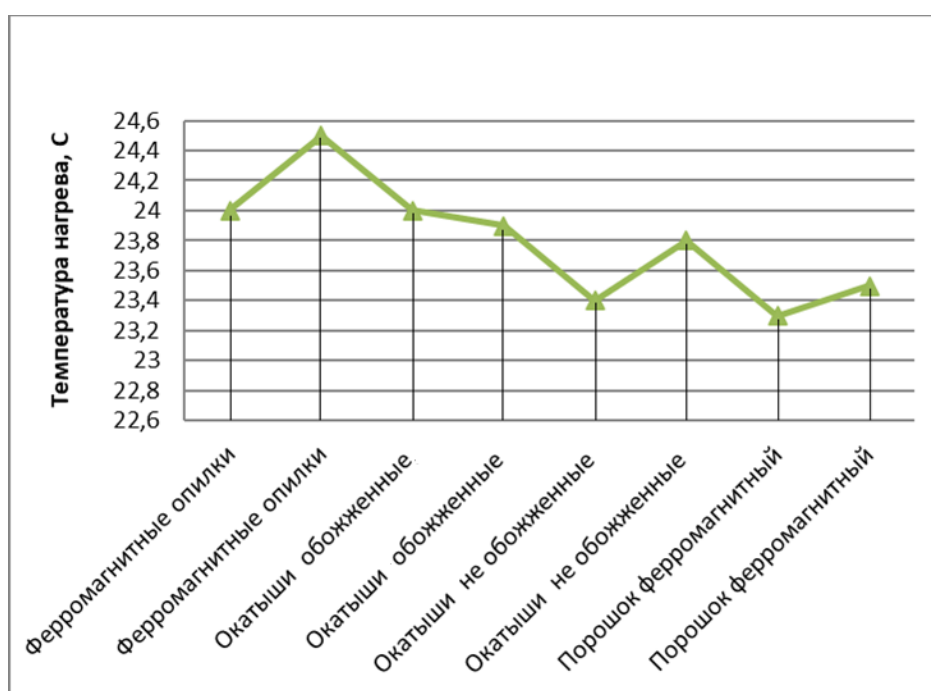


Рис. 4.1 Нагрев ферромагнитного наполнителя током с частотой 5,3 кГц

Таблица 4.3

Нагрев ферромагнитного наполнителя током с частотой 7 кГц

№ опыта	Наполнитель	Время нагрева	Температура нагрева	Частота тока
1	ферромагнитные опилки	15 сек	25 °С	7 кГц
2	ферромагнитные опилки	30 сек	29,5 °С	
3	окатыши обожженные	15 сек	23,7 °С	
4	окатыши обожженные	30 сек	24,5 °С	
5	окатыши не обожженные	15 сек	25,1 °С	
6	окатыши не обожженные	30 сек	27,5 °С	
7	порошок ферромагнитный	15 сек	24,2 °С	
8	порошок ферромагнитный	30 сек	25 °С	

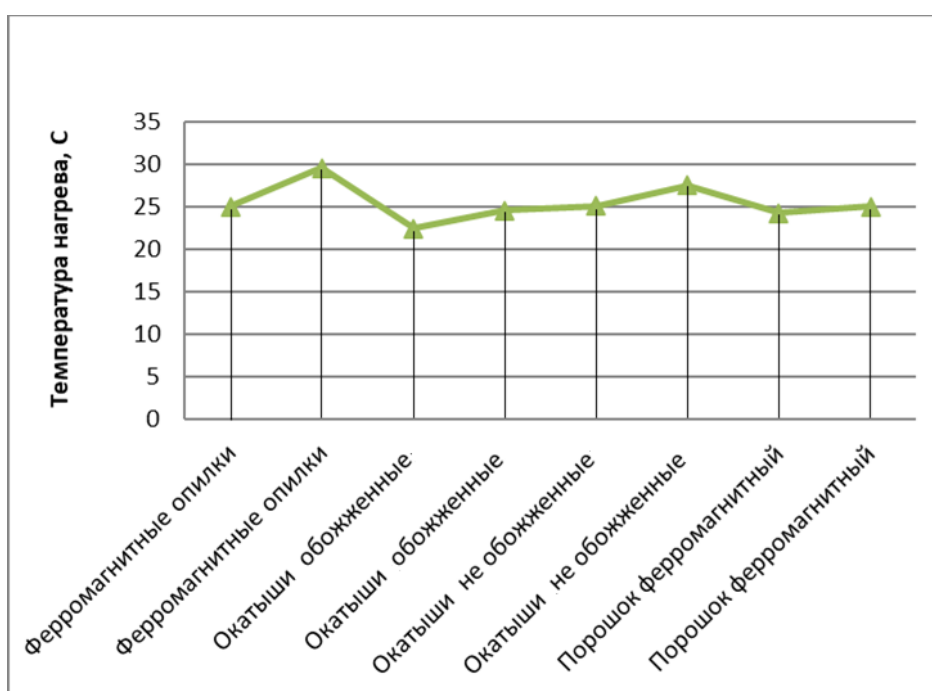


Рис. 4.2 Нагрев ферромагнитного наполнителя током с частотой 7 кГц

Таблица 4.4

Нагрев ферромагнитного наполнителя током с частотой 8,5 кГц

№ опыта	Наполнитель	Время нагрева	Температура нагрева	Частота тока
1	ферромагнитные опилки	15 сек	23,8 °С	8,5 кГц
2	ферромагнитные опилки	30 сек	24,4 °С	
3	окатыши обожженные	15 сек	23,7 °С	
4	окатыши обожженные	30 сек	24 °С	
5	окатыши не обожженные	15 сек	23,9 °С	
6	окатыши не обожженные	30 сек	24,3 °С	
7	порошок ферромагнитный	15 сек	23,1 °С	
8	порошок ферромагнитный	30 сек	23,2 °С	

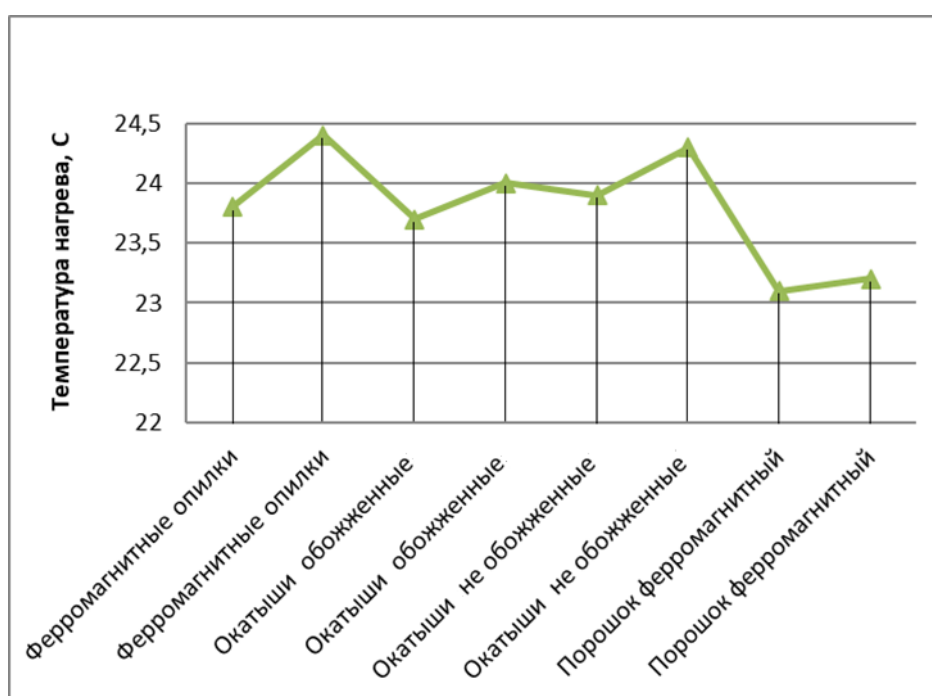


Рис. 4.3 Нагрев ферромагнитного наполнителя током с частотой 8,5 кГц

Таблица 4.5

Нагрев ферромагнитного наполнителя током с частотой 9,2 кГц

№ опыта	Наполнитель	Время нагрева	Температура нагрева	Частота тока
1	ферромагнитные опилки	15 сек	23 °С	9,2 кГц
2	ферромагнитные опилки	30 сек	24,2 °С	
3	окатыши обожженные	15 сек	23,3 °С	
4	окатыши обожженные	30 сек	24,2 °С	
5	окатыши не обожженные	15 сек	23,5 °С	
6	окатыши не обожженные	30 сек	21,7 °С	
7	порошок ферромагнитный	15 сек	21,9 °С	
8	порошок ферромагнитный	30 сек	22,5 °С	

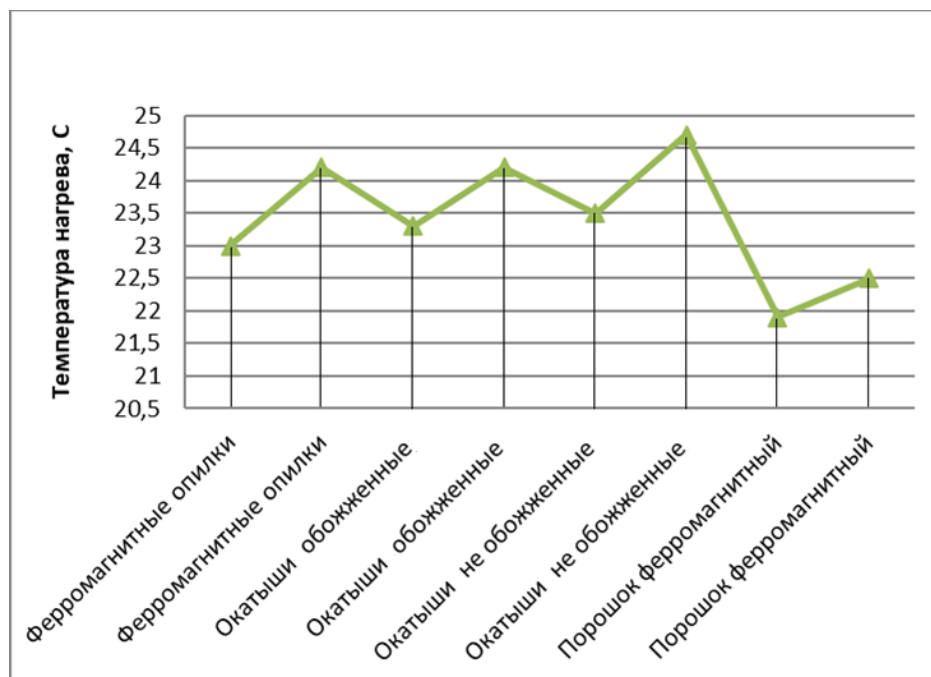


Рис. 4.4 Нагрев ферромагнитного наполнителя током с частотой 9,2 кГц

Таблица 4.6

Нагрев ферромагнитного наполнителя током с частотой 10 кГц

№ опыта	Наполнитель	Время нагрева	Температура нагрева	Частота тока
1	ферромагнитные опилки	15 сек	22,8 °С	10 кГц
2	ферромагнитные опилки	30 сек	23,8 °С	
3	окатыши обожженные	15 сек	23,1 °С	
4	окатыши обожженные	30 сек	23,4 °С	
5	окатыши не обожженные	15 сек	23,3 °С	
6	окатыши не обожженные	30 сек	23,7 °С	
7	порошок ферромагнитный	15 сек	22,3 °С	
8	порошок ферромагнитный	30 сек	22,7 °С	

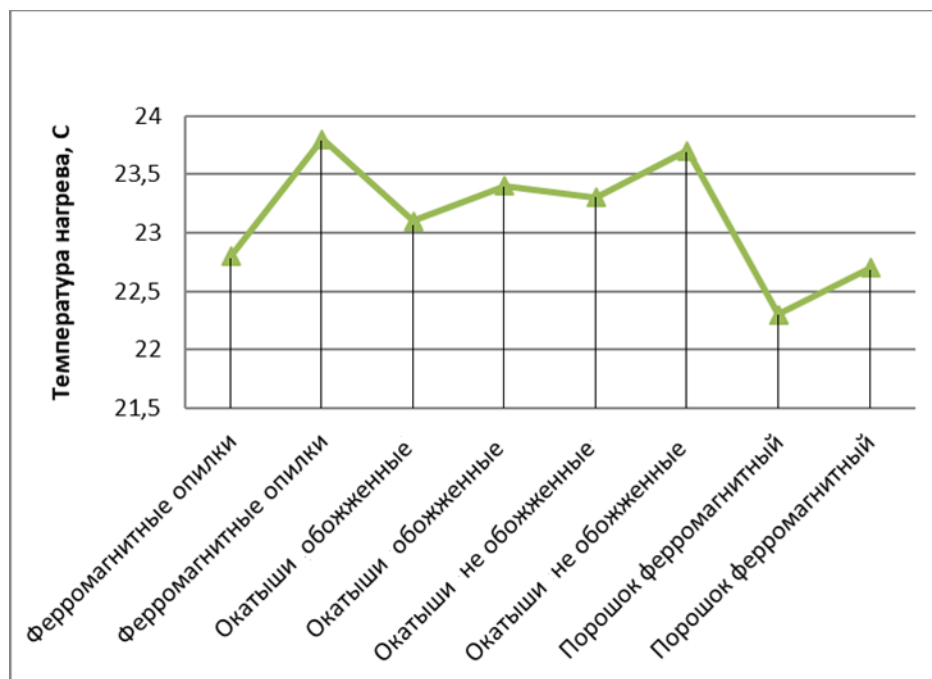


Рис. 4.5 Нагрев ферромагнитного наполнителя током с частотой 10 кГц

Таблица 4.7

Нагрев ферромагнитного наполнителя током с частотой 5,3 кГц

№ опыта	Наполнитель	Время нагрева	Температура нагрева	Частота тока
1	ферромагнитные опилки	15 сек	24 °С	5,3 кГц
2	окатыши обожженные	15 сек	24 °С	
3	окатыши не обожженные	15 сек	23,4 °С	
4	порошок ферромагнитный	15 сек	23,3 °С	



Рис. 4.6 Нагрев ферромагнитного наполнителя током с частотой 5,3 кГц

Таблица 4.8

Нагрев ферромагнитного наполнителя током с частотой 5,3 кГц

№ опыта	Наполнитель	Время нагрева	Температура нагрева	Частота тока
1	ферромагнитные опилки	30 сек	24,5 °С	5,3 кГц
2	окатыши обожженные	30 сек	23,9 °С	
3	окатыши не обожженные	30 сек	23,8 °С	
4	порошок ферромагнитный	30 сек	23,5 °С	



Рис. 4.7 Нагрев ферромагнитного наполнителя током с частотой 5,3 кГц

Таблица 4.9

Нагрев ферромагнитного наполнителя током с частотой 7 кГц

№ опыта	Наполнитель	Время нагрева	Температура нагрева	Частота тока
1	ферромагнитные опилки	15 сек	25 °C	7 кГц
2	окатыши обожженные	15 сек	22,4 °C	
3	окатыши не обожженные	15 сек	25,1 °C	
4	порошок ферромагнитный	15 сек	24,2 °C	



Рис. 4.8 Нагрев ферромагнитного наполнителя током с частотой 7 кГц

Таблица 4.10

Нагрев ферромагнитного наполнителя током с частотой 7 кГц

№ опыта	Наполнитель	Время нагрева	Температура нагрева	Частота тока
1	ферромагнитные опилки	30 сек	29,5 °C	7 кГц
2	окатыши обожженные	30 сек	24,5 °C	
3	окатыши не обожженные	30 сек	27,5 °C	
4	порошок ферромагнитный	30 сек	25 °C	

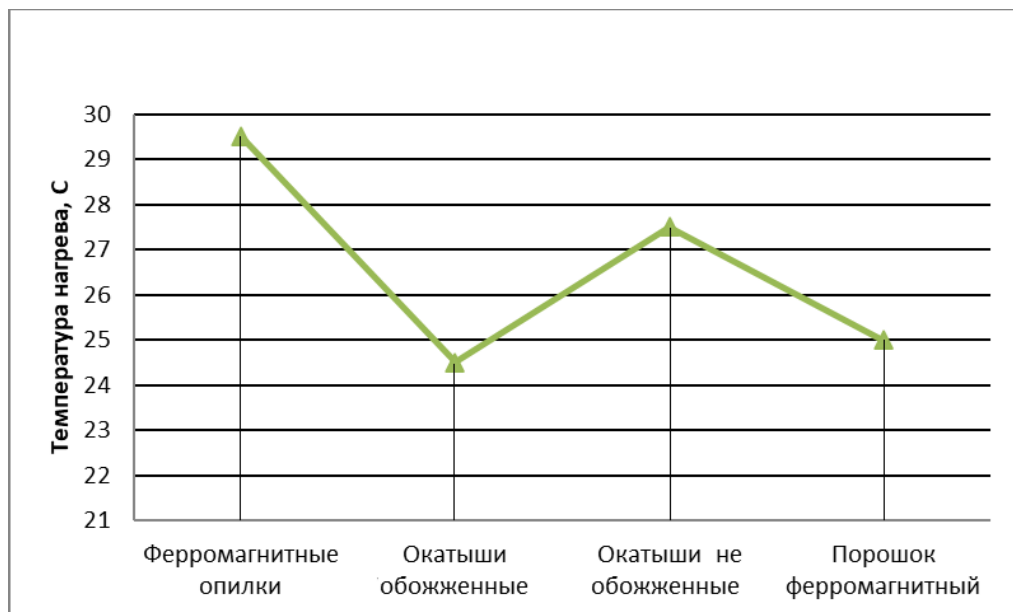


Рис. 4.9 Нагрев ферромагнитного наполнителя током с частотой 7 кГц

Таблица 4.11

Нагрев ферромагнитного наполнителя током с частотой 8,5 кГц

№ опыта	Наполнитель	Время нагрева	Температура нагрева	Частота тока
1	ферромагнитные опилки	15 сек	23,8 °C	8,5 кГц
2	окатыши обожженные	15 сек	23,7 °C	
3	окатыши не обожженные	15 сек	23,9 °C	
4	порошок ферромагнитный	15 сек	23,1 °C	



Рис. 4.10 Нагрев ферромагнитного наполнителя током с частотой 8,5 кГц

Таблица 4.12

Нагрев ферромагнитного наполнителя током с частотой 8,5 кГц

№ опыта	Наполнитель	Время нагрева	Температура нагрева	Частота тока
1	ферромагнитные опилки	30 сек	24,4 °C	8,5 кГц
2	окатыши обожженные	30 сек	24 °C	
3	окатыши не обожженные	30 сек	24,3 °C	
4	порошок ферромагнитный	30 сек	23,2 °C	



Рис. 4.11 Нагрев ферромагнитного наполнителя током с частотой 8,5 кГц

Таблица 4.13

Нагрев ферромагнитного наполнителя током с частотой 9,2 кГц

№ опыта	Наполнитель	Время нагрева	Температура нагрева	Частота тока
1	ферромагнитные опилки	15 сек	23 °С	9,2к Гц
2	окатыши обожженные	15 сек	23,3 °С	
3	окатыши не обожженные	15 сек	23,5 °С	
4	порошок ферромагнитный	15 сек	21,9 °С	



Рис. 4.12 Нагрев ферромагнитного наполнителя током с частотой 9,2 кГц

Таблица 4.14

Нагрев ферромагнитного наполнителя током с частотой 9,2 кГц

№ опыта	Наполнитель	Время нагрева	Температура нагрева	Частота тока
1	ферромагнитные опилки	30 сек	24,2 °С	9,2 кГц
2	окатыши обожженные	30 сек	24,2 °С	
3	окатыши не обожженные	30 сек	24,7 °С	
4	порошок ферромагнитный	30 сек	22,5 °С	



Рис. 4.13 Нагрев ферромагнитного наполнителя током с частотой 9,2 кГц

Таблица 4.15

Нагрев ферромагнитного наполнителя током с частотой 10 кГц

№ опыта	Наполнитель	Время нагрева	Температура нагрева	Частота тока
1	ферромагнитные опилки	15 сек	22,8 °C	10 кГц
2	окатыши обожженные	15 сек	23,1 °C	
3	окатыши не обожженные	15 сек	23,3 °C	
4	порошок ферромагнитный	15 сек	22,3 °C	



Рис. 4.14 Нагрев ферромагнитного наполнителя током с частотой 10 кГц

Таблица 4.16

Нагрев ферромагнитного наполнителя током с частотой 10 кГц

№ опыта	Наполнитель	Время нагрева	Температура нагрева	Частота тока
1	ферромагнитные опилки	30 сек	23,8 °С	10 кГц
2	окатыши обожженные	30 сек	23,4 °С	
3	окатыши не обожженные	30 сек	23,7 °С	
4	порошок ферромагнитный	30 сек	22,7 °С	

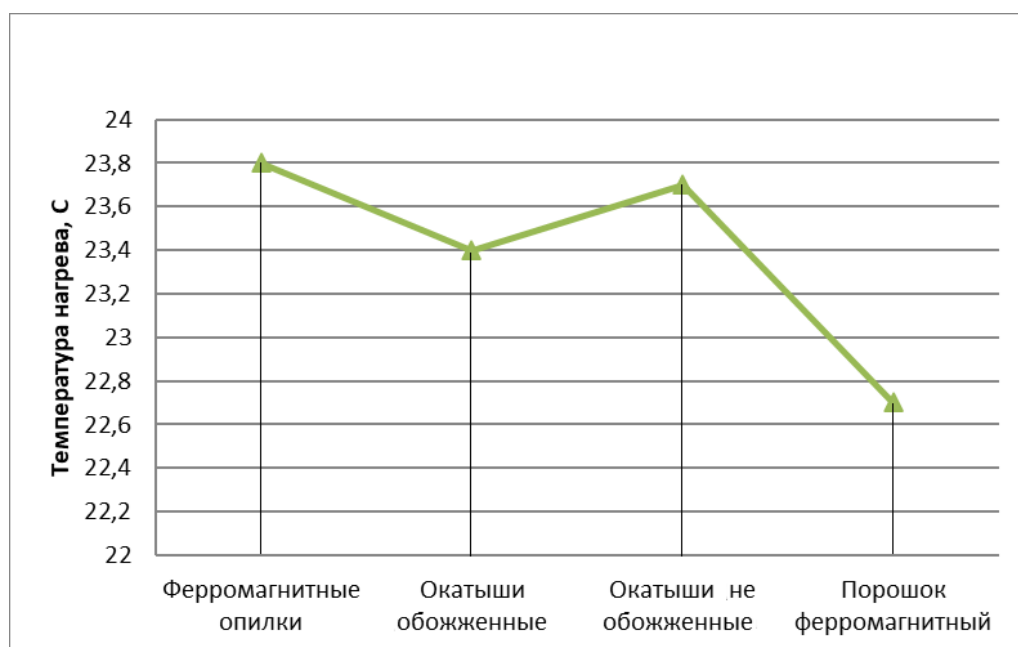


Рис. 4.15 Нагрев ферромагнитного наполнителя током с частотой 10 кГц

Ферромагнитные опилки и окатыши не обожженные, на различных частотах работы индукционной установки 3-10 кГц, нагреваются интенсивнее, чем другие виды ферромагнитных наполнителей. Применение ферромагнитных опилок и окатышей не обожженных в качестве ферромагнитного наполнителя клеевой композиции, позволяет сократить время полимеризации клеевого шва.

Таблица 4.17

Нагрев ферромагнитных наполнителей током с частотой 5,3–10 кГц (15 сек.)

Наполнитель	Частота тока, кГц				
	5,3 кГц	7 кГц	8,5 кГц	9,2 кГц	10 кГц
ферромагнитные опилки	24 °С	25 °С	23,8 °С	23 °С	22,8 °С
окатыши обожженные	24 °С	23,7 °С	23,7 °С	23,3 °С	23,1 °С
окатыши не обожженные	23,4 °С	25,1 °С	23,9 °С	23,5 °С	23,3 °С
порошок ферромагнитный	23,3 °С	24,2 °С	21,1 °С	21,9 °С	22,3 °С

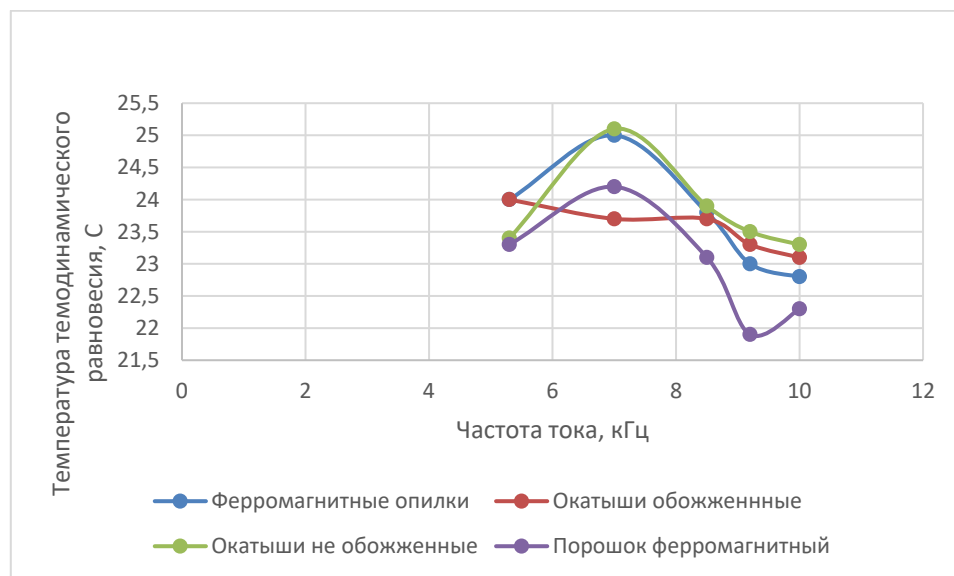


Рис. 4.16 Нагрев ферромагнитных наполнителей током с частотой 5,3–10 кГц

Таблица 4.18

Нагрев ферромагнитных наполнителей током с частотой 5,3–10 кГц (30 сек.)

Наполнитель	Частота тока, кГц				
	5,3 кГц	7 кГц	8,5 кГц	9,2 кГц	10 кГц
ферромагнитные опилки	24,5 °С	29,5 °С	24,4 °С	24,2 °С	23,8 °С
окатыши обожженные	24,1 °С	24,5 °С	24 °С	24,2 °С	23,4 °С
окатыши не обожженные	23,8 °С	27,5 °С	24,3 °С	21,7 °С	23,7 °С
порошок ферромагнитный	23,5 °С	25 °С	23,2 °С	22,5 °С	22,7 °С

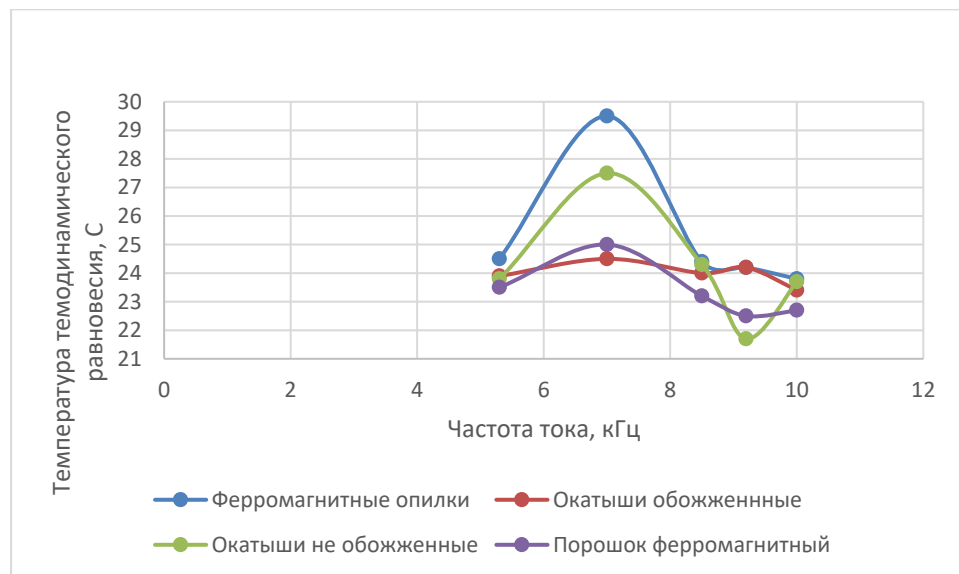


Рис. 4.17 Нагрев ферромагнитных наполнителей током с частотой 5,3–10 кГц

Таблица 4.19

Нагрев ферромагнитных наполнителей в эпоксидной клеевой композиции током с частотой 5,3–10 кГц (15 сек.)

Наполнитель	Частота тока, кГц				
	5,3 кГц	7 кГц	8,5 кГц	9,2 кГц	10 кГц
ферромагнитные опилки	23,5 °С	24,5 °С	23,3 °С	22,5 °С	22,3 °С
окатыши обожженные	23,5 °С	23,2 °С	23,2 °С	22,8 °С	22,6 °С
окатыши не обожженные	22,9 °С	24,6 °С	23,4 °С	23 °С	22,8 °С
порошок ферромагнитный	22,8 °С	23,7 °С	20,6 °С	21,4 °С	21,8 °С

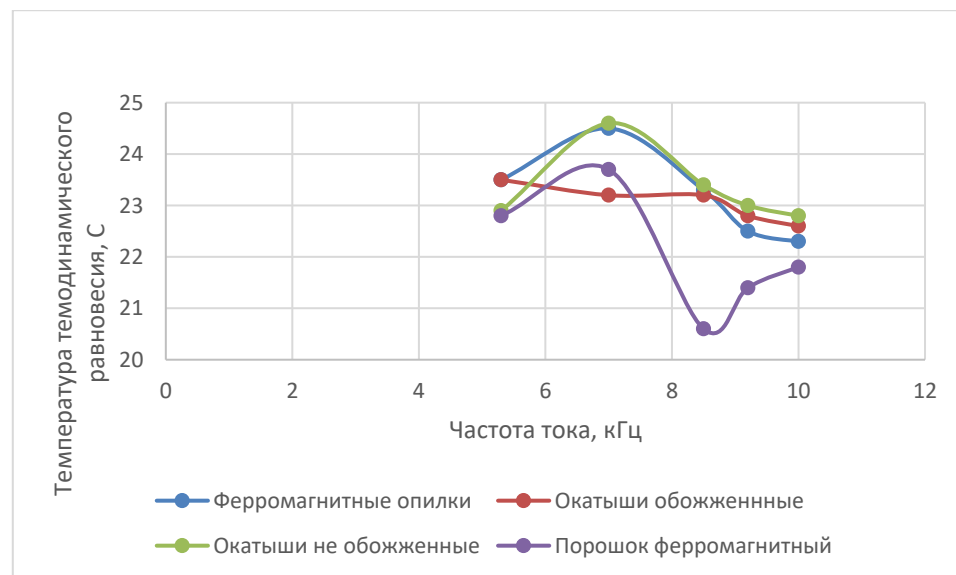


Рис. 4.18 Нагрев ферромагнитных наполнителей током с частотой 5,3–10 кГц

Таблица 4.20

Нагрев ферромагнитных наполнителей в карбамидной клеевой композиции
током с частотой 5,3–10 кГц (15 сек.)

Наполнитель	Частота тока, кГц				
	5,3 кГц	7 кГц	8,5 кГц	9,2 кГц	10 кГц
ферромагнитные опилки	23,3 °С	24,3 °С	23,1 °С	22,3 °С	22,1 °С
окатыши обожженные	23,3 °С	23 °С	23 °С	22,6 °С	22,4 °С
окатыши не обожженные	22,7 °С	24,4 °С	23,2 °С	22,8 °С	22,6 °С
порошок ферромагнитный	22,6 °С	23,5 °С	20,4 °С	21,2 °С	21,6 °С

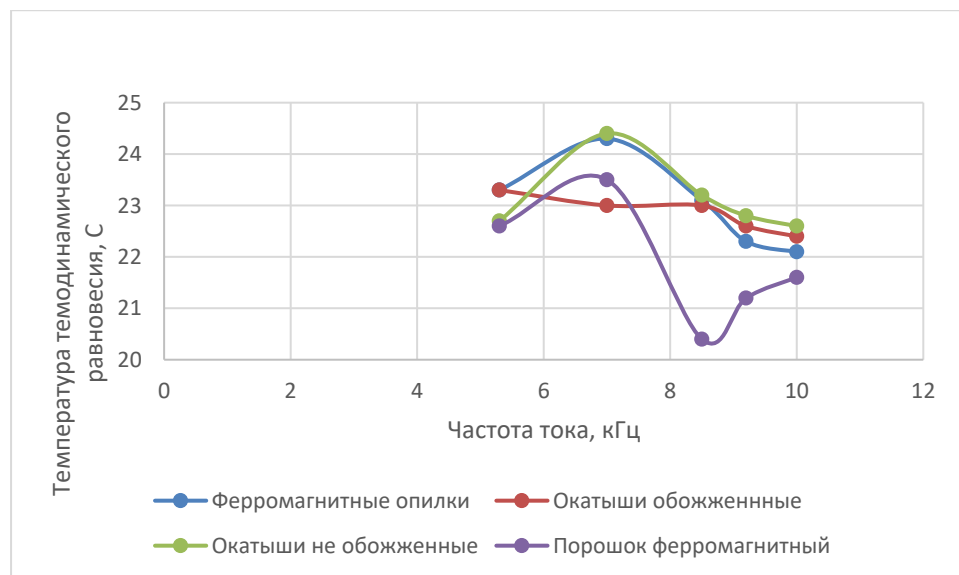


Рис. 4.19 Нагрев ферромагнитных наполнителей током с частотой 5,3–10 кГц

Таблица 4.21

Нагрев ферромагнитных наполнителей в эпоксидной клеевой композиции током с частотой 5,3–10 кГц (30 сек.)

Наполнитель	Частота тока, кГц				
	5,3 кГц	7 кГц	8,5 кГц	9,2 кГц	10 кГц
ферромагнитные опилки	23,8 °С	24,8 °С	23,6 °С	22,8 °С	22,6 °С
окатыши обожженные	23,8 °С	23,5 °С	23,5 °С	23,1 °С	22,9 °С
окатыши не обожженные	23,2 °С	24,9 °С	23,7 °С	23,3 °С	23,1 °С
порошок ферромагнитный	23,1 °С	24 °С	20,9 °С	21,7 °С	22,1 °С

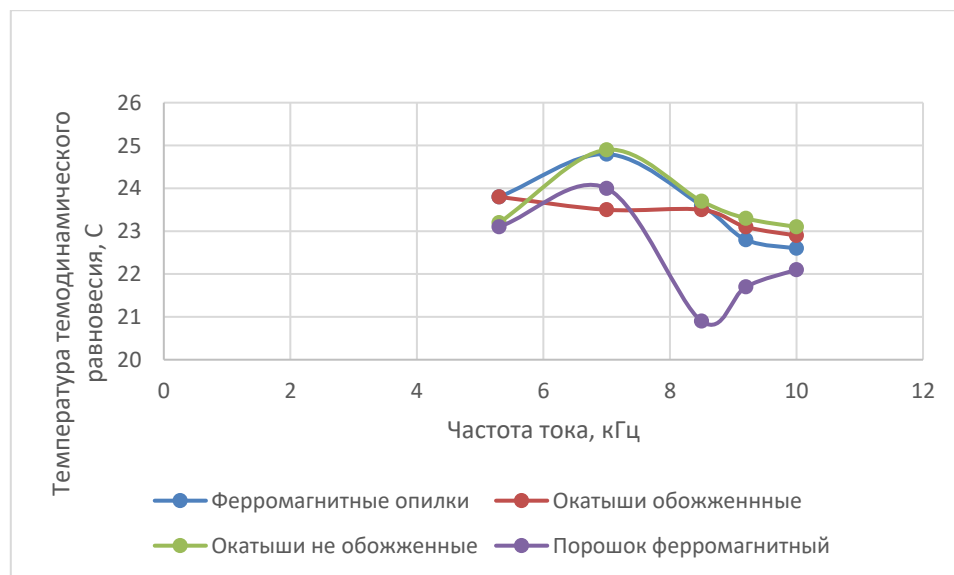


Рис. 4.20 Нагрев ферромагнитных наполнителей током с частотой 5,3–10 кГц

Таблица 4.22

Нагрев ферромагнитных наполнителей в карбамидной клеевой композиции
током с частотой 5,3–10 кГц (30 сек.)

Наполнитель	Частота тока, кГц				
	5,3 кГц	7 кГц	8,5 кГц	9,2 кГц	10 кГц
ферромагнитные опилки	24,2 °С	29,2 °С	24,1 °С	23,9 °С	23,5 °С
окатыши обожженные	23,8 °С	24,2 °С	23,7 °С	23,9 °С	23,1 °С
окатыши не обожженные	23,5 °С	27,2 °С	24 °С	21,4 °С	23,4 °С
порошок ферромагнитный	23,2 °С	24,7 °С	22,9 °С	22,2 °С	22,4 °С

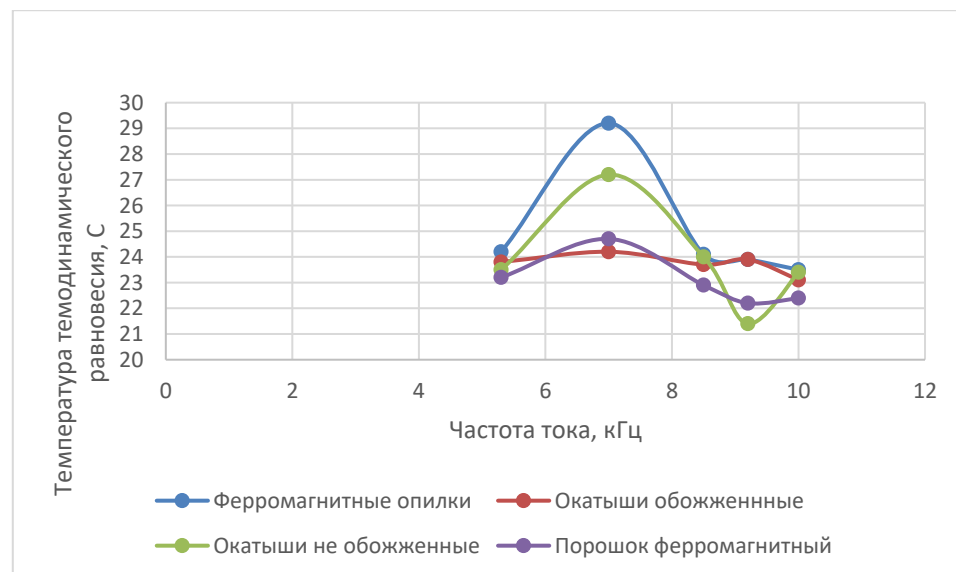


Рис. 4.21 Нагрев ферромагнитных наполнителей током с частотой 5,3–10 кГц

Температура термодинамического равновесия при индукционном нагреве ферромагнитной сечки в зависимости от размера фракций.

Таблица 4.23

Температура термодинамического равновесия при индукционном нагреве ферромагнитной сечки (15 сек.)

№ п/п	Фракции сечки	Масса	Размерный состав фракций	Температура термодинамического равновесия	Мощность источника питания индуктора
1	$l=5$ мм	20 гр	250 мкм	31,3 °C	100 Вт
	$l=10$ мм			54,4 °C	
	$l=15$ мм			73,1 °C	
2	$l=5$ мм		330 мкм	48,1 °C	
	$l=10$ мм			57,4 °C	
	$l=15$ мм			75,3 °C	
3	$l=5$ мм		380 мкм	52,1 °C	
	$l=10$ мм			61,3 °C	
	$l=15$ мм			79,4 °C	
4	$l=5$ мм		1230 мкм	58,4 °C	
	$l=10$ мм			67,2 °C	
	$l=15$ мм			85,5 °C	

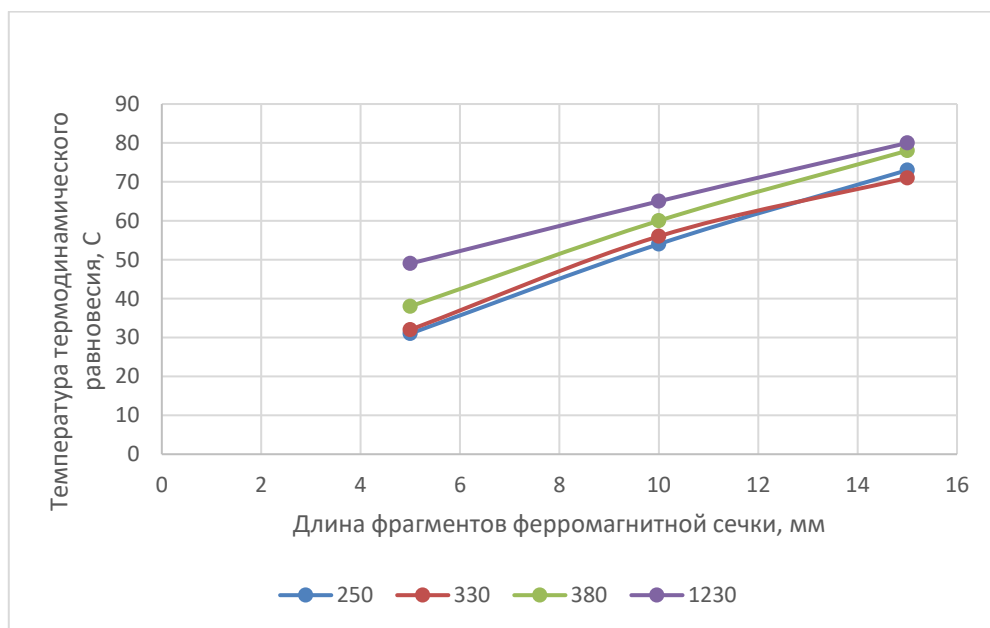


Рис. 4.22 Температура термодинамического равновесия при индукционном нагреве ферромагнитной сечки

Таблица 4.24

Температура термодинамического равновесия при индукционном нагреве ферромагнитной сечки (30 сек.)

№ п/п	Фракции сечки	Масса	Размерный состав фракций	Температура термодинамического равновесия	Мощность источника питания индуктора
1	$l=5$ мм	20 гр	250 мкм	32,2 °C	100 Вт
	$l=10$ мм			55,3 °C	
	$l=15$ мм			74,1 °C	
2	$l=5$ мм		330 мкм	49,2 °C	
	$l=10$ мм			61,5 °C	
	$l=15$ мм			77,3 °C	
3	$l=5$ мм		380 мкм	55,6 °C	
	$l=10$ мм			71,4 °C	
	$l=15$ мм			82,1 °C	
4	$l=5$ мм		1230 мкм	60,4 °C	
	$l=10$ мм			73,2 °C	
	$l=15$ мм			96,3 °C	

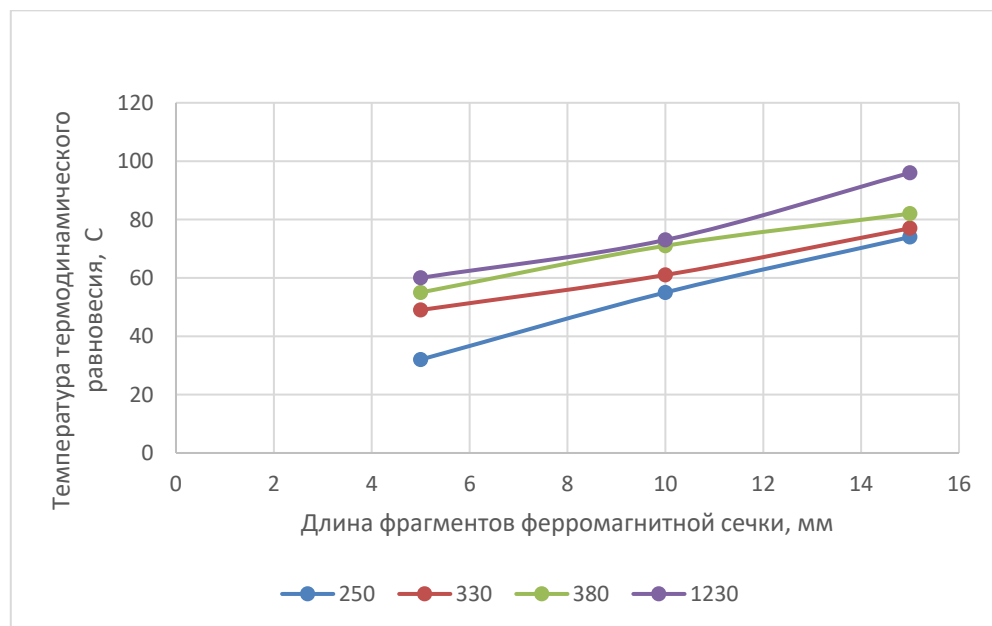


Рис. 4.23 Температура термодинамического равновесия при индукционном нагреве ферромагнитной сечки

Таблица 4.25

Температура термодинамического равновесия при индукционном нагреве ферромагнитной сечки в эпоксидной клеевой композиции (15 сек.)

№ п/п	Фракции сечки	Масса	Размерный состав фракций	Температура термодинамического равновесия	Мощность источника питания индуктора
1	$l=5$ мм	20 гр	250 мкм	23,4 °C	100 Вт
	$l=10$ мм			36,9 °C	
	$l=15$ мм			45,2 °C	
2	$l=5$ мм		330 мкм	32,3 °C	
	$l=10$ мм			52,1 °C	
	$l=15$ мм			63,4 °C	
3	$l=5$ мм		380 мкм	39,7 °C	
	$l=10$ мм			61,2 °C	
	$l=15$ мм			77,4 °C	
4	$l=5$ мм		1230 мкм	49,3 °C	
	$l=10$ мм			63,5 °C	
	$l=15$ мм			85,1 °C	

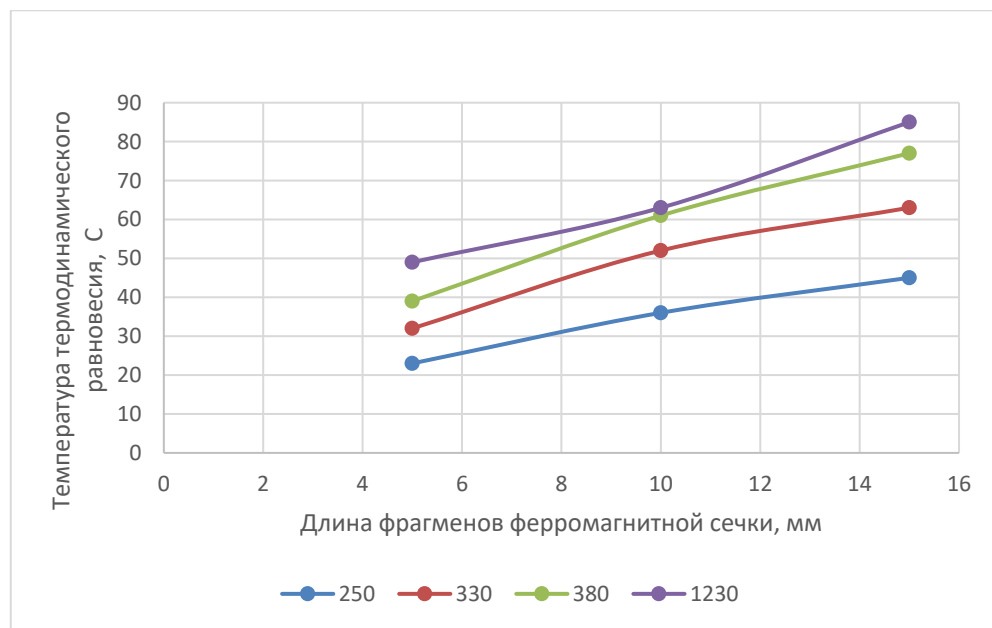


Рис. 4.24 Температура термодинамического равновесия при индукционном нагреве ферромагнитной сечки в эпоксидной клеевой композиции

Таблица 4.26

Температура термодинамического равновесия при индукционном нагреве ферромагнитной сечки в карбамидной клеевой композиции (15 сек.)

№ п/п	Фракции сечки	Масса	Размерный состав фракций	Температура термодинамического равновесия	Мощность источника питания индуктора
1	$l=5$ мм	20 гр	250 мкм	22,7 °C	100 Вт
	$l=10$ мм			34,5 °C	
	$l=15$ мм			39,8 °C	
2	$l=5$ мм		330 мкм	29,2 °C	
	$l=10$ мм			48,3 °C	
	$l=15$ мм			57,1 °C	
3	$l=5$ мм		380 мкм	36,3 °C	
	$l=10$ мм			58,4 °C	
	$l=15$ мм			76,3 °C	
4	$l=5$ мм		1230 мкм	46,7 °C	
	$l=10$ мм			62,4 °C	
	$l=15$ мм			79,3 °C	

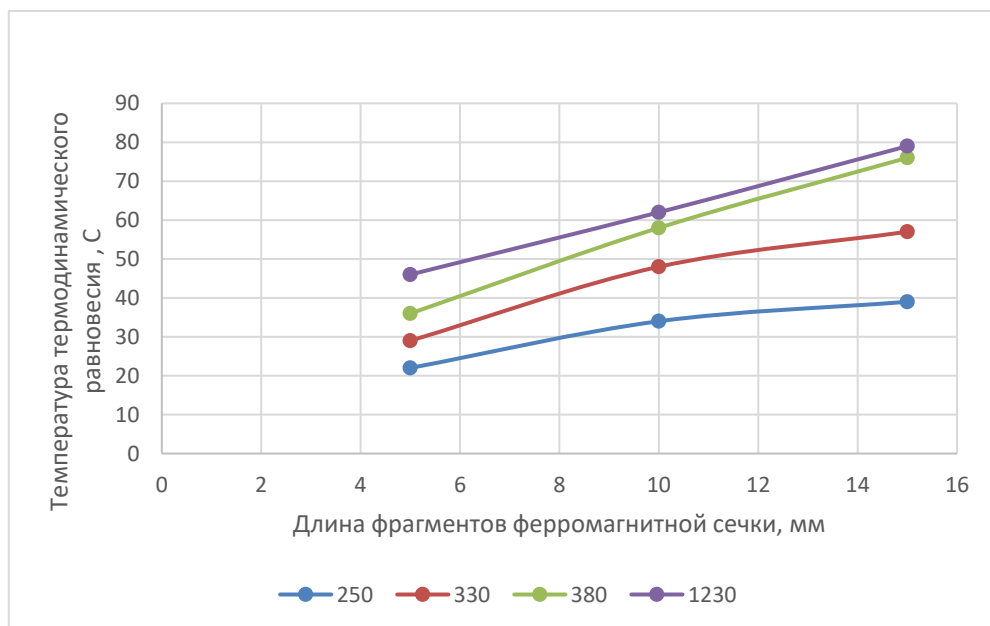


Рис. 4.25 Температура термодинамического равновесия при индукционном нагреве ферромагнитной сечки в карбамидной клеевой композиции

Таблица 4.27

Температура термодинамического равновесия при индукционном нагреве ферромагнитной сечки в эпоксидной клеевой композиции (30 сек.)

№ п/п	Фракции сечки	Масса	Размерный состав фракций	Температура термодинамического равновесия	Мощность источника питания индуктора
1	$l=5$ мм	20 гр	250 мкм	29,2 °С	100 Вт
	$l=10$ мм			38,6 °С	
	$l=15$ мм			46,3 °С	
2	$l=5$ мм		330 мкм	35,2 °С	
	$l=10$ мм			58,4 °С	
	$l=15$ мм			73,6 °С	
3	$l=5$ мм		380 мкм	41,3 °С	
	$l=10$ мм			63,1 °С	
	$l=15$ мм			79,2 °С	
4	$l=5$ мм		1230 мкм	52,4 °С	
	$l=10$ мм			66,3 °С	
	$l=15$ мм			89,6 °С	

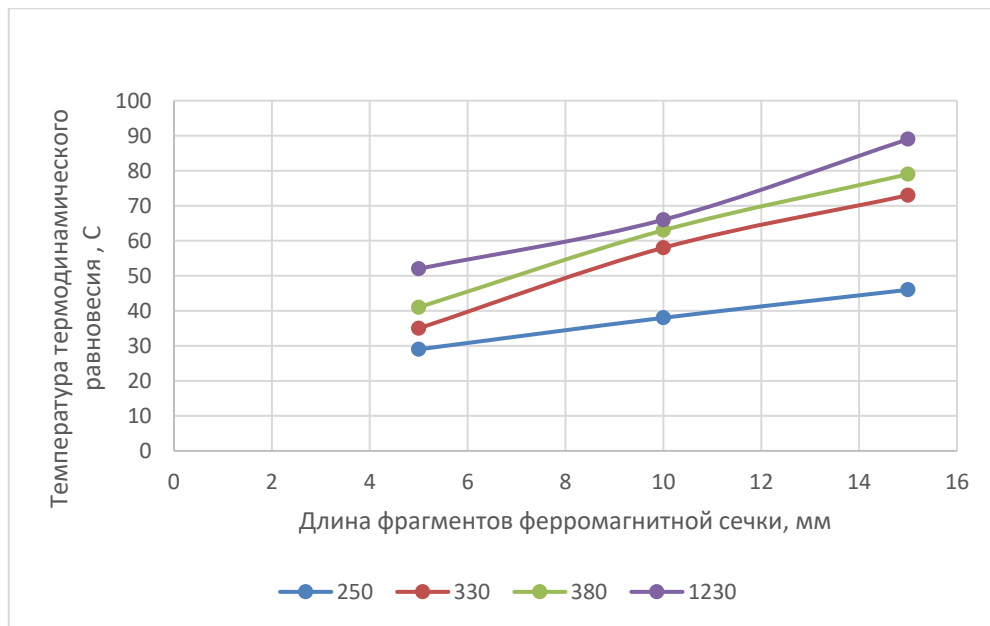


Рис. 4.26 Температура термодинамического равновесия при индукционном нагреве ферромагнитной сечки в эпоксидной клеевой композиции

Таблица 4.28

Температура термодинамического равновесия при индукционном нагреве ферромагнитной сечки в карбамидной клеевой композиции (30 сек.)

№ п/п	Фракции сечки	Масса	Размерный состав фракций	Температура термодинамического равновесия	Мощность источника питания индуктора
1	$l=5$ мм	20 гр	250 мкм	24,8 °C	100 Вт
	$l=10$ мм			36,2 °C	
	$l=15$ мм			44,8 °C	
2	$l=5$ мм		330 мкм	32,3 °C	
	$l=10$ мм			56,1 °C	
	$l=15$ мм			71,4 °C	
3	$l=5$ мм		380 мкм	38,2 °C	
	$l=10$ мм			60,4 °C	
	$l=15$ мм			78,3 °C	
4	$l=5$ мм		1230 мкм	49,7 °C	
	$l=10$ мм			65,3 °C	
	$l=15$ мм			80,1 °C	

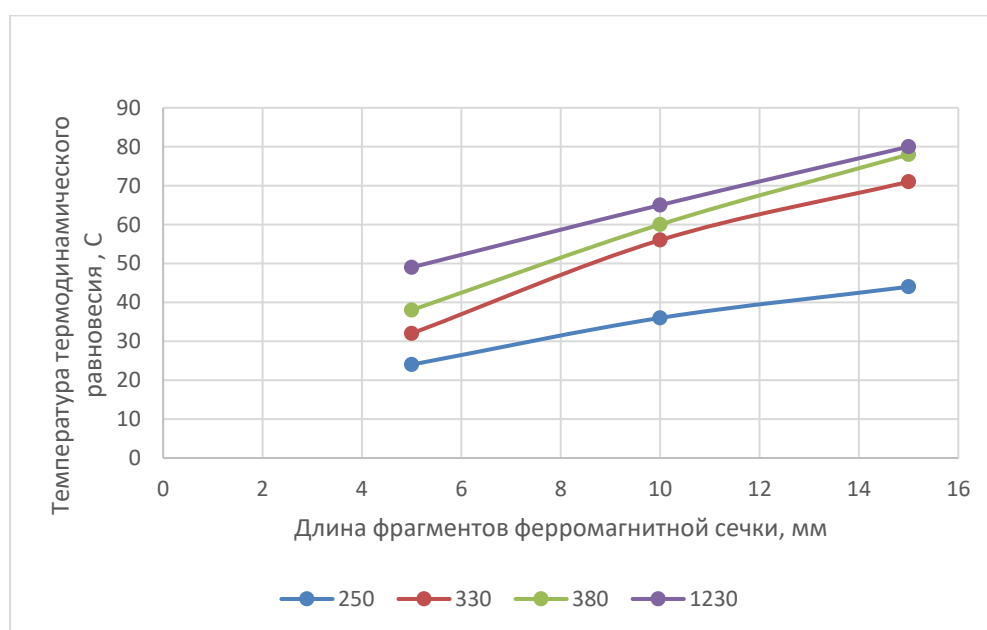


Рис. 4.27 Температура термодинамического равновесия при индукционном нагреве ферромагнитной сечки в карбамидной клеевой композиции

При анализе частот индукционного нагрева, самой оптимальной для воспроизведения процесса склеивания, является резонансная частота тока 7 кГц. На данной частоте регистрируются максимальные значения температур при нагреве ферромагнитного наполнителя (рис. 4.29 – 4.33).

Таблица 4.29

Нагрев ферромагнитных опилок из стали Fe 95%

Ферромагнитные опилки из стали				
Частота тока кГц (f)	Время нагрева τ (сек)	Температура нагрева t ($^{\circ}\text{C}$)	Время нагрева τ (сек)	Температура нагрева t ($^{\circ}\text{C}$)
5,3	15	24	30	24,5
7	15	25	30	29,5
8,5	15	23,8	30	24,4
9,2	15	23	30	24,2
10	15	22,8	30	23,8

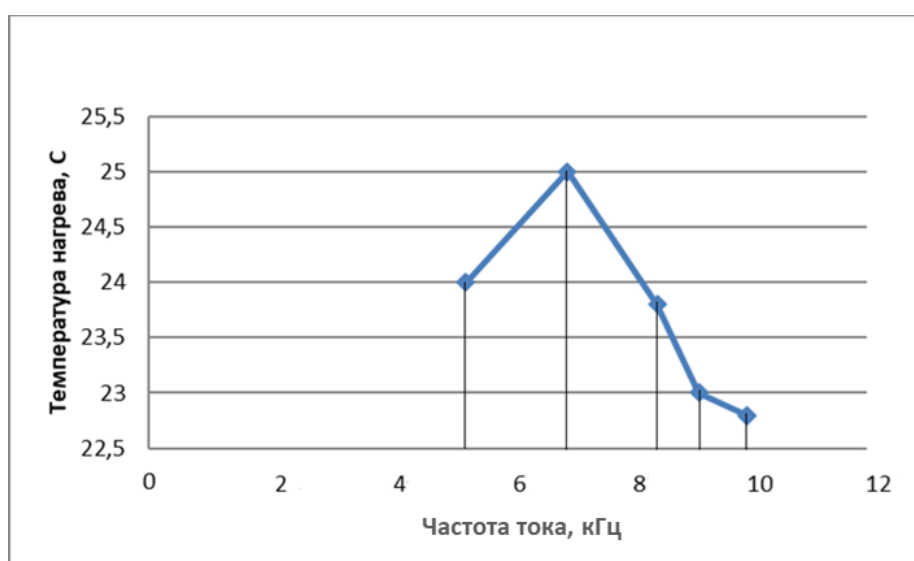


Рис. 4.28 Нагрев ферромагнитных опилок из стали Fe 95% в зависимости от частоты тока

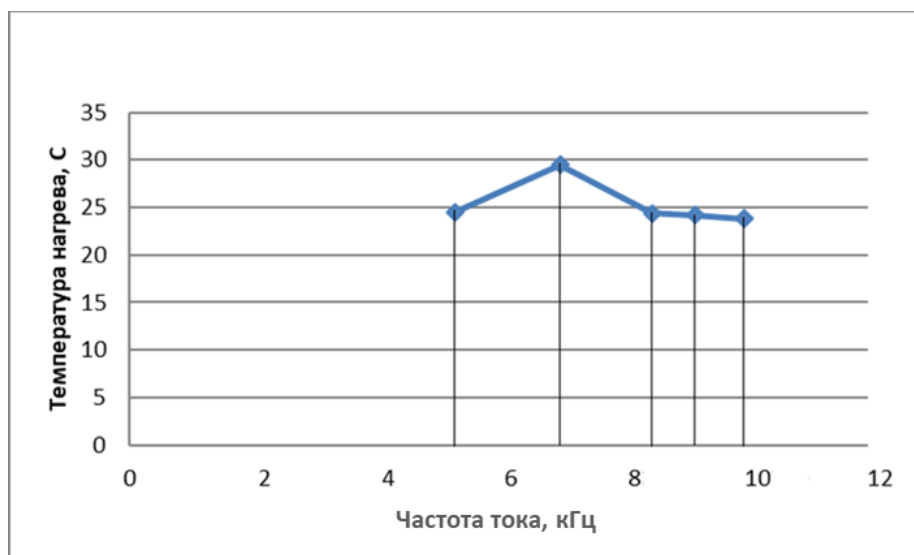


Рис. 4.29 Нагрев ферромагнитных опилок из стали Fe 95% в зависимости от частоты тока

Таблица 4.30

Нагрев окатышей обожженных Fe_2O_3

Окатыши обожженные				
Частота тока кГц (f)	Время нагрева τ (сек)	Температура нагрева t ($^{\circ}\text{C}$)	Время нагрева τ (сек)	Температура нагрева t ($^{\circ}\text{C}$)
5,3	15	23,7	30	23,9
7	15	24	30	24,5
8,5	15	23,7	30	24
9,2	15	23,3	30	24,2
10	15	23,1	30	23,4

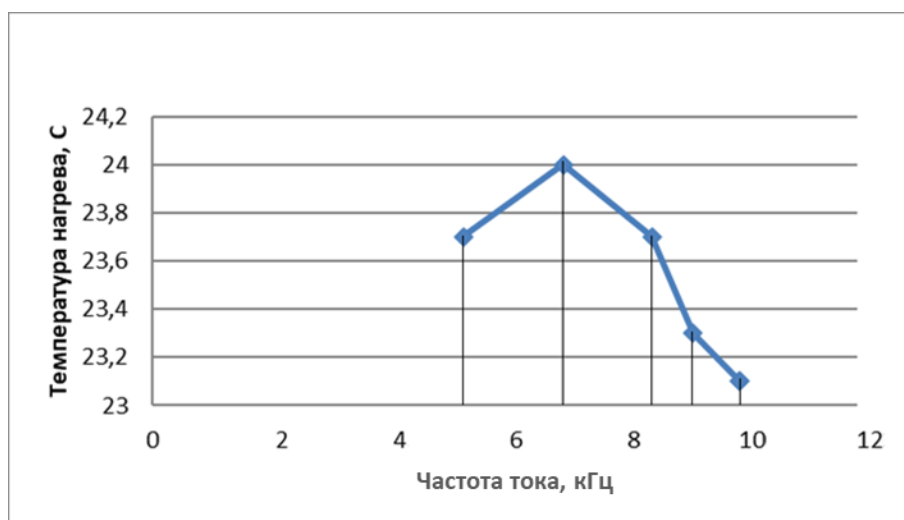


Рис. 4.30 Нагрев окатышей обожженных Fe_2O_3 в зависимости от частоты тока

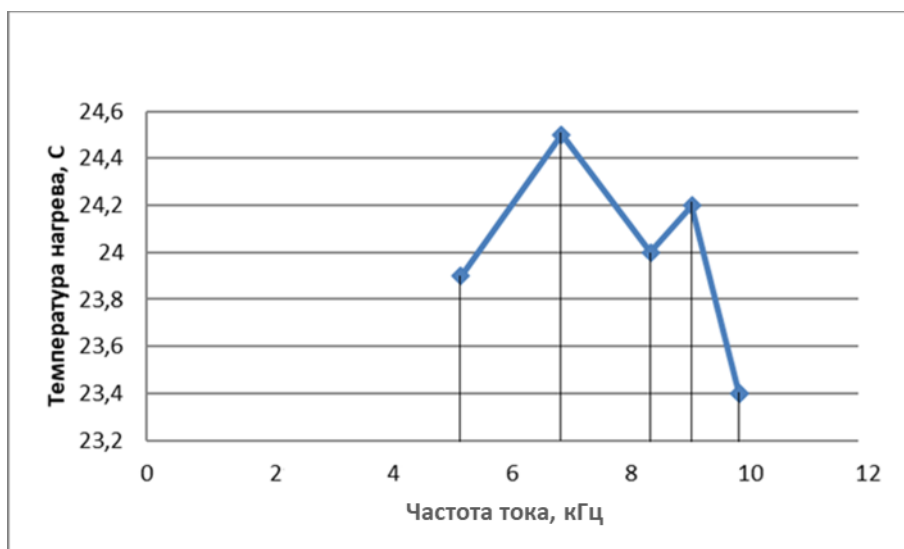
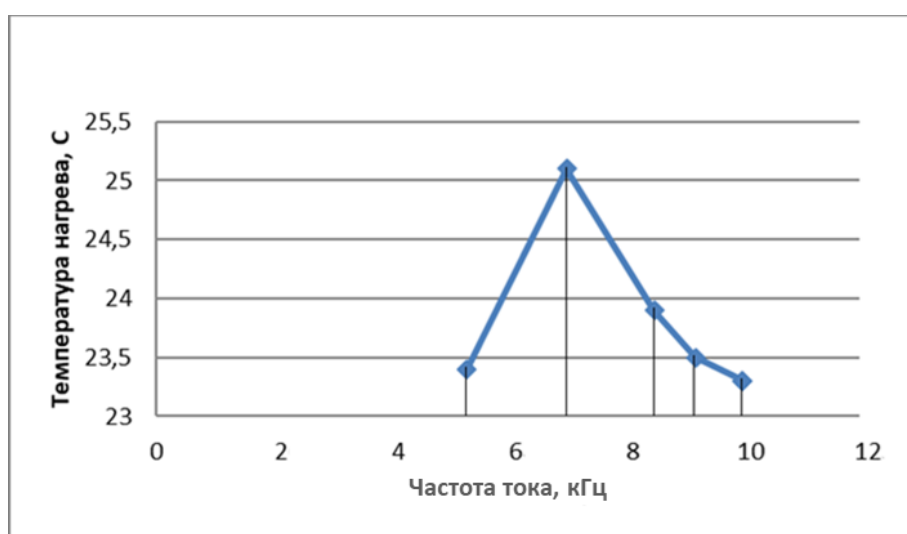
Рис. 4.31 Нагрев окатышей обожженных Fe_2O_3 в зависимости от частоты тока

Таблица 4.31

Нагрев окатышей не обожженных Fe_2O_3

Окатыши не обожженные				
Частота тока кГц (f)	Время нагрева τ (сек)	Температура нагрева t ($^{\circ}\text{C}$)	Время нагрева τ (сек)	Температура нагрева t ($^{\circ}\text{C}$)
5,3	15	23,4	30	23,8
7	15	25,1	30	27,5
8,5	15	23,9	30	24,3
9,2	15	23,5	30	24,7
10	15	23,3	30	23,7

Рис. 4.32 Нагрев окатышей не обожженных Fe_2O_3 в зависимости от частоты тока

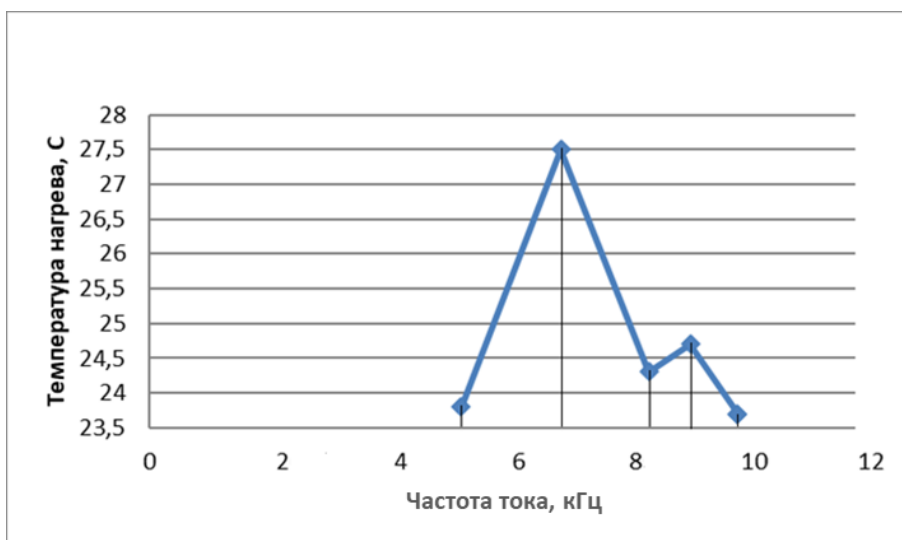
Рис. 4.33 Нагрев окатышей обожженных Fe_2O_3 в зависимости от частоты тока

Таблица 4.32

Нагрев порошка ферромагнитного Fe 90%

Порошок ферромагнитный				
Частота тока кГц (f)	Время нагрева τ (сек)	Температура нагрева t ($^{\circ}\text{C}$)	Время нагрева τ (сек)	Температура нагрева t ($^{\circ}\text{C}$)
5,3	15	23,3	30	23,5
7	15	24,2	30	25
8,5	15	23,1	30	24,2
9,2	15	21,9	30	22,5
10	15	22,3	30	22,7

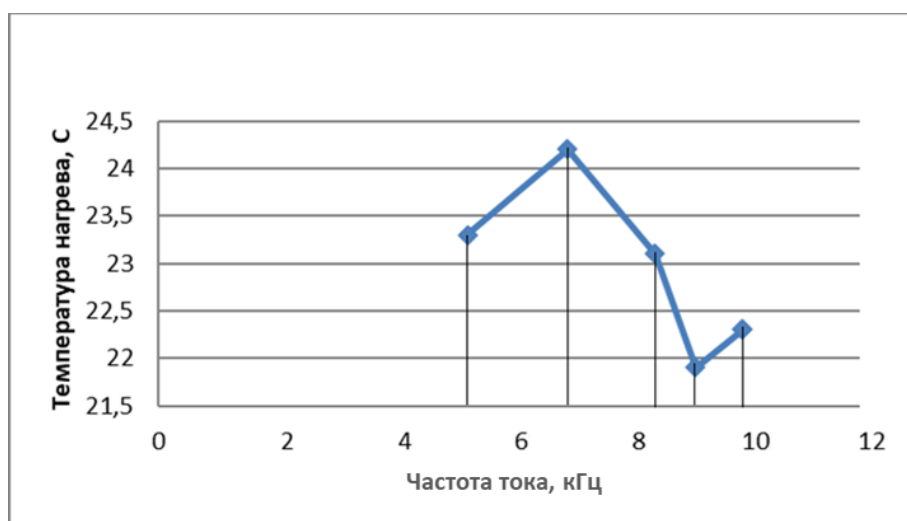


Рис. 4.34 Нагрев ферромагнитного порошка Fe 90% в зависимости от частоты тока

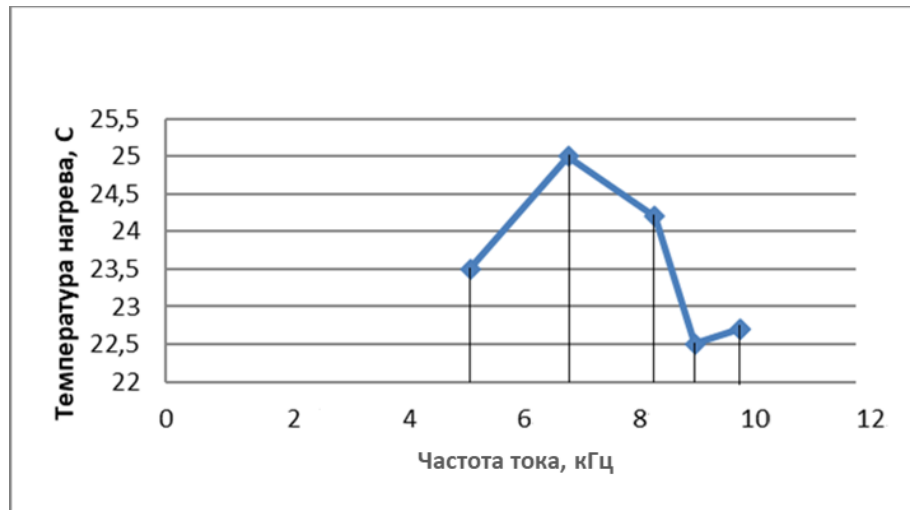


Рис. 4.35 Нагрев ферромагнитного порошка Fe 90% в зависимости от частоты тока

Таблица 4.33

Нагрев ферромагнитной сечки

Ферромагнитная сечка				
Частота тока кГц (f)	Время нагрева τ (сек)	Температура нагрева t ($^{\circ}\text{C}$)	Время нагрева τ (сек)	Температура нагрева t ($^{\circ}\text{C}$)
5,3	15	64,7	30	68,9
7	15	76,2	30	85,5
8,5	15	63,6	30	67,2
9,2	15	58,9	30	64,3
10	15	60,3	30	62,6

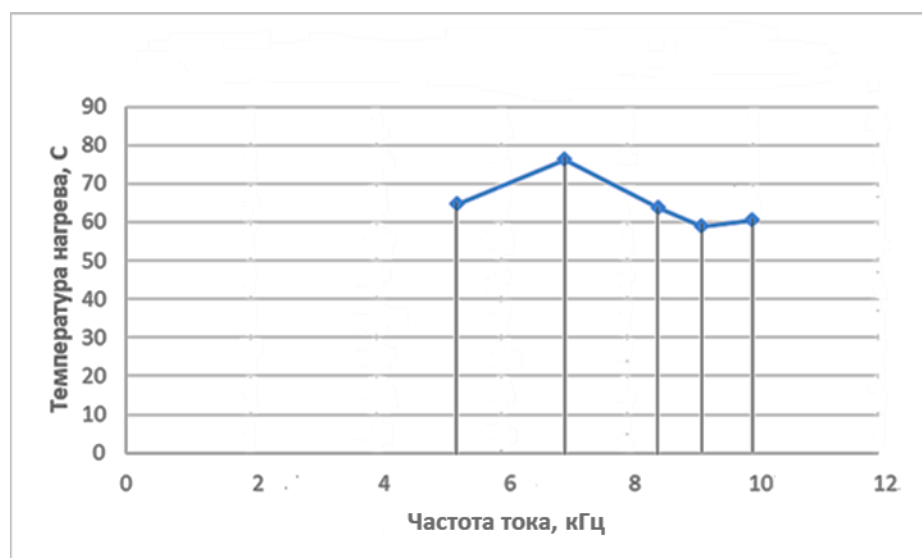


Рис. 4.36 Нагрев ферромагнитной сечки в зависимости от частоты тока

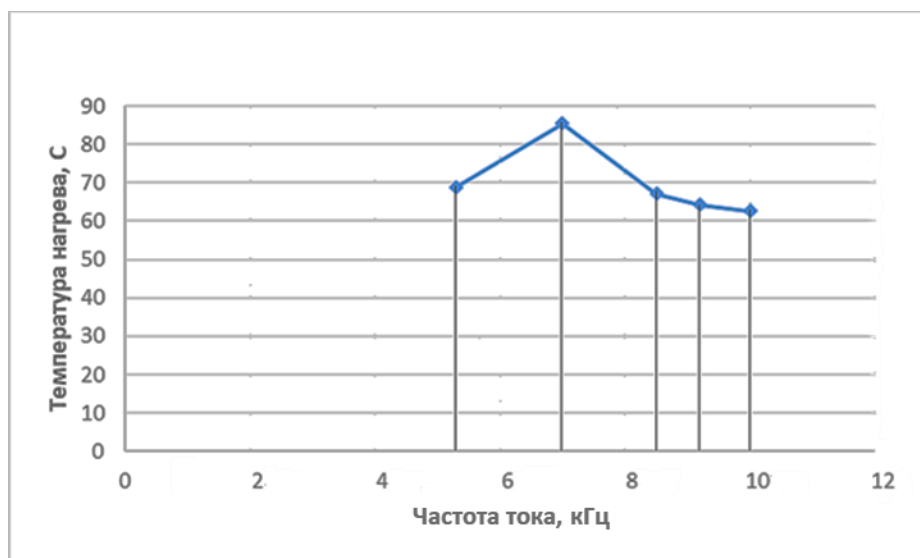


Рис. 4.37 Нагрев ферромагнитной сечки в зависимости от частоты тока

Температура термодинамического равновесия при индукционном нагреве ферромагнитных наполнителей в зависимости от мощности индуктора

Таблица 4.34

Температура термодинамического равновесия при индукционном нагреве ферромагнитных наполнителей в зависимости от мощности индуктора

Мощность индуктора	Температура нагрева			
	Ферромагнитные опилки из стали Fe 95%	Окатыши обожженные Fe_2O_3	Окатыши не обожженные Fe_2O_3	Порошок ферромагнитный Fe 90%
25 Вт	31,2 °C	26 °C	28,3 °C	26,5 °C
60 Вт	43,5 °C	37,4 °C	41,6 °C	39,2 °C
100 Вт	57,5 °C	53,2 °C	56,5 °C	53,2 °C
120 Вт	64,5 °C	60,4 °C	64,1 °C	60,4 °C
150 Вт	75,1 °C	71,1 °C	75,4 °C	71,1 °C
170 Вт	82,1 °C	78,2 °C	82,9 °C	78,2 °C
200 Вт	92,6 °C	88,9 °C	94,2 °C	88,9 °C

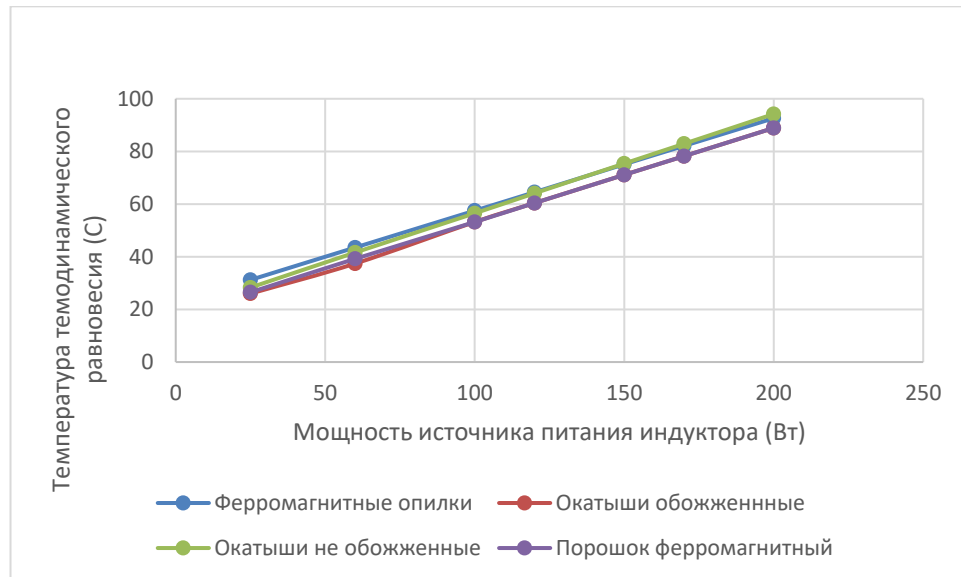


Рис. 4.38 Температура термодинамического равновесия ферромагнитных наполнителей в зависимости от мощности индуктора

Таблица 4.35

Температура термодинамического равновесия при индукционном нагреве ферромагнитной сечки в зависимости от мощности индуктора

Мощность индуктора	Температура нагрева		
	$l=5$ мм	$l=10$ мм	$l=15$ мм
25 Вт	37,2 °C	48,5 °C	64,7 °C
60 Вт	48,1 °C	57,4 °C	75,3 °C
100 Вт	60,3 °C	67,5 °C	87,4 °C
120 Вт	66,5 °C	72,6 °C	93,4 °C
150 Вт	75,7 °C	80,2 °C	102,5 °C
170 Вт	81,9 °C	85,3 °C	108,6 °C
200 Вт	91,2 °C	93,1 °C	117,7 °C

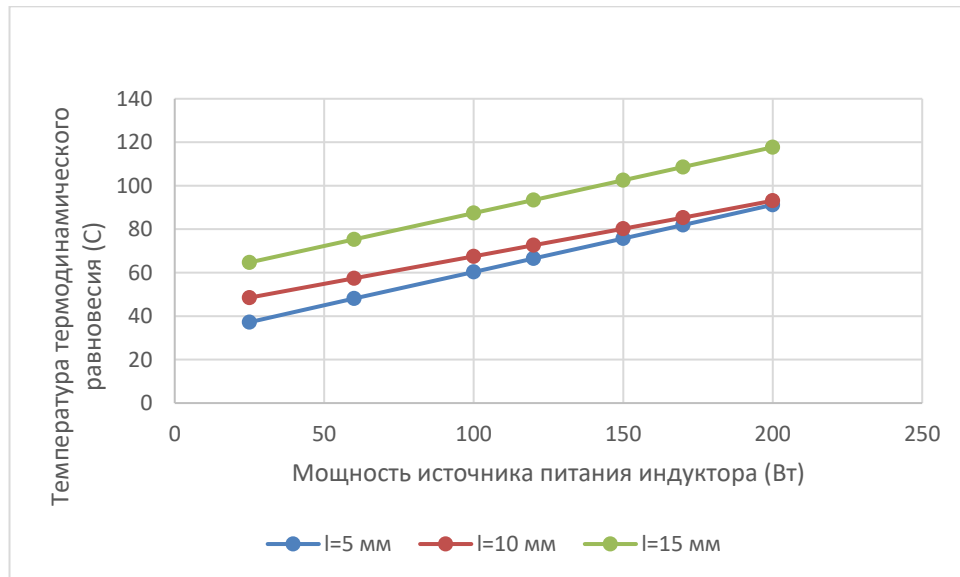


Рис. 4.39 Температура термодинамического равновесия ферромагнитной сечки в зависимости от мощности индуктора

При проведении опытов по склеиванию образцов шпона были выбраны две клеевые композиции на основе карбамидного и эпоксидного клея. В клеевую композицию в качестве ферромагнитного наполнителя вводили: ферромагнитные опилки из стали Fe 95%, окатыши не обожженные Fe_2O_3 и ферромагнитную сечку из стальной проволоки.

В зависимости от используемой клеевой композиции и вида ферромагнитного наполнителя, время склеивания образцов шпона с применением карбамидного клея составило 40 мин. Время склеивания образцов шпона с применением эпоксидного клея составило 20 мин.

Результаты экспериментальных исследований на установке подтвердили эффективность применения индукционного способа нагрева для интенсификации полимеризации клеевого соединения.

4.2 Прочностные характеристики клеевого соединения шпона

Определили предел прочности клеевого шва образцов шпона на сдвиг с различными видами ферромагнитных наполнителей на основе карбамидной клеевой композиции (рис. 4.40-4.46).

Таблица 4.36

Предел прочности клеевого соединения образцов шпона на сдвиг
с наполнителем из каолина

№ образца шпона	Наполнитель	Размер фракций	Максимальная нагрузка, F	Касательное напряжение, τ
01К	каолин	50 мкм	1028 Н	5,1 МПа
02К			955 Н	4,7 МПа
03К			913 Н	4,5 МПа
04К			750 Н	3,7 МПа
05К			844 Н	4,2 МПа

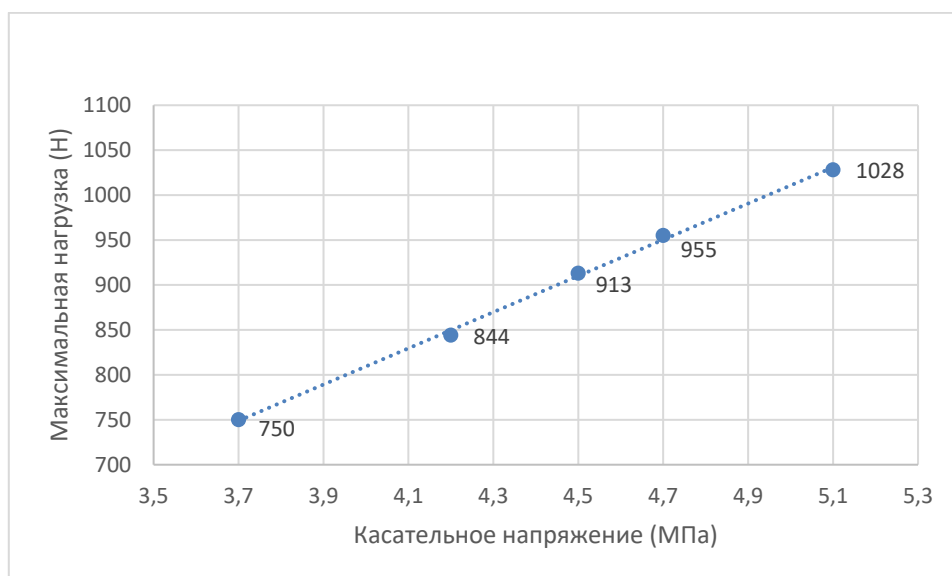


Рис. 4.40 Прочность клеевого соединения образцов шпона на сдвиг
с наполнителем из каолина

Таблица 4.37

Предел прочности клеевого соединения образцов шпона на сдвиг
с наполнителем из ферромагнитных опилок

№ образца шпона	Наполнитель	Размер фракций	Максимальная нагрузка, F	Касательное напряжение, τ
01КФО	ферромагнитные опилки из стали Fe 95%	250 мкм	600 Н	3,0 МПа
02КФО			602 Н	3,0 МПа
03КФО			681 Н	3,4 МПа
04КФО			550 Н	2,7 МПа
05КФО			494 Н	2,4 МПа

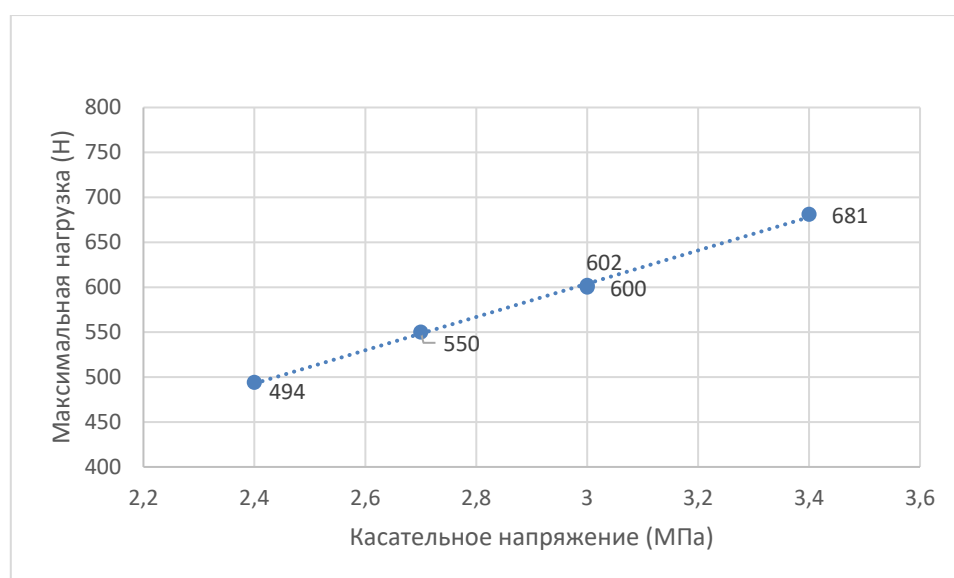


Рис. 4.41 Прочность клеевого соединения образцов шпона на сдвиг
с наполнителем из ферромагнитных опилок

Таблица 4.38

Предел прочности клеевого соединения образцов шпона на сдвиг
с наполнителем из окатышей обожженных

№ образца шпона	Наполнитель	Размер фракций	Максимальная нагрузка, F	Касательное напряжение, τ
01КОН	измельченные окатыши обожженные Fe_2O_3	250 мкм	488 Н	2,4 МПа
02КОН			434 Н	2,1 МПа
03КОН			307 Н	1,5 МПа
04КОН			530 Н	2,6 МПа
05КОН			452 Н	2,2 МПа

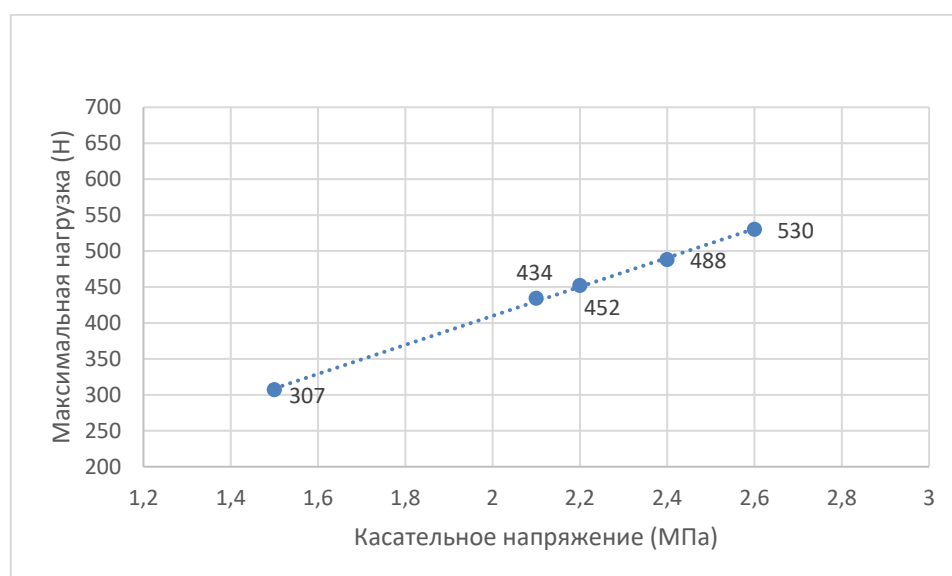


Рис. 4.42 Прочность клеевого соединения образцов шпона на сдвиг
с наполнителем из окатышей обожженных

Таблица 4.39

Предел прочности клеевого соединения образцов шпона на сдвиг
с наполнителем из окатышей не обожженных

№ образца шпона	Наполнитель	Размер фракций	Максимальная нагрузка, Н	Касательное напряжение, τ
01КОН	измельченные окатыши не обожженные Fe_2O_3	250 мкм	530 Н	2,6 МПа
02КОН			474 Н	2,3 МПа
03КОН			347 Н	1,7 МПа
04КОН			589 Н	2,9 МПа
05КОН			492 Н	2,4 МПа

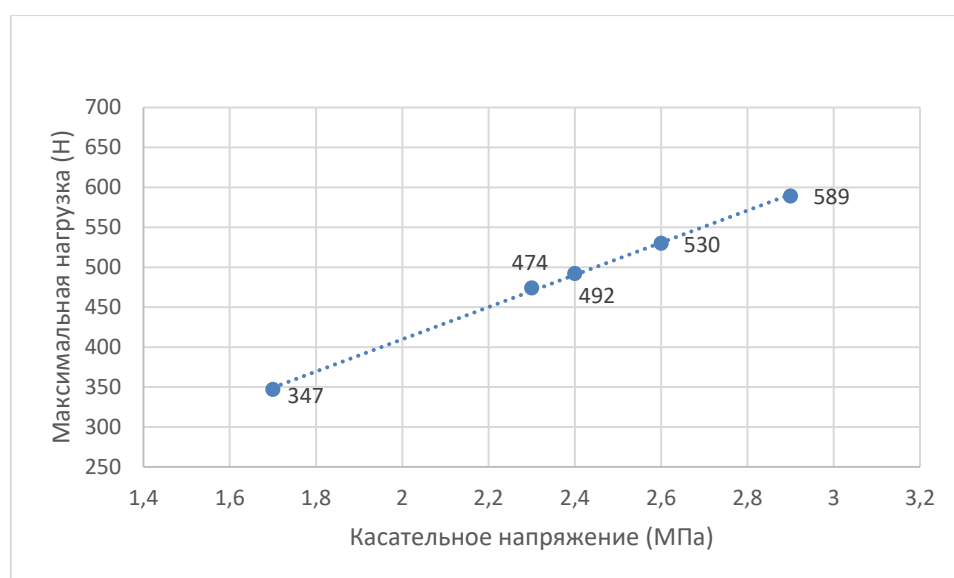


Рис. 4.43 Прочность клеевого соединения образцов шпона на сдвиг
с наполнителем из окатышей не обожженных

Таблица 4.40

Предел прочности клеевого соединения образцов шпона на сдвиг
с наполнителем из порошка ферромагнитного

№ образца шпона	Наполнитель	Размер фракций	Максимальная нагрузка, F	Касательное напряжение, τ
01КФП	порошок ферромагнитный Fe 90%	250 мкм	868 Н	4,3 МПа
02КФП			808 Н	4,0 МПа
03КФП			750 Н	3,7 МПа
04КФП			825 Н	4,1 МПа
05КФП			601 Н	3,0 МПа

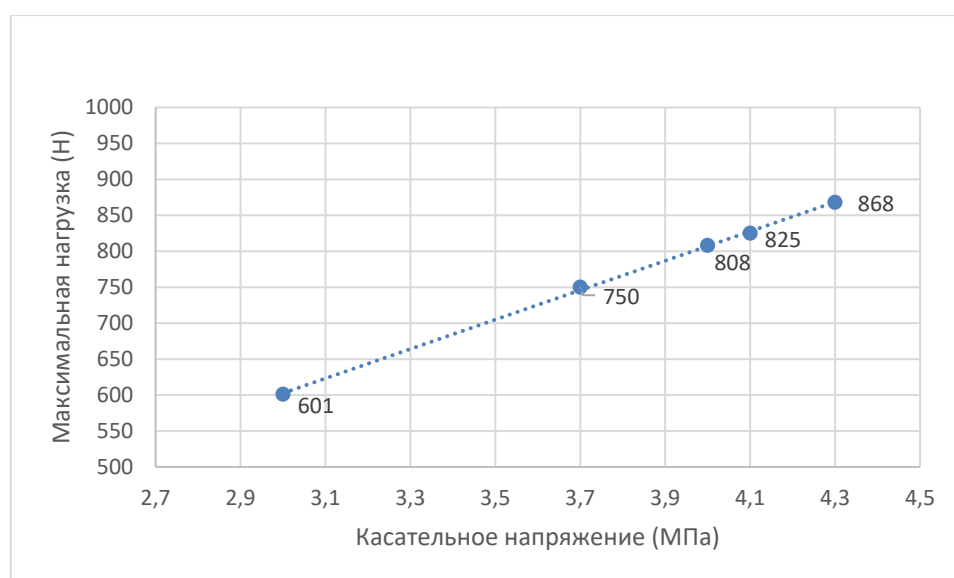


Рис. 4.44 Прочность клеевого соединения образцов шпона на сдвиг
с наполнителем из порошка ферромагнитного

Таблица 4.41

Предел прочности клеевого соединения образцов шпона на сдвиг
с наполнителем из ферромагнитной сечки

№ образца шпона	Наполнитель	Размер фракций	Максимальная нагрузка, F	Касательное напряжение, τ
01КФС	ферромагнитная сечка из стальной проволоки	330 мкм	448 Н	2,2 МПа
02КФС			428 Н	2,1 МПа
03КФС			566 Н	2,8 МПа
04КФС			526 Н	2,6 МПа
05КФС			504 Н	2,5 МПа

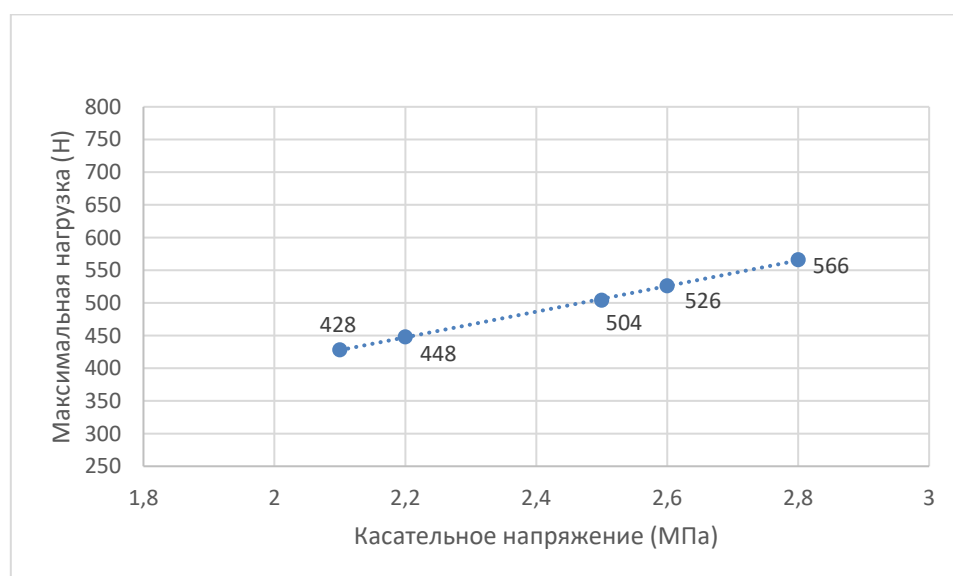


Рис. 4.45 Прочность клеевого соединения образцов шпона на сдвиг
с наполнителем из ферромагнитной сечки

Таблица 4.42

Предел прочности клеевого соединения образцов на сдвиг с различными видами ферромагнитных наполнителей на основе карбамидной клеевой КОМПОЗИЦИИ

№ п/п	Вид клея	Наполнитель	Размер фракций	Максимальная нагрузка, F	Касательное напряжение, τ
1	карбамидный КФ-МТ-15	каолин	50 мкм	1028 Н	5,1 МПа
2		ферромагнитные опилки из стали Fe 95%	250 мкм	681 Н	3,4 МПа
3		измельченные окатыши обожженные Fe_2O_3	250 мкм	530 Н	2,6 МПа
4		измельченные окатыши не обожженные Fe_2O_3	250 мкм	589 Н	2,9 МПа
5		порошок ферромагнитный Fe 90%	250 мкм	868 Н	4,3 МПа
6		ферромагнитная сечка из стальной проволоки	330 мкм	566 Н	2,8 МПа

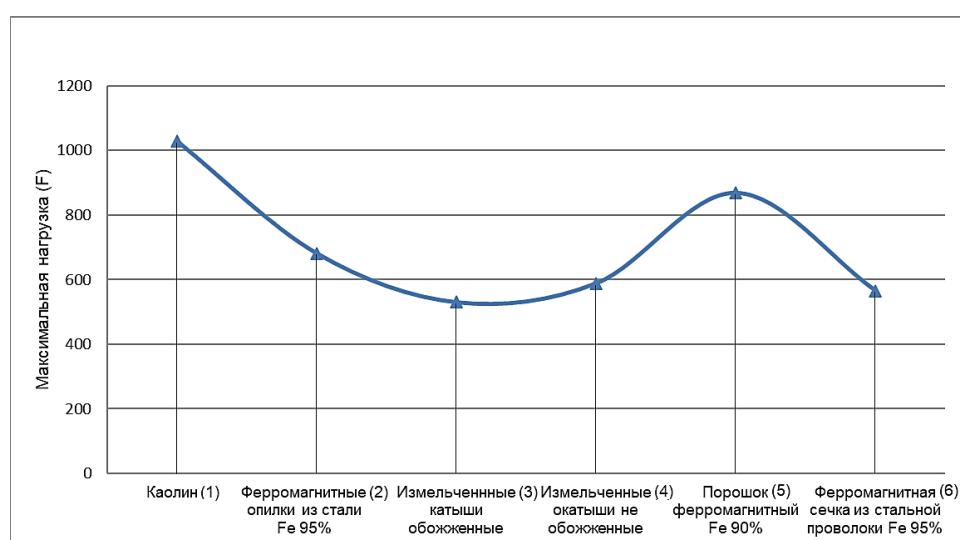


Рис. 4.46 Прочность клеевого соединения образцов на сдвиг с различными видами ферромагнитных наполнителей на основе карбамидной клеевой КОМПОЗИЦИИ

Определили предел прочности клеевого шва образцов шпона на сдвиг с различными видами ферромагнитных наполнителей на основе эпоксидной клеевой композиции (рис. 4.47-4.56).

Таблица 4.43

Предел прочности клеевого соединения образцов шпона на сдвиг
с наполнителем из каолина

№ образца шпона	Наполнитель	Размер фракций	Максимальная нагрузка, F	Касательное напряжение, τ
01Э	каолин	50 мкм	955 Н	4,7 МПа
02Э			907 Н	4,5 МПа
03Э			823 Н	4,1 МПа
04Э			812 Н	4 МПа
05Э			864 Н	4,3 МПа

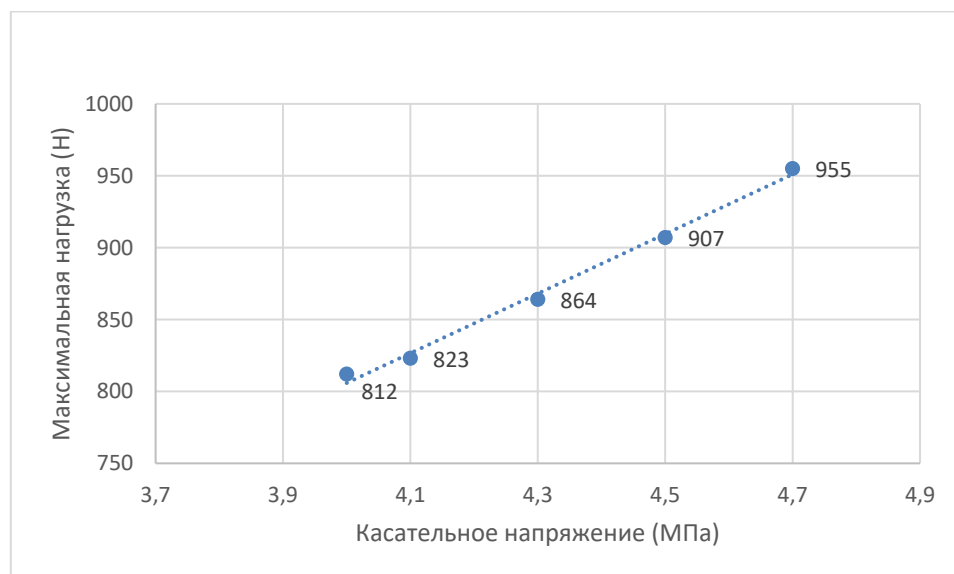


Рис. 4.47 Прочность клеевого соединения образцов шпона на сдвиг
с наполнителем из каолина

Таблица 4.44

Предел прочности клеевого соединения образцов шпона на сдвиг
с наполнителем из ферромагнитных опилок

№ образца шпона	Наполнитель	Размер фракций	Максимальная нагрузка, F	Касательное напряжение, τ
01ЭФО	ферромагнитные опилки из стали Fe 95%	250 мкм	582 Н	2,9 МПа
02ЭФО			571 Н	2,8 МПа
03ЭФО			546 Н	2,7 МПа
04ЭФО			560 Н	2,8 МПа
05ЭФО			602 Н	3,0 МПа

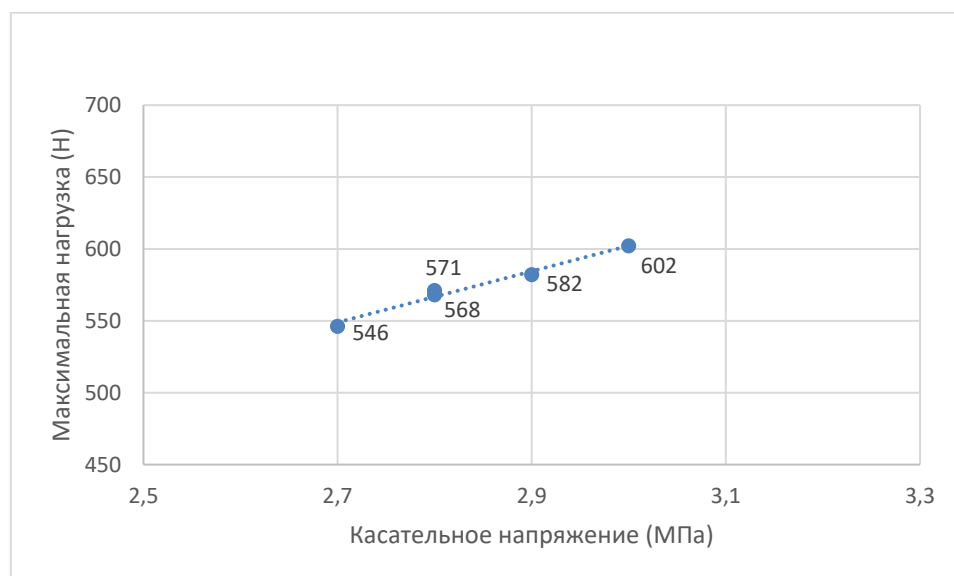


Рис. 4.48 Прочность клеевого соединения образцов шпона на сдвиг
с наполнителем из ферромагнитных опилок

Таблица 4.45

Предел прочности клеевого соединения образцов шпона на сдвиг
с наполнителем из окатышей не обожженных

№ образца шпона	Наполнитель	Размер фракций	Максимальная нагрузка, F	Касательное напряжение, τ
01ЭОН	измельченные окатыши обожженные Fe_2O_3	250 мкм	382 Н	1,9 МПа
02ЭОН			413 Н	2,0 МПа
03ЭОН			474 Н	2,3 МПа
04ЭОН			361 Н	1,8 МПа
05ЭОН			423 Н	2,1 МПа

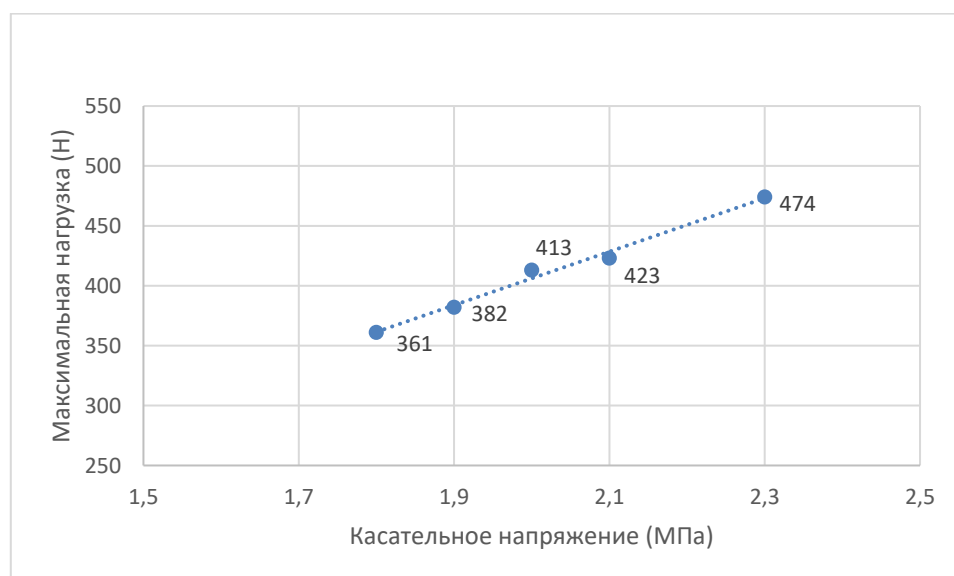


Рис. 4.49 Прочность клеевого соединения образцов шпона на сдвиг
с наполнителем из измельченных окатышей обожженных

Таблица 4.46

Предел прочности клеевого соединения образцов шпона на сдвиг
с наполнителем из окатышей обожженных

№ образца шпона	Наполнитель	Размер фракций	Максимальная нагрузка, F	Касательное напряжение, τ
01Э00	измельченные окатыши не обожженные Fe_2O_3	250 мкм	1229 Н	6,1 МПа
02Э00			892 Н	4,4 Н
03Э00			1005 Н	5,0 Н
04Э00			734 Н	3,6 Н
05Э00			982 Н	4,9 Н

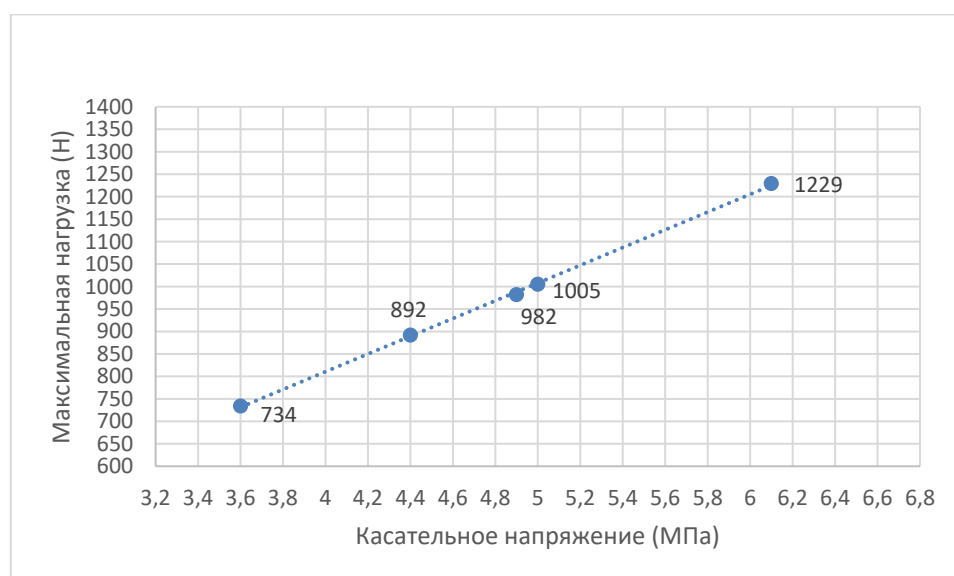


Рис. 4.50 Прочность клеевого соединения образцов шпона на сдвиг
с наполнителем из измельченных окатышей не обожженных

Таблица 4.47

Предел прочности клеевого соединения образцов шпона на сдвиг
с наполнителем из порошка ферромагнитного

№ образца шпона	Наполнитель	Размер фракций	Максимальная нагрузка, Н	Касательное напряжение, τ
01ЭФП	порошок ферромагнитный Fe 90%	250 мкм	604 Н	3,0 МПа
02ЭФП			675 Н	3,3 МПа
03ЭФП			552 Н	2,7 МПа
04ЭФП			583 Н	2,9 МПа
05ЭФП			628 Н	3,1 МПа

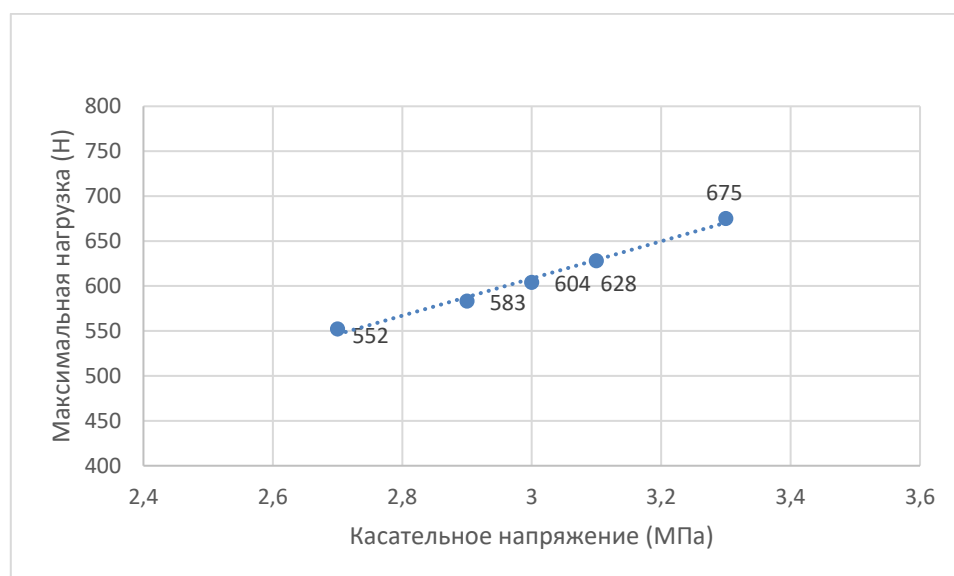


Рис. 4.51 Прочность клеевого соединения образцов шпона на сдвиг
с наполнителем из порошка ферромагнитного

Таблица 4.48

Предел прочности клеевого соединения образцов шпона на сдвиг
с наполнителем из ферромагнитной сечки

№ образца шпона	Наполнитель	Размер фракций	Максимальная нагрузка, F	Касательное напряжение, τ
01ЭФС	ферромагнитная сечка из стальной проволоки	330 мкм	592 Н	2,9 МПа
02ЭФС			605 Н	3,0 МПа
03ЭФС			537 Н	2,6 МПа
04ЭФС			654 Н	3,2 МПа
05ЭФС			572 Н	2,8 МПа

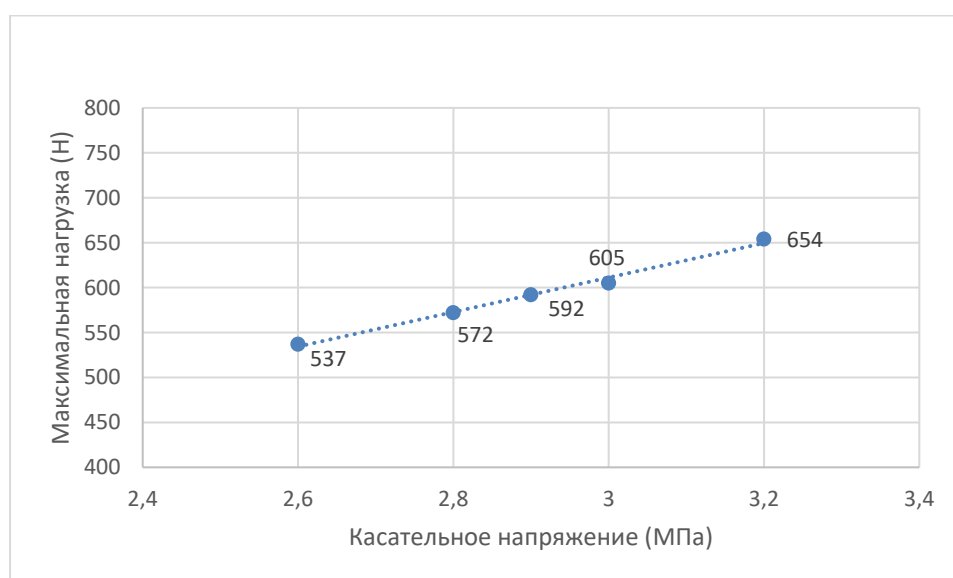


Рис. 4.52 Прочность клеевого соединения образцов шпона на сдвиг
с наполнителем из ферромагнитной сечки

Таблица 4.49

Предел прочности клеевого соединения образцов на сдвиг с различными видами ферромагнитных наполнителей на основе эпоксидной клеевой композиции

№ п/п	Вид клея	Наполнитель	Размер фракций	Максимальная нагрузка, F	Касательное напряжение, τ
1	эпоксидный ЭДП	каолин	50 мкм	955 Н	4,7 МПа
2		ферромагнитные опилки из стали Fe 95%	250 мкм	602 Н	3,0 МПа
3		измельченные окатыши обожженные Fe_2O_3	250 мкм	474 Н	2,3 МПа
4		измельченные окатыши не обожженные Fe_2O_3	250 мкм	1229 Н	6,1 МПа
5		порошок ферромагнитный Fe 90%	250 мкм	675 Н	3,3 МПа
6		ферромагнитная сечка из стальной проволоки	330 мкм	654 Н	3,2 МПа

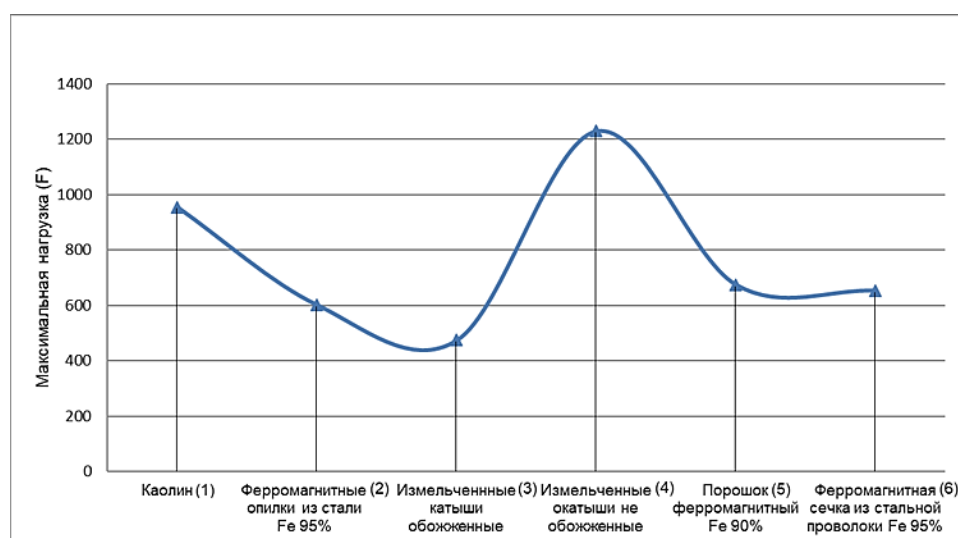


Рис. 4.53 Прочность клеевого соединения образцов на сдвиг с различными видами ферромагнитных наполнителей на основе эпоксидной клеевой композиции

Как следует из графиков, наибольшая прочность клеевого соединения при испытаниях на сдвиг наблюдается у образцов шпона, склеенных композицией с наполнителем из порошка Fe 90% [69].

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 [68].

Выводы по главе:

На основании анализа результатов экспериментов склеивания образцов шпона можно сделать следующие выводы:

1. Время полимеризации клеевого шва зависит от частоты тока индукционной установки. Выбор оптимальной частоты тока индукционной установки способствует максимальному нагреву клеевого соединения.

2. Вид ферромагнитного наполнителя, вводимого в клеевую композицию, оказывает большое влияние на время отверждения клеевого соединения.

3. Применение в качестве ферромагнитного наполнителя ферромагнитных опилок из стали, окатышей не обожженных, ферромагнитной сечки из стальной проволоки позволяет интенсифицировать процесс склеивания древесины, сократить время полимеризации клеевого шва.

5 СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ФАНЕРЫ НА УЧАСТКЕ ФОРМИРОВАНИЯ ПАКЕТА ШПОНА

5.1 Технология бесконтактного нагрева клеевой композиции

Одним из основных показателей качества склеивания изделий из древесины является прочность клеевого соединения при достаточной скорости полимеризации клеевого шва, которое определяется температурой нагрева клеевой композиции.

В существующих технологиях производства фанеры при формировании пакета шпона, подвод тепла в клеевую композицию осуществляется от постоянно нагреваемых плит пресса, кондуктивно через массив древесины шпона. При этом происходят промежуточная аккумуляция тепла в древесине и потери в окружающую среду, что увеличивает временной цикл прессования и склеивания фанеры. Наибольшее потребление тепловой энергии наблюдается при непрерывной работе пресса с учетом времени загрузки и выгрузки пакета шпона.

Предложено осуществлять локальный нагрев клеевой композиции в пакете шпона бесконтактным индукционным способом. В отличие от известных решений, нагрев клеевой композиции производят кратковременно, бесконтактно индукционным электромагнитным воздействием без промежуточных тепловых потерь в древесине. Для интенсификации процесса нагрева в клеевую композицию введен наполнитель из ферромагнитного материала, который под воздействием низкочастотного электромагнитного поля, создаваемого индуктором, нагревается, передавая тепло непосредственно в композицию. Это позволяет ускорить процесс полимеризации клеевого шва и повысить производительность прессового оборудования.

Алгоритм технологического процесса производства фанеры на участке прессования с индукционным нагревом клеевой композиции приведен на рис 5.1.

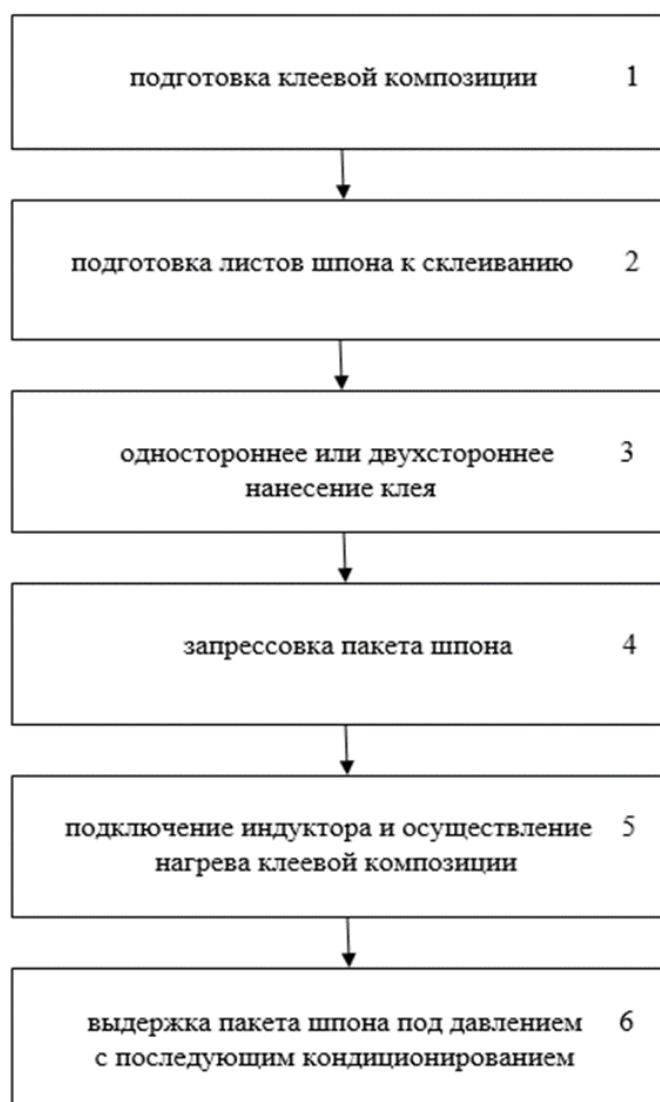


Рис. 5.1 Блок-схема алгоритма технологического процесса формирования пакета шпона в прессе с индукционным нагревом клеевой композиции

Клеевая композиция создается на основе карбамидной смолы КФ-МТ-15. В состав клеевой композиции входят каолин и ферромагнитный измельченный материал. Ферромагнитный материал готовят из ферромагнитных окатышей – гранулированного рудного концентрата, продукта обогащения железосодержащих руд [67,119].

Окатыши измельчают до фракционного состава 250 мкм, содержание Fe 65 – 70 %. Вводят в композицию в количестве 1,5 мас.ч. на 100 мас.ч. карбамидной смолы и перемешивают под воздействием электромагнитного поля для равномерного распределения по всему объему смолы. Отвердитель - сульфат аммония в количестве 1,5 мас.ч. на 100 мас.ч. смолы. Патент №RU 2715840 (рис. 5.2 а).

Наносят клеевую композицию на лист шпона, формируют пакет из шпона и помещают в пресс, оборудованный устройством для индукционного нагрева клеевого шва в пакете шпона. Проводят подпрессовку пакета под давлением 1,8-2,2 МПа, одновременно подключают индуктор, создавая электромагнитное поле в клеевом шве. Под воздействием электромагнитного поля в ферромагнитных фрагментах наполнителя образуются локальные зоны нагрева, которые активизируют полимеризацию всего термореактивного адгезива. В клеевом шве происходит термоактивная реакция и ускоряется полимеризация смолы. Подключение индуктора производят периодически с определенным временным интервалом. Выдерживают пакет шпона в прессе под давлением с последующим кондиционированием. После окончания цикла формирования пакета шпона пресс разгружают.

5.2 Новые технические конструкции прессового оборудования

Для склеивания и формирования пакета шпона предложены три варианта конструкций пресса. Патент №RU 2832342, №RU 2823654, №RU 2833904 (рис. 5.2 б, в, г):

1. с индукционным нагревом непосредственно клеевой композиции в пакете шпона;
2. с комбинированным индукционным нагревом полупакета шпона с клеевой композицией и ферромагнитного аккумулятора тепла;
3. с комбинированным индукционным нагревом профилированного пакета шпона с клеевой композицией и ферромагнитного аккумулятора тепла



а

б

в

г

Рис. 5.2 Патенты на изобретения

а – RU 2715840 C1 «Способ склеивания древесины»;

б – RU 2832342 C1 «Пресс для склеивания шпона»;

в – RU 2823654 C1 «Пресс для склеивания листов шпона»;

г – RU 2833904 C1 «Пресс для склеивания профильных изделий из шпона»

Пресс для склеивания шпона ферромагнитной клеевой композицией, выполнен с установленными одна над другой плитами из немагнитного материала с нагревательными элементами (рис. 5.3 а, б). Нагревательный элемент выполнен в виде многовиткового овального индуктора из гибкого

проводника 3. Прямолинейные участки витков индуктора размещены в верхней и нижней ферромагнитных плитах пресса, а гибкие торцовые петлевые участки витков индуктора вынесены за боковые поверхности плит и позволяют обеспечить взаимное вертикальное перемещение плит при загрузке, запрессовке и выгрузке пакета шпона. При этом нагрев ферромагнитной клеевой композиции осуществляется бесконтактно в продольном низкочастотном магнитном поле индуктора без потерь тепла в объеме древесины пакета шпона.

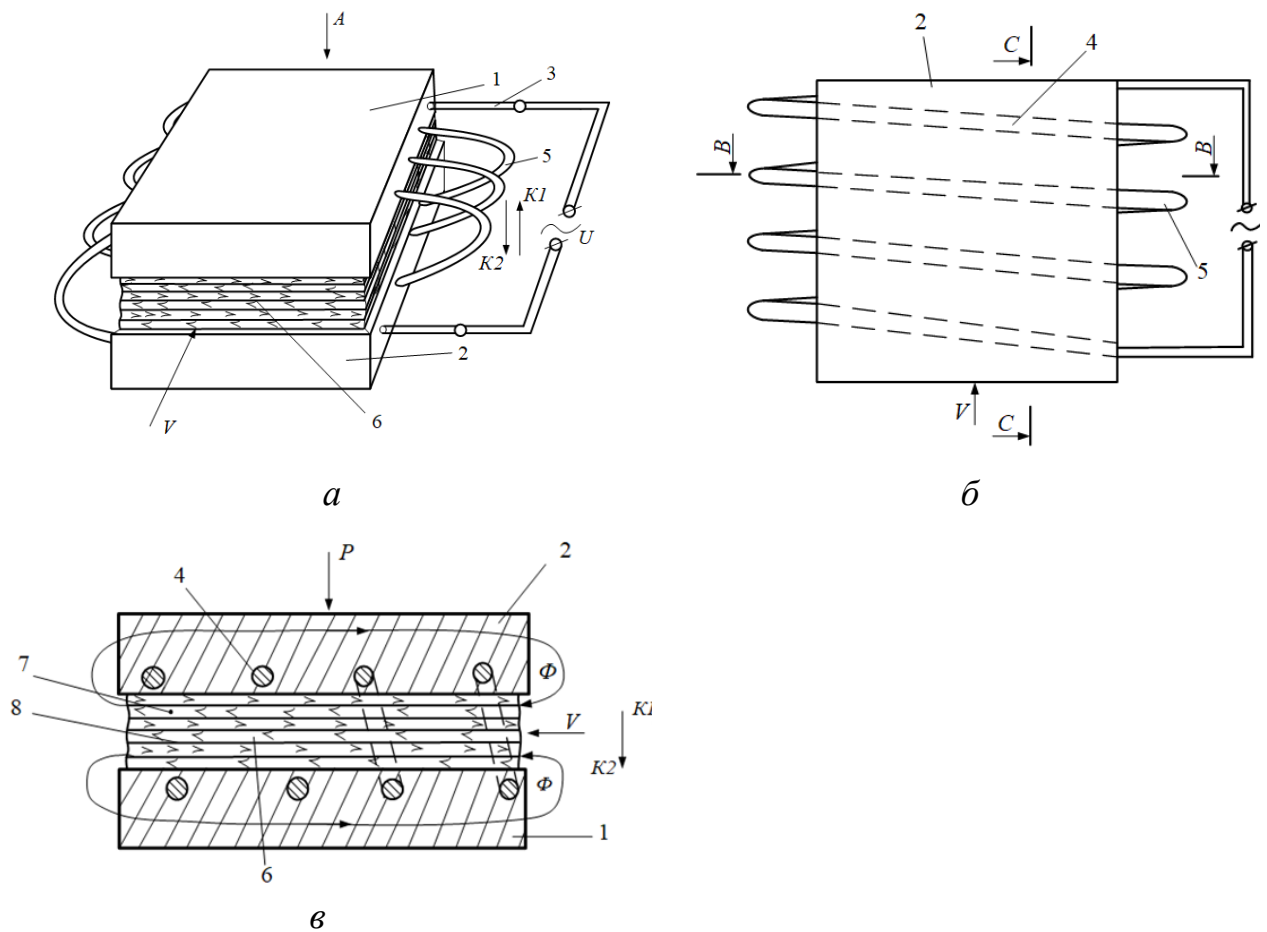


Рис. 5.3 Пресс с индукционным нагревом
ферромагнитной клеевой композиции в пакете шпона

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

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

Подвижные плиты 1,2 выполнены из немагнитного материала (алюминий и пр.). В плитах размещен многовитковый овальный индуктор 3, создающий магнитный поток Φ . Индуктор выполнен из витков гибкого проводника (гибкий одножильный многопроволочный кабель). Витки индуктора имеют прямолинейные 4 и торцовые петлевые 5 участки. Прямолинейные участки закреплены неподвижно в плитах пресса, а гибкие торцовые участки вынесены за боковую поверхность плит и не ограничивают взаимное перемещение плит при работе пресса.

Магнитный поток Φ проходит через пакет шпона 6, сформированный из листов шпона 7 с нанесенной на них ферромагнитной клеевой композицией 8 и обеспечивает избирательный нагрев ферромагнитной клеевой композиции в продольном низкочастотном магнитном поле без непосредственного нагрева древесины с одновременным формированием и полимеризацией клеевого соединения (рис. 5.3 в).

Работа пресса осуществляется в следующей последовательности. Плиты пресса с нагревательными элементами разводят в направлении $K1$ с образованием свободного межплитного пространства, ограниченного витками индуктора, в которое загружают сформированный из листов шпона с нанесенной ферромагнитной клеевой композицией пакет 6 в направлении V .

После этого плиты сводят в направлении $K2$ и обеспечивают подпрессовку и выдержку пакета шпона под давлением P . Гибкие подвижные торцовые петлевые участки 5 витков, вынесенные за боковую поверхность плит, обеспечивают возможность соосного перемещения плит. Подключают индуктор к низкочастотному источнику питания U , при этом создается переменное низкочастотное магнитное поле, в которое помещен пакет шпона с ферромагнитной клеевой композицией.

Вызванные переменным магнитным потоком Φ в ферромагнитной клеевой композиции 8 вихревые токи непосредственно нагревают композицию без тепловых потерь в массиве древесины пакета шпона и

запускается процесс полимеризации композиции, происходит формирование клеевого соединения. По завершении процесса полимеризации индуктор отключают, кондиционируют пакет шпона под давлением в течение технологически нормированного промежутка времени, разводят плиты и пакет склеенного шпона выгружают из пресса [120].

По второму варианту, пресс с комбинированным нагревом пакета шпона для склеивания термореактивной клеевой композицией (рис. 5.4 *а, б*) содержит установленные одна над другой плиты с дополнительными нагревательными элементами. Плиты изготовлены из инертного материала. Нагревательные элементы выполнены в виде тонких плоских пластин из ферромагнитного материала и размещены между полупакетами из листов шпона контактно с лицевой поверхностью граничных листов полупакета шпона.

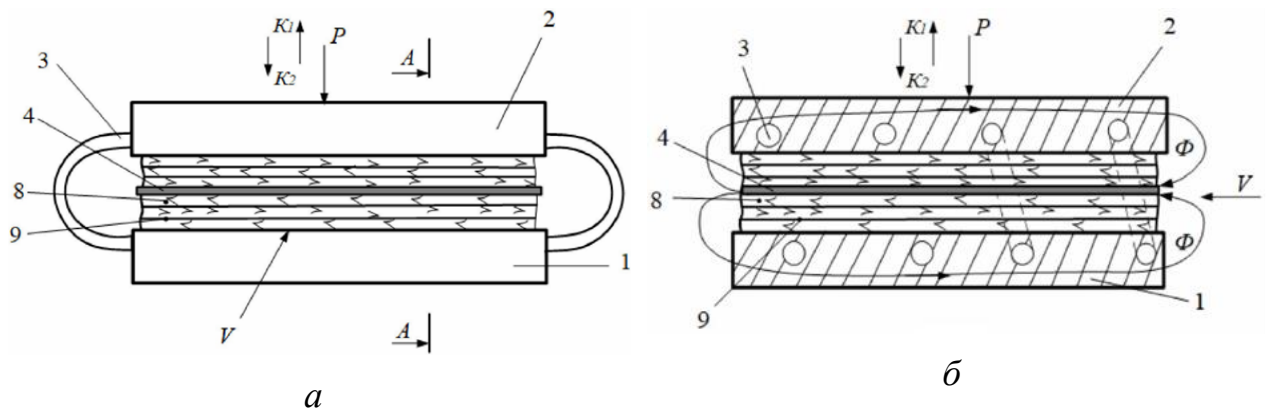


Рис. 5.4 Пресс с комбинированным нагревом пакета шпона

а – общий вид; *б* – разрез А-А

1,2 – верхняя и нижняя подвижные плиты; 3 – многовитковый овалный индуктор; 4 – нагревательный элемент; 8 – полупакет шпона

Нагрев пластин осуществляется бесконтактно, одновременно с нагревом ферромагнитной клеевой композиции в полупакетах шпона в магнитном поле многовиткового овалного индуктора, размещенного в плитах пресса. Теплопередача от пластин в термореактивную клеевую композицию дополнительно осуществляется через массив листов шпона в

полупакете. Это обеспечивает равномерно распределенное тепловое воздействие на термореактивную клеевую композицию по объему полупакета шпона.

Магнитный поток Φ проходит через дополнительные нагревательные элементы 4-6, выполненные в виде тонких плоских пластин из ферромагнитного материала, размещенные между полупакетами 7 из листов шпона 8 контактно с лицевой поверхностью граничных листов полупакета шпона, что обеспечивает избирательный индукционный нагрев ферромагнитных пластин в продольном низкочастотном магнитном поле с последующей теплопередачей от нагретых пластин в термореактивную клеевую композицию 9 через массив древесины листов шпона (рис. 5.7 а, б).

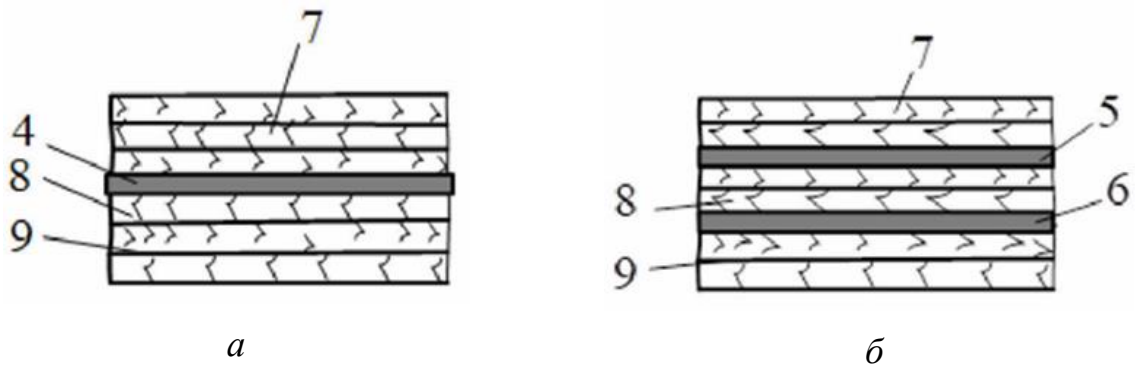


Рис. 5.7 Размещение нагревательных ферромагнитных пластин в пакете шпона

а – один нагреватель; б – два нагревателя

Работа прессы осуществляется в следующей последовательности. Формируют пакет шпона из двух и более полупакетов. Между полупакетами помещают нагревательные элементы в виде тонких плоских пластин из ферромагнитного материала таким образом, чтобы они контактировали с лицевой поверхностью граничных листов шпона.

На лицевую поверхность полупакета шпона клеевая композиция не наносится, поэтому адгезивного взаимодействия между нагревательным элементом и лицевой поверхностью листа шпона не происходит. Плиты

пресса с индуктором предварительно разведены в направлении $K1$ с образованием свободного межплитного пространства, ограниченного витками индуктора, в которое загружают по направлению V сформированный из листов шпона с нанесенной термореактивной клеевой композицией пакет с размещенными между полупакетами нагревательными элементами.

После этого плиты сводят в направлении $K2$ и обеспечивают технологическую подпрессовку и выдержку пакета шпона под давлением P . Подключают индуктор к низкочастотному источнику питания, при этом в межплитном пространстве создается переменное низкочастотное магнитное поле, в которое помещен пакет шпона с термореактивной клеевой композицией и нагревательными элементами. Вызванные переменным магнитным потоком Φ в ферромагнитных плоских нагревательных элементах вихревые токи непосредственно нагревают пластины без тепловых потерь в массиве древесины пакета шпона.

Теплопередача от нагретых пластин в термореактивную ферромагнитную клеевую композицию осуществляется кондуктивно через древесину листов шпона с одновременным индукционным нагревом термореактивной ферромагнитной клеевой композиции, запускается процесс полимеризации, происходит формирование клеевого соединения. По завершении процесса полимеризации индуктор отключают, кондиционируют пакет шпона под давлением в течение технологически нормированного промежутка времени, разводят плиты и пакет склеенного шпона выгружают из пресса, разбирают на полупакеты и свободно извлекают плоские нагревательные элементы.

После отключения индуктора, аккумулированное тепло в пластине передается в течении определенного времени в клеевой шов. При этом выравниваются термические напряжения в клеевом соединении [121].

По третьему варианту, пресс для склеивания профильных изделий из шпона с термореактивной клеевой композицией содержит установленные одна над другой плиты с профильными пресс-формами, контактные нагревательные элементы, расположенные по обе стороны пакета шпона, выполненные в виде тонколистовых цельных или составных пластин из ферромагнитного материала.

Профиль поверхности пластин соответствует рельефу поверхности пресс-форм. Пластины нагревают бесконтактно в электромагнитном поле петлевого индуктора, установленного в плитах или пресс-формах пресса, выполненных из немагнитного материала. Передача тепла от пластин к термореактивной клеевой композиции осуществляется контактно и бесконтактно непосредственно в клеевой шов через массив древесины шпона (рис. 5.8).

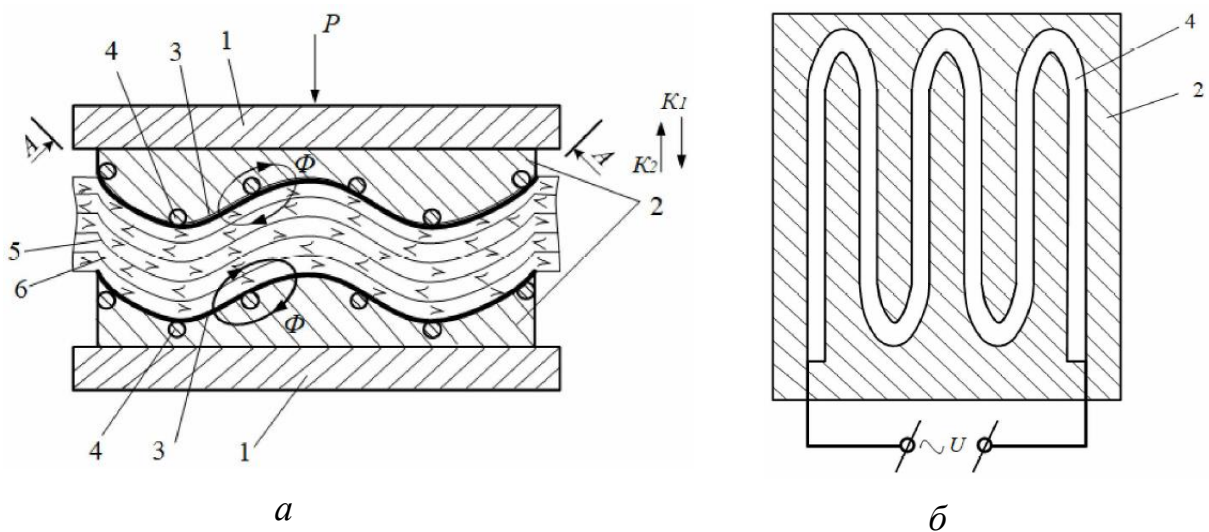


Рис. 5.8 Пресс с комбинированным индукционным нагревом
профильного пакета шпона и клеевой композиции

а – 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

Пресс включает верхнюю и нижнюю плиты 1 с установленными на них пресс-формами 2 (на верхней подвижной плите - пуансон, на нижней неподвижной - матрица) из немагнитного материала (алюминий и пр.). На поверхность пресс-форм устанавливают профилированные нагревательные элементы 3 в виде тонколистовых цельных или составных пластин из ферромагнитного материала, профиль поверхности пластин соответствует рельефу поверхности пресс-форм.

В пресс-формах размещены петлевые индукторы 4, подключенные к низкочастотному источнику питания U , создающие магнитные потоки Φ , которые проходят через нагревательные элементы, что обеспечивает избирательный бесконтактный нагрев ферромагнитных пластин в поперечном низкочастотном магнитном поле с последующей контактной теплопередачей от нагретых пластин в термореактивную клеевую композицию 5 через массив древесины листов 6 шпона.

Работа пресса осуществляется в следующей последовательности. Верхнюю плиту пресса с пуансоном поднимают (направление $K1$) с образованием свободного межплитного пространства. Формируют пакет шпона из листов шпона с нанесенной термореактивной клеевой композицией и укладывают его на матрицу, имеющую профиль формируемой детали.

После этого верхнюю плиту с пуансоном опускают (направление $K2$), обеспечивают обжим пакета по профилю пресс-форм и технологическую подпрессовку пакета шпона под давлением P , подключают индуктор к низкочастотному управляемому источнику питания U . При этом в межплитном пространстве создается регулируемое переменное низкочастотное магнитное поле индуктора, в котором находятся профильные нагревательные элементы и пакет шпона с термореактивной клеевой композицией.

Вызванные переменным магнитным потоком Φ в ферромагнитных нагревательных элементах вихревые токи непосредственно нагревают

пластины без тепловых потерь в плитах, пресс-формах и массиве древесины пакета шпона. Теплопередача от нагретых пластин в термореактивную клеевую композицию осуществляется контактно через древесину листов шпона и запускается процесс полимеризации нагреваемой клеевой композиции, происходит формирование клеевого соединения.

По завершении процесса полимеризации индуктор отключают, кондиционируют пакет шпона в прессе под давлением в течение технологически нормированного промежутка времени, поднимают плиту с пуансоном и пакет сформированного и профилированного изделия из шпона выгружают из пресса [122].

Таким образом предложенные технические решения позволяют интенсифицировать процесс склеивания шпона, обеспечить локальный подвод тепла в клеевой шов и равномерное регулирование теплового воздействия на термореактивную клеевую композицию.

5.3 Экономический эффект от снижения энергопотребления на участке прессования

Сравнительный расчет выполнен для теплоносителей водяного пара и электричества на 1 м³ продукции при кондуктивном, омическом, индукционном нагреве пакета шпона при склеивании.

В технологическом процессе производства фанеры обогрев плит пресса производится паром. Паропроизводительность 100-300 кг/м³. Температура прессования 110-130 °С. Мощность нагревательных элементов 18-115 кВт [78].

Расход пара на склеивание пакета шпона приведен в таб. 5.1. Для пакета березового шпона толщиной 3-9 мм расход пара на склеивание 250-100 кг/м³.

Таблица 5.1

Порода	Расход пара на нагрев при склеивании пакета шпона				
	Расход пара, кг/м ³ , на склеивание пакета шпона толщиной, мм				
	3	4	5	6	9
Береза	250	230	200	150	100

Энергетическое содержание пара примерно равно 9,769 кВтч на 1 м³.

$$N = 250 \text{ кг/м}^3 * 9,769 \text{ кВтч/м}^3 = 2442,25 \text{ кВтч/м}^3,$$

$$N = 230 \text{ кг/м}^3 * 9,769 \text{ кВтч/м}^3 = 2246,87 \text{ кВтч/м}^3,$$

$$N = 200 \text{ кг/м}^3 * 9,769 \text{ кВтч/м}^3 = 1953,80 \text{ кВтч/м}^3,$$

$$N = 150 \text{ кг/м}^3 * 9,769 \text{ кВтч/м}^3 = 1465,35 \text{ кВтч/м}^3,$$

$$N = 100 \text{ кг/м}^3 * 9,769 \text{ кВтч/м}^3 = 976,90 \text{ кВтч/м}^3,$$

Энергопотребление на склеивание пакета шпона кондуктивным способом от 2442,25 до 976,90 кВтч/м³.

Производительность парового пресса для горячего склеивания фанеры, м³/смен, определена по формуле:

$$Q_{\text{см}} = \frac{TnmSFk}{(T_{\text{п}} + T_{\text{н}})}, \quad (5.1)$$

где T – продолжительность рабочей смены, мин;

n – число рабочих промежутков пресса;

m – число листов фанеры загружаемых в один промежуток;

S – толщина фанеры, мм;

F – площадь одного обрезного листа фанеры, м²;

k – коэффициент использования рабочего времени (равен $0,95 \div 0,98$);

$T_{\text{н}}$ – время прессования (термообработки) фанеры в прессе, мин;

$T_{\text{с}}$ – время на вспомогательные операции, мин;

$$Q = \frac{480 * 2 * 5 * 3 * 2,4 * 0,95}{(2,5 + 2) * 1000} = 7,2 \text{ м}^3/\text{смен},$$

Производительность парового пресса для склеивания фанеры, м³/ч, определена по формуле:

$$Q_{\text{час}} = \frac{60K_{\text{р}}n_{\text{эт}}n_{\text{л}}lbS_{\text{ф}}}{t_{\text{ц}}}, \quad (5.2)$$

где $K_{\text{р}}$ – коэффициент рабочего времени, $K_{\text{р}} = 0,95$;

$n_{\text{эт}}$ – число этажей пресса;

$n_{\text{л}}$ – число листов фанеры в промежутке пресса;

l, b – длина и ширина обрезного листа фанеры, м.

$S_{\text{ф}}$ – толщина фанеры, м;

$t_{\text{ц}}$ – время цикла прессования, мин;

$$Q_{\text{час}} = \frac{60 * 0,95 * 2 * 5 * 1,5 * 1,5 * 3}{4500} = 0,85 \text{ м}^3/\text{час},$$

Для расчета паропроизводительности выбираем пресс марки НПФ 0339 с установленной мощностью 18,5 кВт. Технические характеристики приведены в таб. 5.2.

Таблица 5.2

Технические характеристики прессов для склеивания фанеры

Параметры	НПФ 0339	ДА 4438	Д4038 Д	4042 Ф1
Усилие пресса, мН	8,0	6,3	6,3	16,0
Давление прессования, МПа	2,3	2,2	2,5	3,0
Число этажей	14	20	20	20
Размер плит, м	2,55×1,35	1,65×1,75	1,65×1,75	3,3×1,7
Размер плит, м ²	3,44	2,88	2,88	5,61
Толщина греющих плит, мм	45	45	45	-
Высота рабочего промежутка, мм	80	70	70	110
Установленная мощность, кВт	18,5	96,5	115	-
Размеры пресса (L×B×H), м	10,4×8,5 ×6,6	9,33×8,0× 5,15	11,0 × 8,7× 4,8	17,5 × 3,8× 6,0
Масса, т	-	73	95	123,5

Количество потребляемой энергии паровым прессом за смену:

$$N = 18,5 \text{ кВт} * 8 \text{ ч} = 148 \text{ кВтч},$$

Расход энергопотребления на производство фанеры при кондуктивном нагреве клеевой композиции составит:

$$N = 7,2 \text{ м}^3 * 148 \text{ кВтч} = 1065 \text{ кВтч/м}^3.$$

На практике, для обогрева пресс-форм применяются плиты нагревательные омические номинальной мощностью 3-22 кВт (таб. 5.3).

Таблица 5.3

Характеристики плит нагревательных омических

Наименование	Номинальное напряжение, В	Мощность номинальная, кВт	Максимальная рабочая температура, °С	Разброс температур на рабочей поверхности
ПН-400×400	220	3,0	250	±3
ПН-500×500	220	4,0	250	±3
ПН-600×600	220	6,0	250	±3
ПН-600×800	220	8,0	250	±3
ПН-600×1200	220	12,0	250	±3
ПН-800×800	380	16,0	250	±3
ПН-1000×1000	380	20,0	250	±3
ПН-1200×1200	380	22,0	250	±3

Расход электроэнергии при омическом нагреве на 1 м³ фанеры в кВтч/м³ приведен в таб. 5.4.

Таблица 5.4

Расход электроэнергии на производство 1 м³ фанеры, кВтч/м³

Продукция	Расход электроэнергии
Фанера ФК, ФСФ	78
Фанера ФК, экспортная	112
Фанера БС-1, БП-1	91
Бакелизированная фанера	146
Плиты фанерные	86
Обезличенная фанера	82
Столярные плиты	90

Расход энергопотребления на производство фанеры ФК при омическом нагреве клеевой композиции составит:

$$N = 7,2 \text{ м}^3 * 78 \text{ кВтч} = 561 \text{ кВтч/м}^3.$$

При использовании индукционного нагрева клеевой композиции продолжительность включения установки 10-2 минуты, в зависимости от подведенной мощности. Включение осуществляют 3-6 раза в час. Индукционный нагрев импульсный (рис. 5.9).

Количество потребляемой энергии с подведенной мощностью 6 кВт, при работе за смену в течении 2 часов:

$$N = 6 \text{ кВт} * 2 \text{ ч} = 12 \text{ кВтч},$$

Расход энергопотребления на производство фанеры при индукционном нагреве клеевой композиции составит:

$$N = 7,2 \text{ м}^3 * 12 \text{ кВтч} = 86,4 \text{ кВтч/м}^3.$$

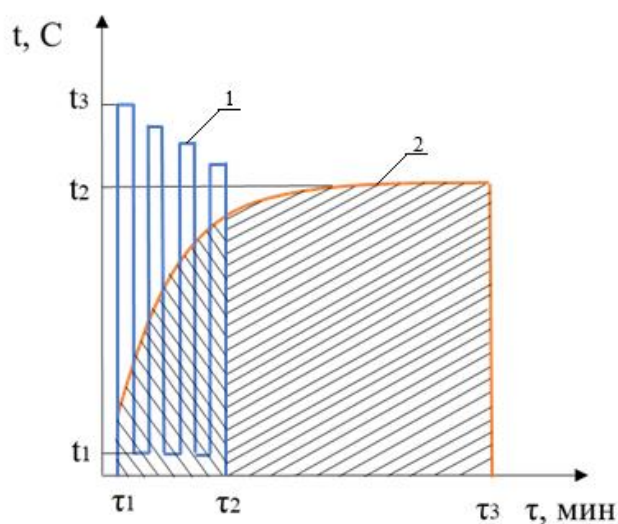


Рис. 5.9 Энергопотребление процесса производства фанеры

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

Сравнительные показатели энергопотребления процесса производства фанеры на 1 м^3 на участке прессования при средней стоимости электроэнергии 10 руб. за 1 киловатт/час приведены в таб. 5.5.

Таблица 5.5
Энергопотребление процесса производства фанеры на 1 м^3

Вид нагрева	Энергопотребление (руб.)
кондуктивный	10650
омический	5610
индукционный	864

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

Применение технических решений конструкций прессов в технологии производства фанеры позволяет уменьшить рабочий цикл, обеспечить подвод тепла непосредственно в клеевую ферромагнитную композицию без потерь в материале, уменьшить энергозатраты, увеличить производительность и эффективность технологического процесса склеивания.

ОБЩИЕ ВЫВОодЫ 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 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 может быть увеличена в 8-12 раз.

Список литературы

1. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – М.: Наука, 1976. – 280с.
2. Азаров В. И. Химия древесины и синтетических полимеров: учебник для вузов / В.И. Азаров, А.В. Буров, А.В. Оболенская. - СПб.: СПбЛТА, 1999. - 628 с.
3. Бабат, Г.И. Индукционный нагрев металлов и его промышленное применение / Г.И. Бабат. - М. - Л.:Энергия, 1965. - 552 с.
4. Балакин М.И., Соболев А.В. Технологические расчеты в производстве клееных материалов на шпоновой основе. - М.: МГУЛ, 2003. - 103 с.
5. Берлин А.А., Басин В.Е. Основы адгезии полимеров. М.: «Химия», 1969. - 320 с.
6. Бессонов, Л.А. Теоретические основы электротехники: электрические цепи:учеб. для студентов электротехнических, энергетических и приборостроительных специальностей вузов / Л.А. Бессонов. - 7-е изд. - М.: Высш. школа, 1978. - 528 с.
7. Бирюков В.Г. Исследование структуры клеевого шва фанеры методом микроскопии // Лесной журнал. - 1983. - № 6. - С. 67-70.
8. Бирюков В.Г. Теоретические исследования процесса проницаемости шпона смолой при склеивании фанеры // Лесной журнал. - 1983. - № 4. - С. 8084.
9. Бирюков В.Г. Технология клееных материалов и древесных плит. – Москва: ГОУ ВПО МГУЛ, 2005. – 220 с.
10. Белов П.А., Лурье С.А. Теория идеальных адгезионных взаимодействий. Механика композиционных материалов и конструкций, 2007. Том 13, № 4, С. 519-525.

11. Боровиков А.М., Уголев Б.Н. Справочник по древесине. – М.: Изд-во «Лесная промышленность», 1989. – 296 с.
12. Брутян К.Г. Изготовление карбамидоформальдегидных смол. Современные проблемы механической технологии древесины. Материалы Международной научно-практической конференции. СПб.: СПбГЛТА, 2010. - С. 98-100.
13. Брутян К.Г. Обоснование параметров режима склеивания древесно-стружечных плит низкой токсичности. Материалы Международной научно-практической конференции. Первичная обработка древесины: Лесопиление и сушка пиломатериалов. Состояние и перспективы развития. СПбГЛТА.: 2008. - С. 121-126.
14. Брутян К.Г., Варанкина Г.С., Глебов М.П. Новые наполнители для синтетических смол, применяемых в деревообработке. Деп. в ВИНТИ.М.: № 369-B2003. - 30 с.
15. Брутян К.Г., Варанкина Г.С., Федяев А.А. К вопросу о повышении прочности клеевых соединений. Первичная обработка древесины: Лесопиление и сушка пиломатериалов. Состояние и перспективы развития. Материалы Международной научно-практической конференции. СПб.: СПбГЛТА., 2007. - С. 58-62.
16. Брутян К.Г. Клеевая композиция. Патент на изобретение № 2245890 от 10 февраля 2005 г. / Брутян К. Г., Варанкина Г. С., Чубинский А. Н., Редков В. А., Кондратьев В. П., М.: Бюл. изобр. № 36 от 27.12.2011 г.
17. Варанкина Г.С. Формирование низкотоксичных клеевых древесных материалов / Варанкина Г.С., Чубинский А.Н. // Монография.- СПб.: Химиздат, 2014. - 148 с.
18. Варанкина Г.С., Чубинский А.Н. Технология процесса склеивания древесины: учебное пособие по дисциплине “Технология клеевых материалов и плит”. СПб.: СПбГЛТУ. – 2015. – 53 с.

19. Варанкина Г.С. Склеивание древесных клеёных материалов на основе малотоксичных клеевых композиций / Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. // Г. С. Варанкина. СПб.: СПбГЛТА, 2000. - 214 с.

20. Варанкина Г.С. Формирование низкотоксичных клееных древесных материалов. Текст диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. СПб.: СПбГЛТУ. 2015 - 201 с.

21. Варанкина Г.С., Денисов С.В., Челышева И.Н. Клеевая композиция для древесно-волоконистых плит. Патент на изобретение № 2213753 от 10 октября 2003./Варанкина Г. С., Денисов С. В., Челышева И. Н., М.: Бюл. изобр. № 28 от 10.10.2003 г.

22. Варанкина Г.С., Чубинский А.Н., Чаузов К.В. Классификация модификаторов и наполнителей карбамидо- и фенолоформальдегидных смол и клеев. Современные проблемы переработки древесины/ Материалы Международной научно-практической конференции. СПб.: СПбГЛТУ, 2014. – С. 30-36.

23. Винокуров А.А. Технология склеивания древесины модифицированными карбамидоформальдегидными клеями. Автореферат диссертации кандидата технических наук.- М: 2002. - 22 с.

24. Волынский В.Н. Технология клееных материалов: Учебное пособие для вузов. (2-е изд., исправленное и дополненное). – Архангельск: Изд-во Арханг. гос. техн. ун-та, 2003. – 280 с.

25. Воюцкий С.С. Аутогезия и адгезия высокополимеров.- М.: Гостехиз-дат, 1960. - 244 с.

26. Высоцкий А.В. Высокоэффективная добавка в карбамидоформальдегидные связующие для производства низкотоксичных древесностружечных плит / А. В. Высоцкий, Г. С. Варанкина, В. Г. Малютин // Деревообрабатывающая промышленность. - 1996. - № 4. - С. 22-23.

27. Глебов М.П. Анализ природных минеральных модификаторов для клеящих смол / М.П. Глебов, К.Г. Брутян // Первичная обработка древесины: Лесопиление и сушка пиломатериалов. Состояние и перспективы развития: матер. Междунар. науч.-практ. конф. - СПб.: СПбГЛТА, 2007. - С. 28-33.

28. Глебов М.П. Наполнители для производства низкотоксичных древесностружечных плит / М.П. Глебов, Г.С. Варанкина, К.Г. Брутян // Современные проблемы лесозаготовительных производств, производства материалов и изделий из древесины: пиломатериалы, фанера, деревянные дома заводского изготовления, столярно-строительные изделия: матер. Междунар. науч.-практ. конф. - СПб.: СПбГЛТА, 2009. - С. 109-113.

29. Глебов И.Т. Перспективное оборудование для склеивания древесины: Учебное пособие. – Екатеринбург: Урал.гос. лесотехн. ун-т, 2015. – 170 с.

30. Гмурман В.Е. Руководство к решению задач по теории вероятностей и математической статистике. - М.: Высшая школа, 2004. - 410 с.

31. ГОСТ 18992-80 «Дисперсия поливинилацетатная гомополимерная грубодисперсная. Технические условия»

32. ГОСТ 10632-2014 «Плиты древесностружечные. Технические условия»

33. Денисов С.В., Русаков Д.С. Эффективная технология склеивания хвойной фанеры модифицированными клеями // Труды Братского государственного технического университета. - Том 2. - Братск: ГОУ ВПО «БрГТУ», - 2004. - С. 56-61.

34. Дергачев П.А. Влияние некоторых технологических факторов при склеивании шпона на расход сырья // Рациональное и комплексное использование древесины в деревообрабатывающей промышленности. - Минск, 1974. - с. 86-88.

35. Дерягин Б.В., Кротова Н.А., Смилга В.П. Адгезия твердых тел. М., «Наука», 1973. - 280 с.

36. Долгих, И.Ю., Королёв А.Н., Захаров В.М. Моделирование динамики температурных процессов при индукционном нагреве / И.Ю. Долгих, А.Н. Королёв, В.М. Захаров // Вестник ИГЭУ. - 2014. - Вып. 5. - С. 57-63.

37. Доронин Ю.Г. и др. Катализатор отверждения для фенолоформальде-гидных смол. - в кн.: Новое в производстве фанеры и фанерной продукции. Сборник трудов ЦНИИФ. - М.: 1988. - С. 38-44.

38. Доронин Ю.Г., Кондратьев В.А. Малотоксичные фенолформальде-гидные смолы в деревообрабатывающей промышленности. Плиты и фанера. - ВНИИПИЭлеспром. Обзор информ. - М., 1978. - Вып.5. - 44 с.

39. Доронин Ю.Г., Кондратьев В.П. Основные направления модификации синтетических смол. Плиты и фанера. ВНИИПИЭлеспром. Обзор. Информ. - М., 1985. - Вып.4.- 44 с.

40. Доронин Ю.Г., Мирошниченко С.Н., Свиткина М.М. Синтетические смолы в деревообработке. - М.: Лесная промышленность, 1978. - 22 с.

41. Доронин Ю.Г., Кондратьев В.П., Синтетические смолы для производства фанеры и плит. Зарубежный опыт. Плиты и фанера. - ВНИИПИЭлеспром. Обзор. Информ.- М., 1985. - Вып.7. - С. 2 -21.

42. Зимон А. Д. Адгезия жидкости и смачивание. М., 1974. - 416 с.

43. Иванова Е.К. Применение клееных деревянных конструкций за рубежом. – М.: Центр научно-технической информации по гражданскому строительству и архитектуре, 1968. – 42 с.

44. Исаев С.П. Совершенствование оборудования и технологии подготовки листов шпона к склеиванию [Текст] / С. П. Исаев // Справочник. Инженерный журнал. - № 10(139). - 2008. - с. 40 - 42.

45. Исследование процессов прессования клееных материалов на основе модифицированных и наполненных смол. / Отв. исполнитель - Варанкина Г.С. Отчет по теме //. № г.р.01 2001 11397. - Братск: БрГТУ, 2001,-65 с.

46. Казакевич Т.Н. Склеивание хвойного шпона при пониженных температурах: Автореферат диссертации кандидата технических наук.- СПб.: СПбЛТА,1998. - 25 с.

47. Казакевич Т.Н., Куликов В.А., Денисов С.В. Клеевая композиция.- Авторское свидетельство. №1703671, 1991.Бюл. изобр. №1 от 07.01.92 г.

48. Калиткин Н.Н. Численные методы: учеб.пособие. – СПб.: БХВ-Петербург, 2011. – 592 с.

49. Ковальчук Л.М. Производство деревянных клееных конструкций. – М.: изд-во РИФ "Стройматериалы", 2005. – 336 с.

50. Ковальчук Л.М. Склеивание древесины в поле токов высокой частоты. – Москва; Ленинград: Гослесбумиздат, 1960. – 239 с.

51. Коврижных Л.П. Модификация синтетических смол для древесностружечных плит: обзорная информация / Л.П. Коврижных. - М.: ВНИПИЭИ-леспром, 1987. - 36 с.

52. Комаров Г.В. Клеи, адгезия, технология склеивания. Изд. - Профессия. - 2007. - 376 с.

53. Кондратьев В.П. Синтетические клеи для древесных материалов/ В.П. Кондратьев, В.И. Кондращенко. - М.: Научный мир, 2004. - 520 с.

54. Кондратьев В.П., Чубов А.Б., Соколова Е.Г. Новые виды эффективных клеев для производства водостойкой экологически чистой фанеры / В. П. Кондратьев, А. Б. Чубов, Е. Г. Соколова // Известия Санкт-Петербургской Лесотехнической академии. Выпуск 191, 2010.- С.169-179.

55. Кондратьев В.П., Чубов А.Б., Соколова Е.Г. Совершенствование эксплуатационных свойств и технологии фанеры повышенной водостойкости

/ В.П. Кондратьев, А.Б. Чубов, Е.Г. Соколова // Известия Санкт-Петербургской Лесотехнической академии. Выпуск 194, 2011.- С. 116-124.

56. Кондратьев В.П. Новые виды экологически чистых синтетических смол для деревообработки // Деревообрабатывающая промышленность.-2002. -№ 4. - С. 10-12.

57. Криворотова А.И. Исследование адгезионного взаимодействия жидкого клея с древесиной. Автореферат диссертации кандидата технических наук.- Красноярск: СибГТУ, 1999. - 20 с.

58. Крыжановский В.К. Технология полимерных материалов. - М.: Профессия, 2008. - 460 с.

59. Куликов В.А., Казакевич Т.Н. Ускорение процесса склеивания шпона за счет применения активного наполнителя для фенолоформальдегидного клея. Пути повышения эффективности деревообрабатывающих производств. Тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции молодых ученых и специалистов. - Архангельск, ЦНИИМОД. 1989,-с. 33-36.

60. Куликов В.А., Чубов А.Б. Технология клееных материалов и плит. Учебник для вузов. - М.: Лесная промышленность, 1984. - 344 с.

61. Куприенко Н.В. Статистические методы изучения связей. Корреляционно-регрессионный анализ. – СПб.: Изд-во политехн. ун-та, 2008. – 118 с.

62. Лавлинская О.В. Разработка клеевых композиций для производства фанеры пониженной токсичности. Автореферат кандидата технических наук. - Воронеж.: ГЛТА, 2004. - 22 с.

63. Леонович А.А. Технология древесных плит прогрессивные решения.- СПб.: ХИМИЗДАТ, 2005. - 208 с.

64. Луговская И.Г. Минералого-технологические критерии оценки тонкодисперсного рудного и нерудного сырья. Автореферат доктора геолого - минералогических наук. М.:ФГУП ВИМС, 2007 -48 с.

65. Малкин А.Я, Аскадский А.А, Коврига В.В. Методы измерения механических свойств полимеров. Москва, «Химия», 1978. - 336 с.

66. Матвеева Т.А. Изготовление художественных изделий из дерева. М.: Высшая школа, 1992. – 224 с. – ISBN: 5-06-002194-7.

67. Ключин Н.М., Мелехов В.И., Мюллер О.Д., Воронин А.М., Прохоров В.В., Тюрикова Т.В. «Упруго-деформационные характеристики прессованной древесной шихты» // Лесотехнический журнал №4 (32) / 2018. Воронеж: 2018. – 264 с. – с. 173-180.

68. Мелехов В.И., Соловьев И.И., Пономарева Н.Г., Прохоров В.В. «Бесконтактный нагрев ферромагнитных наполнителей клеевой композиции при склеивании древесины» // Системы. Методы. Технологии №4 (60) / 2023. Братск: 2023. – 200 с. – с. 155-160.

69. Мелехов В.И., Соловьев И.И., Прохоров В.В., Сазанова Е.В., Дужевский И.А., Пономарева Н.Г. «Тепловые и прочностные характеристики ферромагнитной клеевой композиции для склеивания древесины» // Системы. Методы. Технологии №1 (65) / 2025. Братск: 2025. – 186 с. – с. 108-116.

70. Монтгомери Д.К. Планирование эксперимента и анализ данных: Пер. с англ. – Л.: Судостроение, 1980. – 384 с.

71. Москвитин Н.И. Физико-химические основы процессов склеивания и прилипания. Лесная промышленность, 1974. - 144 с.

72. Мурзин В.С., Кантиева Е.В., Пономаренко Л.В., Эффективность применения наполнителей при производстве фанеры на малотоксичных карбомидоформальдегидных смолах // Лесотехнический журнал. – 2012. – №3. – С. 20-24.

73. Перелыгин Л.М., Уголев Б.Н. Древесиноведение. – М.: Изд-во «Лесная промышленность», 1971. – 286 с.

74. Прохоров В.В. «Применение индукционного нагрева при склеивании изделий из древесины в судостроительной промышленности» //

XLV Ломоносовские чтения в Северодвинске. Сборник докладов. – Северодвинск: САФУ имени М.В. Ломоносова, 2016.

75. Прохоров В.В. «Влияние режима склеивания на качество клеевого соединения в судостроительной промышленности» // XLVI Ломоносовские чтения в Северодвинске. Сборник докладов. – Северодвинск: САФУ имени М.В. Ломоносова, 2017.

76. Прохоров В.В. «Экспериментальный стенд для исследования процесса склеивания заготовок из древесины в судостроительной промышленности» // XLVII Ломоносовские чтения в Северодвинске. Сборник докладов. – Северодвинск: САФУ имени М.В. Ломоносова, 2018.

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

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

79. Прохоров В.В., Ключин Н.М., Воронин А.М. «Режим склеивания и его влияние на качество клеевого соединения» // Научный альманах №3-3(53), 2018. – С. 71-74.

80. Разиньков Е.М. Технология и оборудование клеевых материалов: учебное пособие. – Воронеж: ФГБОУ ВПО «ВГЛТА», 2013. – 291 с.

81. Разработка методики и оптимизация адгезионного соединения клеевых материалов на основе новых модифицированных клеев. / Отв. Исполнитель Варанкина Г. С. Отчет по теме // № г.р. 01 930008364.- Братск: БрИИ, 1996,-42 с.

82. Русаков Д.С. Влияние технологических факторов производства фанеры на качество готовой продукции / Д. С. Русаков, Г. С. Варанкина // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. - СПб.: СПбГЛТА, 2011. С. 154-158.

83. Русаков Д.С. Склеивание хвойной фанеры модифицированным пектолом фенолоформальдегидным клеем. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. СПб.: СПбГЛТУ, 2013.- 153 с.

84. Серов Е.Н., Лабудин Б.В. «Клееные деревянные конструкции: состояние и проблемы развития» // Лесной журнал, 2013, №2.

85. Современные энергосберегающие электротехнологии: учеб. пособие для вузов / Ю.И. Блинов [и др.]. - СПб: СПбГТЭУ «ЛЭТИ», 2000. - 564 с.

86. Слухоцкий, А.Е. Индукторы /А.Е. Слухоцкий; под ред. А.Н. Шамова. - 5-е изд., перераб. и доп. - Л.: Машиностроение, 1989. - 69 с.

87. Слухоцкий, А.Е. Индукторы для индукционного нагрева / А.Е. Слухоцкий, С.Е. Рыскин. - Л.: Энергия, 1974. - 264 с.

88. Слухоцкий, А.Е., Немков В.С., Павлов Н.А., Бамунэр А.В. Установки индукционного нагрева: учеб. пособие для вузов / А.Е. Слухоцкий [и др.]; под ред. А.Е. Слухоцкого. - Л.: Энергоиздат., 1981. - 328 с.

89. Тамби А.А. «Технология склеивания древесины с применением рентгенографии для контроля клеевых соединений» Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. СПб.: СПбГЛТА. 2009 - 20 с.

90. Тамби А.А., Чубинский А.Н., Исследование клеевых соединений древесины // Лесной вестник. – 2016. – №2. – С. 120-126.

91. Темкина Р.З. Синтетические клеи в деревообработке. - М.: Лесная промышленность, 1970. - 288 с.

92. Теоретические основы электротехники. Нелинейные электрические цепи. Электромагнитное поле: учеб. пособие / Г.И. Атабеков [и др.]; под ред. Г.И. Атабекова. - 6-е изд., стер. - СПб.: Лань, 2010. - 432 с.

93. Ткачева О.А. Разработка клеевой композиции с пониженным содержанием свободного формальдегида для склеивания и облицовывания

древесины, обезвреживание и утилизация сточных вод. Диссертация кандидата технических наук. Воронеж.: 2000.- 124 с.

94. Ферстер Э., Ренц Б. Методы корреляционного и регрессионного анализа. – М.: Финансы и статистика, 1983. – 302 с.

95. Филлипович А.А. Клеящие свойства синтетических смол в производстве фанеры. Автореферат диссертации кандидата технических наук. - Красноярск: СибТИ, 1990. - 22 с.

96. Фомин, Н.И. Электрические печи и установки индукционного нагрева / Н.И. Фомин, Л.М. Затуловский. - М.: Металлургия, 1979. - 247 с.

97. Фильчаков А.В., Агавердыева А.Ф. Наполнители, применяемые в деревообработке. Труды Братского государственного технического университета.- Братск: БрГТУ, 2002. - С. 116-120.

98. Фрейдин А.С. Прогнозирование свойств клееных соединений древесины. - М.: Лесная промышленность, 1980. - 224 с.

99. Цветков В.Е. Структура карбамидоформальдегидных олигомеров. Цветков В. Е., Якунькин А. А., Пасько Ю. В., Кремнев К. В. // Технология и оборудование для переработки древесины / Науч. тр. - Вып. 338 . - М.: МГУЛ, 2007. - С. 183-184.

100. Чубинский А.Н. К вопросу обоснования условий склеивания шпона / А.Н. Чубинский, С.М. Герасюта, Е.Н. Кандакова // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. - СПб.: СПбГЛТА, 2002. - С.29-33.

101. Чубинский А.Н. Свойства поверхности древесины во взаимодействии с жидким адгезивом / А. Н. Чубинский [и др.] // Деревообрабатывающая промышленность. - 2003. - № 1. - С.25-26.

102. Чубинский А.Н. Теоретические исследования процессов деформирования и пропитки древесины при склеивании / А.Н. Чубинский, Б.М. Нуллер // Лесной журнал. - 1995. - № 1. - С. 99-102.

103. Чубинский А.Н. Ускорение процесса склеивания шпона феноло-формальдегидными клеями / А.Н. Чубинский [и др.] // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. - СПб.: СПбГЛТА, 2011. - С.121-129.

104. Чубинский А.Н. Влияние давления прессования на качество и эффективность склеивания шпона [Текст] / А. Н. Чубинский, Л.М. Сосна, С.П. Исаев. - Л.: ЛТА, 1987. - 20 с. Деп. 20.04.87, № 1950 - С. 87 .

105. Чубинский А.Н. Обоснование технологии склеивания на основе физических свойств древесины // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии.-СПб.: СПбГЛТА, 2000.-с.77-81.

106. Чубинский А.Н. Формирование клеевых соединений древесины. СПб.: СПбГУ, 1992 - 164 с.

107. Чубинский А.Н. Формирование клееных конструкционных материалов из шпона хвойных пород древесины: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / А.Н. Чубинский. - СПб.: СПбГЛТА, 1995. - 421 с.

108. Чубинский А.Н., Блыскова Г. Микроскопическое исследование фанеры в области клеевого слоя // Лесной журнал.-1987.-№1.-с.122-124.

109. Чубинский А.Н., Варанкина Г.С., Брутян К.Г. Совершенствование технологии склеивания фанеры. Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии: Вып. 179. - СПб.: СПбГЛТА, 2007. - С. 167-175.

110. Чубинский А.Н., Сергеевичев В.В. Моделирование процессов склеивания древесных материалов. - СПб.: Издательский дом Герда, 2007.- 176 с.

111. Чубинский А.Н., Варанкина Г.С. Обоснование технологии склеивания фанеры модифицированным клеем. Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. - Вып. 201. - СПб.: СПбГЛТУ, 2012, - С. 185-193.

112. Чубинский А.Н., Федяев А.А., Тамби А.А. Влияние плотности древесины на качество формирования клеевых соединений // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2011. – №195. – С. 141-147.

113. Чубов А.Б. Соколова Е.Г. Теоретические основы процесса склеивания древесины. Учебное пособие для подготовки магистров по направлению 35.04.02 «Технология лесозаготовительных и деревообрабатывающих производств». СПб.: СПбГЛТУ 2015-64 с.

114. Чузов К.В. Формирование клееных деревянных брусьев с использованием модифицированных связующих. Текст диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. СПб.: СПбГЛТУ. 2015 - 188 с.

115. Шамов, А.Н. Проектирование и эксплуатация высокочастотных установок /А.Н. Шамов, В.А. Бодажков. - Изд. 2-е. - Л.: Машиностроение, 1974. - 280 с.

116. Электротермические процессы и установки: учеб. пособие по теоретическому курсу /под ред. В.Н. Тимофеева, Е.А. Головенко, Е.В. Кузнецова. - Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2007. - 360 с.

117. Aydin I., Demircir C., Colak S., Salca E. The effect of veneers roughness on bonding and some mechanical properties of plywood. 2013. 41-49, [http: //www. Prolingno.ro](http://www.Prolingno.ro).

118. Szava I., Galfi B., Vlase S., Ionescu D., Scutaru M., Muntenau I. The optimal design of the testing specimens for a more accurate evaluation of the glues' mechanical properties. 2015. 260-267, [http: //www. Prolingno.ro](http://www.Prolingno.ro)

119. 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.

120. 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.

121. 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.

122. 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.

Приложение А

Утверждаю
Исполняющий обязанности и.о. директора
филиала САФУ в г. Северодвинске
Смоля А.В.



« 18 » марта 20 15 г.

АКТ

о внедрении в учебный процесс филиала Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова в г. Северодвинске результатов диссертационной работы Прохорова Владимира Вячеславовича на тему: «Интенсификация процесса склеивания древесины бесконтактным индукционным нагревом клеевой композиции»

Мы, нижеподписавшиеся, представители кафедры океанотехники и энергетических установок института судостроения и морской арктической техники филиала САФУ в г. Северодвинске к.т.н., доцент, заведующий кафедрой Фомин А.В., д.т.н., профессор, Стенин В.А. составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Прохорова В.В. внедрены в курс «Теплофизические основы судовой энергетики» по направлению 26.03.02 Кораблестроение, океанотехника и системотехника объектов морской инфраструктуры, профиль «Судовые энергетические установки» при изучении раздела «Термодинамика газового потока».

Директор института
судостроения и морской
арктической техники


подпись

Ивлев М.Л.

Заведующий кафедрой
океанотехники и
энергетических
установок


подпись

Фомин А.В.

Профессор кафедры
океанотехники и
энергетических
установок


подпись

Стенин В.А.

СПРАВКА

О возможности применения результатов диссертационных исследований
«Интенсификация процесса склеивания древесины бесконтактным
индукционным нагревом клеевой композиции»
ПРОХОРОВА ВЛАДИМИРА ВЯЧЕСЛАВОВИЧА

Материалы исследования и технические решения представляют
производственный интерес и могут быть приняты для использования в
проекте совершенствования технологического процесса производства
фанеры.

Заместитель генерального директора
по производству АО «АФЗ»

Н.С. Федотова

