

Работа выполнена в Федеральном государственном образовательном учреждении высшего образования «Уральский государственный лесотехнический университет» (ФГБОУ ВО УГЛТУ)

Научный руководитель	Яцун Ирина Валерьевна кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», доцент кафедры механической обработки и производственной безопасности
Научный консультант	Гороховский Александр Григорьевич доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», заведующий кафедрой «Автоматизации производственных процессов»
Официальные оппоненты	Бирман Алексей Романович доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова» Шастовский Павел Сергеевич кандидат технических наук, ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева»
Ведущая организация	ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет»

Защита состоится «28» июня 2018 г. в 13-00 на заседании диссертационного совета Д.212.281.02 при ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет» по адресу: 620100, г. Екатеринбург, ул. Сибирский тракт, 37, к. 401

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

Автореферат разослан «16» мая 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук,
доцент

Шишкина Елена Евгеньевна

Научная библиотека
УГЛТУ
г. Екатеринбург

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Настоящее время отличается высокими темпами научно-технического прогресса. Развитие современной техники требует все новых материалов с заранее заданными свойствами. Поэтому основное и долгосрочное направление состоит в соединении различных уже известных материалов, то есть – в получении композитов.

Фанера представляет собой слоистый материал, состоящий из склеенных между собой листов лущеного шпона, нередко в композиции с другими материалами. Поэтому одним из наиболее перспективных направлений является создание слоистого материала на основе древесины с рентгенозащитными свойствами, в состав, которого не входит токсичный свинец, требующий специальной утилизации. Такой материал изготавливается из экологически безопасных, доступных и недорогих материалов.

Таким образом, проблема создания слоистого композиционного материала на основе древесины, обладающего при этом специальными свойствами и низкой токсичностью представляется актуальной и своевременной.

Степень разработанности темы исследования. Разработкой композиционных материалов на основе древесины и исследованиями их свойств занимались такие российские ученые как Сафин Р.Г., Угрюмов С.А., Стародубцева Т.Н., Аксомитный А.А., Степанов В.В., Шеин А.В., Грушко В.А., Ковальчук Н.М., Воскобойников И.В., Балуев В.С., Ветошкин Ю.И., Яцун И.В., Гороховский А.Г., Козьмина И.А., Шишлов О.Ф. и др.

Анализ этих работ позволил сделать вывод о том, что древесина может использоваться в конструкциях композиционных материалов в качестве несущей основы (матрицы).

Наиболее перспективным направлением является разработка слоистых материалов на основе древесины, в которых один или несколько внутренних слоев шпона заменены другими материалами.

Цель работы. Повышение экологичности и эффективности производства рентгенозащитного слоистого материала на основе древесины.

Предмет исследования. Закономерности процесса прессования композиционного слоистого материала на основе древесины с включением в конструкцию армирующих рентгенозащитных слоев (РЗС).

Объект исследования. Композиционный слоистый материал на основе древесины с рентгенозащитными свойствам.

Научной новизной обладают:

1. Результаты компьютерного моделирования напряженно – деформированного состояния композиционного слоистого материала для определения его жесткостью – прочностных показателей;
2. Полученные математические модели зависимостей защитных свойств рентгенозащитного слоя (РЗС) от рецептуры пропитывающего состава и физико-механических свойств композиционного слоистого материала от режимных параметров его прессования;

3. Полученные рациональные значения количества исходных компонентов в рецептуре пропитывающего состава и рациональные значения режимных параметров получения конструкции композиционного слоистого материала.

Теоретическая значимость представленной работы заключается в математическом описании напряженно – деформированного состояния разработанного композиционного слоистого материала с точки зрения теории изгиба тонких пластин, позволяющем определить его жесткостно – прочностные показатели, что подтверждается результатами компьютерного моделирования и практического эксперимента.

Практическая значимость данной работы заключается в разработке рецептуры рентгенозащитного пропитывающего состава для РЗС и разработки технологии получения композиционного слоистого материала «Фанотрен Б» максимально приближенной к технологии производства фанеры.

Методы исследования. При выполнении работы использован метод конечных элементов для моделирования напряженно-деформированного состояния слоистого материала, метод фотометрической контрастности изображения по рентгенопрозрачности изображения на рентгенограмме для определения защитных свойств РЗС, весовой метод для определения продолжительности сушки РЗС, стандартные методики, согласно ГОСТ 9625-87, ГОСТ 9624-2009, ГОСТ 9622-87 для определения физико-механических показателей слоистого материала.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Модель напряженно-деформированного состояния композиционного материала «Фанотрен Б» в виде трехслойной пластины, учитывающая направления и механические свойства слоев, входящих в ее конструкцию.
2. Математические модели взаимосвязи защитных свойств армирующих слоев от количества компонентов, входящих в пропитывающий состав.
3. Математические модели взаимосвязи физико-механических свойств композиционного слоистого материала на основе древесины от режимных параметров его прессования.

Достоверность результатов. Результаты исследований основаны на использовании фундаментальных положений теории ослабления рентгеновского излучения защитными материалами, теории изгиба тонких пластин, вероятностно – статистических методах, методах оценки случайных погрешностей в измерениях, методах моделирования в научных исследованиях. Достоверность результатов исследований по определению рецептуры пропитывающего состава для РЗС, входящего в состав разработанного материала, его физико-механических свойств по расчетным моделям подтверждается применением методов математической статистики для обработки опытных данных, оценкой погрешностей и экспериментальной проверкой этих данных и положительными результатами промышленной апробации.

Апробация работы. Результаты работы доложены, обсуждены и получили положительные оценки на III, IV, V, VI, VII всероссийских научно-технических конференциях студентов и аспирантов «Научное творчество молодежи – лесному комплексу России» (Екатеринбург 2007, 2008, 2009, 2010, 2011 г.г.); на

VI международной научно-технической конференции «Урал промышленный – Урал полярный: социально-экономические и экологические проблемы лесного комплекса» (Екатеринбург 2007).

Результаты исследований апробированы на ООО «БиКдрев» г. Екатеринбург.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 10 печатных работ, в том числе 2 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК и 1 патент.

Объем и структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, основных выводов и результатов исследований, библиографического списка, включающего 105 наименования и 14 приложений. Общий объем работы 163 страниц, в том числе 148 страниц основного текста, 41 рисунок и 40 таблиц, 15 страниц приложений.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель исследования, основные положения, выносимые на защиту. Раскрывается научная новизна работы, значимость ее результатов для науки и практики. Содержатся данные о месте проведения работы, структуре и объеме диссертации.

В первом разделе по литературным источникам приводятся анализ материалов, применяемых для защиты от рентгеновского излучения. Рассмотрены вопросы механизма ослабления данного вида излучения защитными материалами и приведены требования, предъявляемые к ним.

Во втором разделе приведены теоретические исследования по определению механических свойств прочностного характера фанеры с наполнителем в клеевом слое. Для этого ставилась цель найти определенную математическую модель, описывающую напряженно-деформированное состояние, которая основалась бы на результатах эксплуатационных исследований. Эта модель, позволит получить объект, поведение которого под нагрузкой можно описать математическим уравнением.

Теория прогиба тонких пластин базируется на гипотезах Кирхгофа:

- срединная плоскость пластины искривляется, но не деформируется;
- любой линейный элемент, перпендикулярный срединной плоскости, остается перпендикулярным к ней и после изгиба, причем длина его не изменяется;
- продольные слои пластины не давят друг на друга ($\sigma_z = 0$).

Величины нормальных и касательных напряжений в пластинах определяются формулами:

$$\sigma_x = \frac{M_x}{I_x} \cdot z; \quad \sigma_y = \frac{M_y}{I_y} \cdot z, \quad (1)$$

$$\tau_{xz} = \frac{Q_z}{2I_x} \left(\frac{h^2}{4} - z^2 \right); \quad \tau_{yz} = \frac{Q_z}{2I_y} \left(\frac{h^2}{4} - z^2 \right), \quad (2)$$

где $I_x = \frac{bh^3}{12}$ – момент инерции для прямоугольника относительно оси x;

$I_y = \frac{b^3 h}{12}$ – момент инерции для прямоугольника относительно оси y ;

M_x, M_y, Q_x, Q_y – изгибающие моменты и поперечные силы, отнесенные к единице длины пластины.

Математическое описание напряженно-деформированного состояния пластины можно описать уравнением Софи – Жермен:

$$\nabla^2 \nabla^2 f = \frac{\partial^4 f}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 f}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 f}{\partial y^4} = \frac{1}{D} q(x, y), \quad (3)$$

где f – прогиб пластины;

$q(x, y)$ – интенсивность распределенной по площади поперечной нагрузки на пластину;

D – цилиндрическая жесткость пластины.

Анализ напряженно-деформированного состояния разработанного композиционного материала проводился на компьютерной модели в виде трехслойной пластины.

С целью определения прочностных показателей слоистого материала была создана твердотельная модель трехслойной пластины, которая представлена на рисунке 1. Модель состоит из слоев А и Б – лущеного березового шпона, причем слои располагаются так, что направления волокон перпендикулярны предыдущему слою, толщина слоев 1,5 мм. Слои В толщиной 3 мм – это рентгенозащитный слой (РЗС). Для нагружения образца смоделирован металлический пуансон Г. При моделировании учитывались механические свойства материалов, входящих в слоистую конструкцию.

Относительные или простейшие деформации, выявленные в процессе испытания образцов объединяясь, создают зону локальной остаточной деформации, в которой в дальнейшем и наблюдается разрушение.

Моделирование напряженно-деформированного состояния производилось в программе инженерных расчетов, основанной на методе конечных элементов.

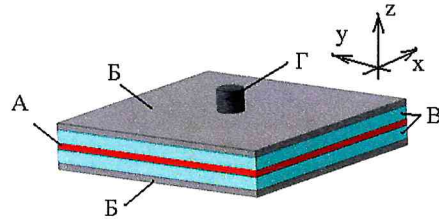


Рисунок 1 - Твердотельная модель фанеры

Результаты расчета представлены в виде поля напряжений по Мизесу и представлены на рисунке 2, а рассчитанные поля перемещений представлены на рисунке 3.

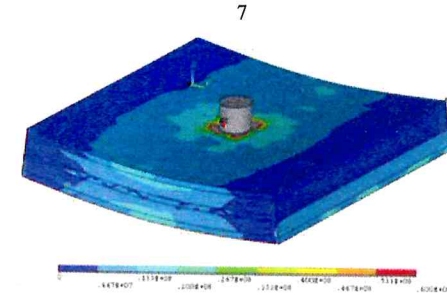


Рисунок 2 - Поле напряжений, максимальное напряжение 27 МПа

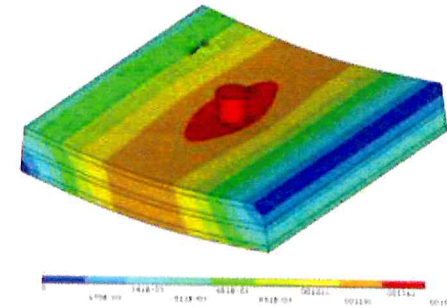


Рисунок 3 - Поле перемещения максимальный прогиб 1,45 мм

Также рассчитаны поля перемещений и напряжений для пластин толщиной РЗС от 1 мм до 3 мм.

Для проверки соответствия результатов компьютерного моделирования образцы рентгенозащитного материала в количестве 13 штук испытывали на испытательной машине ГМС-50 в соответствии с ГОСТ 9625-87. Нагружение осуществлялось с постоянной скоростью равномерно до полного разрушения образцов. Результаты испытаний представлены на рисунке 4.

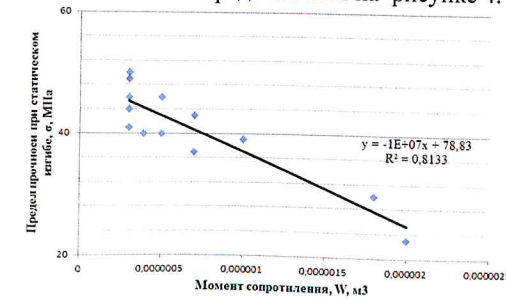


Рисунок 4 - Зависимость величины предела прочности при статическом изгибе рентгенозащитного материала от величины момента сопротивления

По результатам исследования были сделаны следующие выводы:

1. С уменьшением толщины РЗС увеличивается прогиб слоистого материала, аналогичная зависимость прослеживается и с напряжением.
2. Отклонения результатов компьютерного моделирования и экспериментальных испытаний объясняются увеличением толщины слоистого материала.
3. Экспериментальные исследования показали, что полученные разрушения клеевого соединения слоистого материала носят адгезионный характер, т.е. происходит расслоение образцов на границе раздела фаз «клей – РЗС». Компьютерное моделирование выявило повышение напряжений в зонах склеивания РЗС и внешней стороны шпона. Это объясняется тем, что в процессе склеивания слоистой конструкции часть клея, всасывается в поры березового шпона, проникает в него и распределяется по его поверхности и толщине. В месте соприкосновения клея с РЗС образуется только клеевой слой, так как клей не способен проникнуть в твердые слои РЗС.

В третьем разделе рассматриваются направления исследований, содержатся основные методические положения проведения экспериментов и обработки их результатов, проводятся характеристики используемых материалов, применяемого оборудования и приборов.

В исследованиях для создания конструкции слоистого материала использовался шпон березовый лущеный, толщиной 1,5 мм, удовлетворяющий по качеству ГОСТ 99-75 «Шпон лущеный», в качестве связующего – клей на основе поливинилацетатной дисперсии «Иоваколь» D3/D4.10270. В основе армирующих РЗС применялся термоскрепленный синтепон с поверхностной плотностью 300 г/м² (ТУ-6-13-0204456-40-90), который предварительно пропитывался составом, состоящим из сульфата бария, клея на основе поливинилацетатной дисперсии «Иоваколь» D3/D4.10270 и дистиллированной воды (ГОСТ 6709-72).

В разделе приведены подробные характеристики применяемого в ходе постановки эксперимента оборудования и измерительной аппаратуры.

Плотность композиционного материала вычисляли по формуле:

$$\rho = \frac{m}{lbh}, \quad (4)$$

где m – масса образца РЗС, кг;

l – ширина образца РЗС, м;

b – толщина образца РЗС, м;

h – толщина образца, м.

Защитные свойства рентгенозащитного слоя оценивались при помощи величины свинцового эквивалента. Для этого через полученные образцы и свинцовую пластину толщиной 1 мм пропускали рентгеновские лучи рентгеновским аппаратом (время экспозиции 0,02 с, сила тока 25 мА, напряжение 60 кВ). Способность полученного рентгенозащитного слоя пропускать рентгеновские лучи оценивали по рентгенопрозрачности и

фотометрической контрастности изображения на рентгенограмме с помощью люксметра.

Продолжительность сушки РЗС определялась весовым методом.

Оценка физико-механических свойств материала приводилась в соответствии с ГОСТ 9625-87, ГОСТ 9624-2009, ГОСТ 9622-87.

Полученные опытные данные оценивались посредством первичной обработки результатов эксперимента методами математической статистики.

Проверка однородности дисперсии опытов проводилась по критерию Кохрена, значимость коэффициентов уравнения регрессии оценивалась критерием Стьюдента, адекватность модели – критерием Фишера.

В четвертом разделе для определения рецептуры пропитывающего состава при создании РЗС постановку экспериментов осуществляли по плану В₃ (Бокса) для трех независимых переменных. Натуральные значения управляющих факторов и диапазоны их варьирования приведены в таблице 1, наименование постоянных факторов и их значения приведены в таблице 2. Схема проведения эксперимента приведена на рисунке 5.

Таблица 1 – Натуральные значения управляющих факторов и диапазоны их варьирования

№ п/п	Наименование показателя	Ед. изм.	Переменные	Натуральные значения			Шаг варьирования
				-1	0	1	
1	Количество минерального наполнителя в пропитывающем составе	г	x_1	150	175	200	25
2	Количество связующего пропитывающем составе	г	x_2	100	150	200	50
3	Количество воды в пропитывающем составе	г	x_3	80	95	110	15

Таблица 2 – Постоянные факторы при проведении экспериментов

№ п/п	Постоянный фактор	Показатель
1	Относительная влажность воздуха, %	65±5
2	Температура окружающей среды, °С	20±2
3	Время перемешивания компонентов, входящих в пропитывающий состав, мин	5±1
4	Время сушки рентгенозащитного слоя, ч	48±1
5	Температура плит пресса, °С	50±2
6	Время прессования РЗС, мин	5±1
7	Толщина РЗС, мм	3±0,1

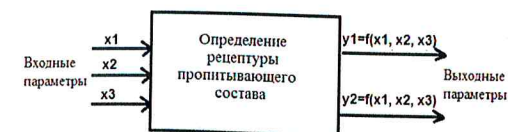


Рисунок 5 – Схема проведения эксперимента

Проведена обработка результатов эксперимента, на основании которой построены следующие уравнения регрессии второго порядка, адекватно описывающие защитные свойства армирующего слоя:

$$y_1 = 1602,9 + 189,47x_1 - 281,6x_2 - 58,27x_3 - 7,92x_1^2 + 130,75x_2^2 + 23,75x_3^2 - 97,58x_1x_2 + 9,25x_1x_3 - 13,67x_2x_3; \quad (5)$$

$$y_2 = 0,23 + 0,025x_1 - 0,049x_2 - 0,028x_3 + 0,013x_1^2 + 0,015x_2^2 - 0,008x_3^2 + 0,017x_1x_2 - 0,002x_1x_3 - 0,027x_2x_3, \quad (6)$$

где y_1 – плотность РЗС, кг/м³;

y_2 – свинцовый эквивалент РЗС, мм Рв/мм.

На рисунках 6 и 7 приведены зависимости величины свинцового эквивалента РЗС от количества компонентов пропитывающего состава.

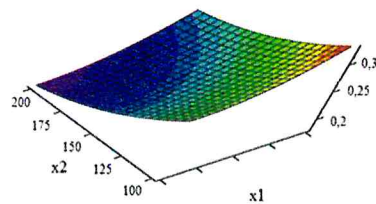


Рисунок 6 - Зависимость величины свинцового эквивалента РЗС от количества минерального наполнителя (x_1) и количества воды (x_2) в пропитывающем составе

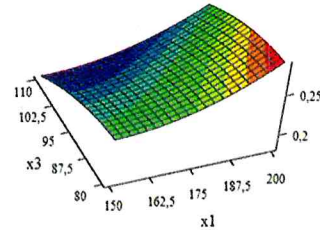


Рисунок 7 - Зависимость величины свинцового эквивалента РЗС от количества минерального наполнителя (x_1) и количества воды (x_3) в пропитывающем составе

Полученные математические модели использовались для определения оптимальных значений нахождения рецептуры пропитывающего состава для РЗС с помощью метода покоординатного поиска.

Задача оптимизации для определения оптимальной рецептуры пропитывающего состава была поставлена следующим образом:

Целевая функция для нахождения максимальной плотности РЗС (W_1):

$$W_1 = 1602,9 + 189,47x_1 - 281,6x_2 - 58,27x_3 - 7,92x_1^2 + 130,75x_2^2 + 23,75x_3^2 - 97,58x_1x_2 + 9,25x_1x_3 - 13,67x_2x_3 \rightarrow \max \quad (7)$$

при ограничениях:

$$\begin{aligned} -1 \leq x_1 \leq 1 \\ -1 \leq x_2 \leq 1 \\ -1 \leq x_3 \leq 1 \end{aligned} \quad (8)$$

Целевая функция для нахождения максимального значения свинцового эквивалента РЗС (W_2):

$$W_2 = 0,23 + 0,025x_1 - 0,049x_2 - 0,028x_3 + 0,013x_1^2 + 0,015x_2^2 - 0,008x_3^2 + 0,017x_1x_2 - 0,002x_1x_3 - 0,027x_2x_3 \rightarrow \max \quad (9)$$

при ограничениях:

$$\begin{aligned} -1 \leq x_1 \leq 1 \\ -1 \leq x_2 \leq 1 \\ -1 \leq x_3 \leq 1 \end{aligned} \quad (10)$$

Для решения компромиссной задачи использован метод условного центра масс. Рациональные значения компонентов пропитывающего состава для РЗС: количество минерального наполнителя - 197 г. (51%); количество связующего - 100 г. (26%); количество воды - 86 г. (23%). Полученные значения параметров пропитывающего состава позволяют получить РЗС, обладающий следующими свойствами: плотность - 2354 кг/м³; свинцовый эквивалент - 0,27 мм Рв/мм.

Для определения режимных параметров прессования конструкции слоистого материала многофакторный эксперимент проводился аналогично. Натуральные значения управляющих факторов и диапазоны их варьирования приведены в таблице 3, наименование постоянных факторов и их значения приведены в таблице 4. Схема проведения эксперимента приведена на рисунке 8.

Таблица 3 - Натуральные значения управляющих факторов и диапазоны их варьирования

№ п/п	Наименование показателя	Ед. изм.	Пере- менные	Натуральные значения			Шаг варьирования
				-1	0	1	
1	Расход клея	г/м ²	x_1	150	175	200	25
2	Температура плит пресса	°C	x_2	50	60	70	10
3	Время прессования	мин.	x_3	6	7	8	1

Таблица 4 - Постоянные факторы при проведении экспериментов

№ п/п	Постоянный фактор	Показатель
1	Относительная влажность воздуха, %	65±5
2	Температура окружающей среды, °C	20±2
3	Толщина рентгенозащитного слоя, мм	3±0,1
4	Рецептура пропитывающего состава, %: - содержание минерального наполнителя - содержание связующего (клея) - содержание воды	51 26 23
5	Слойность конструкции (количество листов шпона), шт.	3
6	Время открытой выдержки клея, мин	6±1

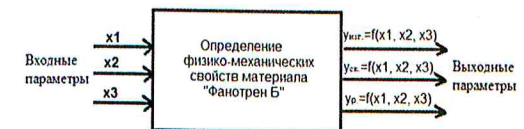


Рисунок 8 - Схема проведения эксперимента

По результатам были построены следующие уравнения регрессии второго порядка, адекватно описывающие физико-механические свойства конструкции материала:

$$y_{изг.} = 38,1 + 1,19x_1 - 1,7x_2 + 1,65x_3 - 6,52x_1^2 + 0,23x_2^2 - 4,57x_3^2 + 0,34x_1x_2 - 0,22x_1x_3 + 0,02x_2x_3; \quad (11)$$

$$y_{ск.} = 1,21 - 0,012x_1 - 0,086x_2 + 0,18x_3 - 0,27x_1^2 - 0,05x_2^2 - 0,09x_3^2 + 0,11x_1x_2 - 0,005x_1x_3 - 0,004x_2x_3; \quad (12)$$

$$y_p = 52,1 - 0,39x_1 + 0,01x_2 + 1,61x_3 - 2,89x_1^2 - 0,39x_2^2 - 1,7x_3^2 - 1,2x_1x_2 + 0,41x_1x_3 - 1,95x_2x_3, \quad (13)$$

где $y_{изг.}$ – предел прочности при статическом изгибе вдоль наружных слоев слоистого материала, МПа;

$y_{ск.}$ – предел прочности при скалывании по клеевому слою слоистого материала, МПа;

y_p – предел прочности при растяжении вдоль волокон слоистого материала, МПа;

По полученному уравнению регрессии построены соответствующие зависимости, представленные на рисунках 9 - 12.

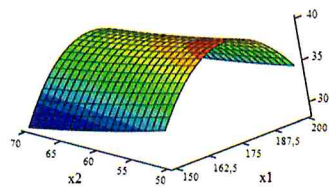


Рисунок 9 - Зависимость предела прочности при статическом изгибе вдоль наружных слоев слоистого материала от расхода клея (x_1) и температуры плит пресса (x_2)

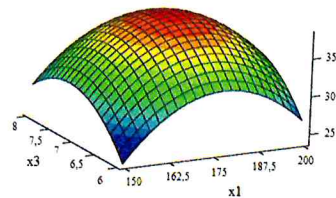


Рисунок 10 - Зависимость предела прочности при статическом изгибе вдоль наружных слоев слоистого материала от расхода клея (x_1) и времени прессования (x_3)

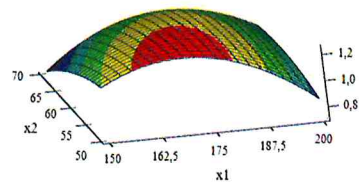


Рисунок 11 - Зависимость предела прочности при скалывании по клеевому слою статического слоистого материала от расхода клея (x_1) и температуры плит пресса (x_2)

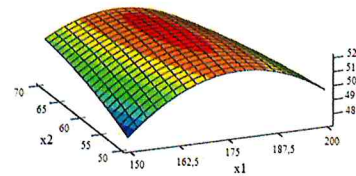


Рисунок 12 - Зависимость предела прочности при растяжении вдоль волокон слоистого материала от расхода клея (x_1) и температуры плит пресса (x_2)

Полученные математические модели использовались для определения рациональных значений прессования конструкции слоистого материала на основе древесины, с использованием методов, приведенных выше.

Задача оптимизации для определения оптимальных параметров прессования слоистого материала была поставлена следующим образом:

Целевая функция для нахождения максимального предела прочности при статическом изгибе вдоль наружных слоев ($W_{изг.}$):

$$W_{изг.} = 38,1 + 1,19x_1 - 1,7x_2 + 1,65x_3 - 6,52x_1^2 + 0,23x_2^2 - 4,57x_3^2 + 0,34x_1x_2 - 0,22x_1x_3 + 0,02x_2x_3 \rightarrow \max \quad (14)$$

при ограничениях:

$$\begin{aligned} -1 \leq x_1 \leq 1 \\ -1 \leq x_2 \leq 1 \\ -1 \leq x_3 \leq 1 \end{aligned} \quad (15)$$

Целевая функция для нахождения максимального предела прочности при скалывании по клеевому слою ($W_{ск.}$):

$$W_{ск.} = 1,21 - 0,012x_1 - 0,086x_2 + 0,18x_3 - 0,27x_1^2 - 0,05x_2^2 - 0,09x_3^2 + 0,11x_1x_2 - 0,005x_1x_3 - 0,004x_2x_3 \rightarrow \max \quad (16)$$

при ограничениях:

$$\begin{aligned} -1 \leq x_1 \leq 1 \\ -1 \leq x_2 \leq 1 \\ -1 \leq x_3 \leq 1 \end{aligned} \quad (17)$$

Целевая функция для нахождения максимального предела прочности при растяжении вдоль волокон (W_p):

$$W_p = 52,1 - 0,39x_1 + 0,01x_2 + 1,61x_3 - 2,89x_1^2 - 0,39x_2^2 - 1,7x_3^2 - 1,2x_1x_2 + 0,41x_1x_3 - 1,95x_2x_3 \rightarrow \max \quad (18)$$

при ограничениях:

$$\begin{aligned} -1 \leq x_1 \leq 1 \\ -1 \leq x_2 \leq 1 \\ -1 \leq x_3 \leq 1 \end{aligned} \quad (19)$$

Рациональные значения параметров прессования конструкции слоистого материала: расход клея - 176 г/м²; температура плит пресса - 50 °С; время прессования - 7 мин 40 с. Полученные значения режимных параметров создания конструкции слоистого материала позволяют получить материал, обладающий следующими физико-механическими свойствами: предел прочности при статическом изгибе вдоль наружных слоев 39 МПа; предел прочности при скалывании по клеевому слою 1,34 МПа и предел прочности при растяжении вдоль волокон 53 МПа.

В ходе исследования по определению рецептуры пропитывающей композиции для РЗС выяснилось, что продолжительность сушки при комнатной температуре 20±2 °С армирующего слоя в среднем составляет 44-48 часов. Такой

длительный процесс сушки неприемлем для условий промышленного производства, поэтому для его интенсификации исследовалось 10 вариантов пропитывающего состава, которым наполнялся синтепон, далее образцы укладывались на стеклянную подложку и взвешивались на весах и отправлялись в автоклав, разогретый до $100 \pm 5^\circ\text{C}$. Взвешивание образцов осуществлялось через каждые 20 мин. до момента, пока не установится постоянная масса образцов (трех последних измерений). Результаты испытаний представлены на рисунке 13.

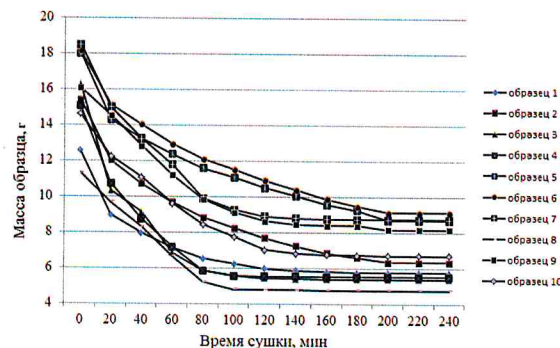


Рисунок 13 - Изменение массы армирующего материала в зависимости от продолжительности его высыхания

По результатам исследований сделаны следующие выводы:

1. Увеличение количества минерального наполнителя и уменьшение количества связующего и воды в пропитывающем составе увеличивают плотность рентгенозащитного слоя и величину его защитных свойств.
2. Содержание минерального наполнителя (сульфата бария) в пропитывающем составе не должно превышать 53 %, т.к. дальнейшее увеличение его приведет к получению высоковязкой смеси, которая не способна пропитать наполнитель (синтепон) и как следствие, будет отсутствовать адгезионное взаимодействие между ними. Тщательное перемешивание пропитывающего состава позволит равномерно распределить в нем частицы сульфата бария и тем самым повысить прочностные и защитные (от рентгеновского излучения) свойства.
3. В процессе создания РЗС при отверждении связующего происходит реакция поликонденсации и образуется пространственно сшитая молекула полимера. Отвержденное связующее будет иметь высокую степень полимеризации, что подтверждается высокой прочностью, плотностью, твердостью и низкой пластичностью образующегося РЗС.
4. Полученный РЗС имеет большую разнотолщинность, т.е. высокую шероховатость поверхности и следовательно небольшую площадь контакта, поэтому для создания конструкции материала (соединение РЗС с шпоном) для увеличения его прочностных показателей необходимо предварительно

уплотнить РЗС в прессе, разогретом до температуры $50 \pm 5^\circ\text{C}$ с применением дистанционных планок до толщины $3 \pm 0,1$ мм.

5. Увеличение температуры при сушке РЗС до $100 \pm 5^\circ\text{C}$ позволит интенсифицировать процесс до 4 ч., что уменьшит количество производственных площадей и увеличит объем выпуска готовой продукции.
6. Увеличение количества связующего от 150 до 175 г/м² повышает прочностные свойства композиционного материала, дальнейшее же повышение расхода клея экономически не целесообразно.
7. Температура плит пресса должна находиться в пределах от $55 \pm 5^\circ\text{C}$. При этой температуре наблюдается рост работы адгезии за счет увеличения подвижности молекул связующего, что увеличивает контакта между склеиваемыми поверхностями (шпона и РЗС). Дальнейшее повышение температуры плит пресса приводит к снижению прочностных свойств клееной конструкции, что можно объяснить деструкцией связующего на основе поливинилацетатной дисперсии.
8. Время прессования слоистого пакета должно составлять около 8 мин. За это время, наиболее удаленные от плит пресса слои конструкционного материала успеют прогреться до необходимой температуры и разогретый клей проникнет в поры шпона, а также распределится по поверхности шпона и РЗС, заполняя все микронеровности.

В пятом разделе подобрано технологическое оборудование для производства композиционного слоистого материала на основе древесины, дана его техническая характеристика. Разработана схема технологического процесса производства материала для условий промышленного производства (рисунок 14).

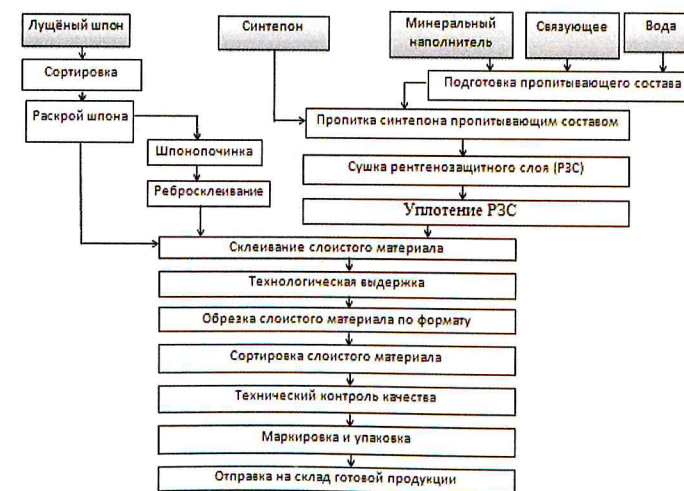


Рисунок 14. – Схема технологического процесса изготовления материала «Фанотрен Б»

Выполнен расчет экономических показателей внедрения предложенной конструкции материала в условиях промышленного производства, который показал, что при годовом объеме 100000 м² расчетное значение прибыли составит более 21 млн. руб., рентабельность продукции около 26 %, срок окупаемости капитальных вложений 10 месяцев.

Сравнительный анализ полученного материала с аналогом «Фанотрен А» показал, что при его выпуске экономия составит порядка 14000 руб. за 1 м³.

Поэтому изготовление композиционного слоистого материала является экономически выгодным и его можно рекомендовать для использования в строительстве и отделке помещений с повышенным радиационным фоном (воздействием), элементах мебели и защитных экранах, ширм и тому подобное.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В результате выполнения диссертационной работы, посвященной вопросам повышения эффективности производства рентгенозащитного слоистого материала на основе древесины, были сделаны следующие выводы:

1. Поведение фанеры с наполнением в клеевом слое в момент нахождения ее под нагрузкой с приемлемой точностью описывается уравнением Софи – Жермен.
2. Разработана модель напряженно-деформированного состояния слоистого материала на основе древесины «Фанотрен Б», в которой учтены направления слоев и механические свойства материалов, входящих в ее конструкцию, позволяет определить ее жесткостно – прочностные показатели.
3. Построены математические модели, представляющие собой зависимости плотности и кратности ослабления РЗС от рецептуры пропитывающего состава. В качестве управляющих факторов при оптимизации пропитывающего состава были выбраны: количество минерального наполнителя, количество связующего и воды.
4. В результате решения компромиссной задачи методом условного центра масс получена рациональная рецептура пропитывающего состава: количество минерального наполнителя 51%, количество связующего 26%, количество воды 23%.
5. Построены математические модели, представляющие собой зависимости прочностных свойств слоистого материала от режимных параметров его прессования. В качестве управляющих факторов при оптимизации пропитывающего состава были выбраны: расход клея, температура плит пресса и время прессования.
6. В результате решения компромиссной задачи методом условного центра масс получены рациональные параметры создания материала: расход клея 173 г/м², температура плит пресса 50 °С, время прессования 7 мин. 30 с.
7. Разработанный материал изготавливается из экологически безопасных, доступных и недорогих материалов, не требующих специальной утилизации. Его можно рекомендовать для использования в строительстве и отделке

помещений с повышенным радиационным фоном (воздействием), элементах мебели и защитных экранах, ширм.

8. По результатам исследований изготовлена опытно-промышленная партия слоистого материала «Фанотрен Б» в условиях ООО «БиКдрев» г. Екатеринбург, что подтверждает возможность изготовления разработанного материала в условиях промышленного производства.
9. При годовом объеме производства фанеры «Фанотрен Б» 100000 м² расчетное значение прибыли составит более 21 млн. руб., рентабельность продукции около 26 %, срок окупаемости капитальных вложений 10 месяцев.
10. Сравнительный анализ полученного материала с аналогом «Фанотрен А» показал, что при его выпуске экономия составит порядка 14000 руб. за 1 м³.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

В изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ:

1. Ветошкин Ю.И. Общий подход к расчету напряженного деформированного состояния композиционного слоистого материала «Фанотрен Б» с защитными свойствами от рентгеновского излучения / Ю.И. Ветошкин, И.В. Коцюба, И.В. Яцун, С.А. Одинцева // Вестн. Моск. ун-та. Лесной вестник, 2007. № 8. С. 149-152.
2. Одинцева С.А. Анализ напряженно-деформированного состояния слоистого материала специального назначения на основе древесины / С.А. Одинцева, С.Н. Исаков, И.В. Яцун // Деревообрабатывающая промышленность, 2017. №4. С. 34-40.

Патенты:

3. Пат.125518 Российская Федерация, МПК G21F1/12. Композиционный слоистый материал / Ветошкин Ю.И.; заявитель и патентообладатель: Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уральский государственный лесотехнический университет»; Ю.И. Ветошкин; С.А. Одинцева; И.В. Яцун, И.В. Коцюба. - №2011115495.

В статьях, материалах и тезисах конференций:

4. Одинцева С.А. Напряженно-деформированное состояние слоистого материала / С.А. Одинцева, Ю.И. Ветошкин, И.В. Коцюба // Научное творчество молодежи - лесному комплексу России: материалы III Всерос. науч.-техн. конф. – Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2007. Ч.1. - С. 143-145.

А - 1840

5. **Одинцева С.А.** Особенности физико–механических свойств композиционного защитного материала / Одинцева, Ю.И. Ветошкин, И.В. Коцюба, Г.Г. Говоров, А.Н. Ильичева, А.С. Зайцев // Урал промышленный – Урал полярный: социально-экономические и экологические проблемы лесного комплекса: Сборник материалов VI Междунар. научн.-техн. конф. – Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2007. – С. 150-153.
6. **Одинцева С.А.** Поисковые решения состава компонентов по защитным свойствам композиционного слоистого материала «Фанотрен Б» / С.А. Одинцева, Ю.И. Ветошкин, И.В. Коцюба // Научное творчество молодежи - лесному комплексу России: материалы IV Всерос. науч.-техн. конф. – Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2008. Ч.1. – С. 113-115.
7. **Одинцева С.А.** Защитные свойства композиционного слоистого рентгенозащитного материала «Фанотрен Б» / С.А. Одинцева, Ю.И. Ветошкин, И.В. Коцюба // Научное творчество молодежи - лесному комплексу России: материалы V Всерос. науч.-техн. конф. – Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2009. Ч.1. – С. 161-163.
8. **Одинцева С.А.** Влияние состава компонентов на предел прочности при статическом изгибе рентгенозащитного материала «ФАНОТРЕН» / С.А. Одинцева, Ю.И. Ветошкин, И.В. Коцюба, Н.Е. Петряев // Научное творчество молодежи - лесному комплексу России: материалы VI Всерос. науч.-техн. конф. – Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2010. Ч.1. – С. 168-170.
9. **Одинцева С.А.** Некоторые сведения о слоистых композитах. Оценка защитных свойств слоистого композиционного материала ФАНОТРЕН Б / С.А. Одинцева, Ю.И. Ветошкин, И.В. Яцун // Научное творчество молодежи - лесному комплексу России: материалы VII Всерос. науч.-техн. конф. – Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2011. Ч.1. – С. 232-235.
10. **Одинцева С.А.** Исследование рентгенозащитных свойств армирующего слоя композиционного материала на основе древесины / С.А. Одинцева, И.В. Яцун, А.А. Каменщикова, А.М. Яцун // Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века: труды VII Международного Евразийского симпозиума. Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2012. – С. 194–196.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью учреждения, просим направлять по адресу: 620100, г. Екатеринбург, ул. Сибирский тракт, 37, Ученому секретарю диссертационного совета Д 212.281.02,
e-mail: d21228102@yandex.ru

Подписано в печать 03.05.2018

Объем 1,0 авт.л.

Тираж 100 экз.

Заказ № 364

Уральский государственный лесотехнический университет
620100, г. Екатеринбург, Сибирский тракт, 37.
Отдел оперативной полиграфии

