



## МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ И ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ

УДК 674.419

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.3.110

### ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ И РЕНТГЕНОЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ ДЕРЕВОКОМПОЗИЦИОННОГО СЛОИСТОГО МАТЕРИАЛА «ФАНОТРЕН Б»

*И.В. Яцун, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [G-7651-2019](#), ORCID: [0000-0003-3195-2410](#)*

*А.Г. Гороховский, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [O-6030-2018](#),  
ORCID: [0000-0001-8847-8217](#)*

*С.А. Одинцева, канд. техн. наук, ст. преподаватель; ResearcherID: [G-7837-2019](#),  
ORCID: [0000-0002-6765-3941](#)*

Уральский государственный лесотехнический университет, ул. Сибирский тракт,  
д. 37, г. Екатеринбург, Россия, 620100; e-mail: [iryatsun@mail.ru](mailto:iryatsun@mail.ru)

Изучены физико-механические и рентгенозащитные свойства нового композиционного материала на основе древесины «Фанотрен Б», состоящего из чередующихся слоев лущеного березового шпона и армирующих рентгенозащитных слоев. Последние представляют собой нетканый материал – синтепон, пропитанный рентгенозащитным составом. Новый композит рекомендуется использовать в местах с повышенным радиационным фоном в качестве конструкционного и отделочного материала, который не содержит в своем составе свинец. Перед нами стояли следующие задачи: исследовать напряженно-деформированное состояние этого материала, определить рациональную рецептуру пропитывающего состава для рентгенозащитного слоя и оценить его физико-механические свойства. Соотношение «напряжение–деформация» материала моделировали методом конечных элементов, физико-механические свойства оценивали по стандартным методикам, защитные свойства рентгенозащитного слоя – величиной свинцового эквивалента по прозрачности изображения на рентгенограмме с использованием люксметра. Показано, что поведение фанеры, армированной рентгенозащитными слоями, под действием внешней нагрузки достаточно точно описывается дифференциальным уравнением изгиба пластин. Моделирование осуществляли на твердотельной модели, которая учитывала механические свойства материалов, входящих в конструкцию, и схему укладки слоев шпона. Установлено, что уменьшение толщины рентгенозащитных слоев ведет к увеличению прогибов и напряжений. Компьютерная модель отразила рост напряжений в местах склеивания материала. Экспериментально определены: состав пропитывающей композиции (минеральный наполнитель – 51 %, связующее – 26 %, вода – 23 %) и технологические режимы формирования материала (расход связующего – 176 г/м<sup>2</sup>, температура прессования – 50 °С, продолжительность склеивания – 8 мин). Материал толщиной 9,5 мм имеет плотность 1600 кг/м<sup>3</sup>; свинцовый эквивалент составляет 0,54 мм Рb/мм; прочность при статическом изгибе вдоль наружных слоев – 39 МПа, при скалывании по клеевому слою – 1,34 МПа, при растяжении вдоль волокон – 53 МПа.

**Для цитирования:** Яцун И.В., Гороховский А.Г., Одинцева С.А. Исследование физико-механических и рентгенозащитных свойств деревокомпозиционного слоистого материала «Фанотрен Б» // Лесн. журн. 2019. № 3. С. 110–120. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.3.110

*Ключевые слова:* композиционный материал, армированная фанера, защита от рентгеновского излучения, защита от ионизирующего излучения, слоистый древесный материал, композиционная фанера, напряженно-деформированное состояние, физико-механические свойства.

### Введение

Понятие «композиционные материалы» появилось в середине XX в. Этот термин помогает понять генезис материалов, разрабатываемых в настоящее время [8, 9].

Композиционный материал [1, 9] состоит из нескольких компонентов и имеет в своем составе матрицу и армирующие элементы. Свойства такого материала отличаются от свойств каждого из компонентов. Изменяя состав и соотношение матрицы и армирующих элементов, можно получать широкий спектр новых материалов с заранее задаваемыми свойствами. Существенное значение при создании композиционных материалов имеет расположение элементов в конструкции [8, 9].

Материалы, используемые для ослабления рентгеновского излучения, должны обладать высокими плотностью, прочностью, сохранять размеры, быть нетоксичными и т. д. [7]. Известно, что свинец и материалы на его основе широко применяются в качестве рентгенозащитных. Но в последнее время остро стоит вопрос о их замене на более безопасные, не содержащие свинец [4, 5, 7].

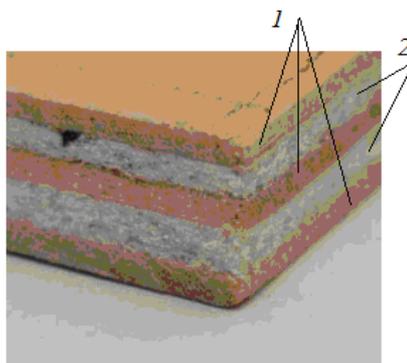
Древесина, обладающая хорошими конструкционно-эксплуатационными свойствами, находит широкое применение в подобных конструкциях в качестве несущей основы (матрицы) [4, 12–14, 16, 18].

Фанеру как слоистый материал, состоящий из склеенных между собой листов шпона, иногда используют в композиции с разными материалами [6, 15, 17, 19, 20].

В Уральском государственном лесотехническом университете разработана конструкция композиционного слоистого материала специального назначения «Фанотрен Б» (фанера от рентгена). Он состоит из слоев лущеного шпона, чередующихся с армирующими рентгенозащитными слоями (РЗС). Основа РЗС – это нетканый материал, пропитанный композицией, включающей минеральный наполнитель (сульфат бария), ПВА-клей и воду [3, 4] (рис. 1).

Рис. 1. Композиционный материал «Фанотрен Б» (лабораторный образец): 1 – слои лущеного шпона; 2 – рентгенозащитные слои

Fig. 1. Composite material “Fanotren B” (laboratory sample): 1 – peeled veneer layers; 2 – X-ray protective layers



Цель работы – исследование напряженно-деформированного состояния деревокомпозиционного материала «Фанотрен Б», а также определение рациональной рецептуры пропитывающего состава для рентгенозащитного слоя и оценка физико-механических свойств этого материала.

#### *Объекты и методы исследования*

Моделирование напряженно-деформированного состояния композиционного слоистого материала осуществляли с применением метода конечных элементов. Физико-механические свойства материала определяли в соответствии с требованиями ГОСТ 9621–72, ГОСТ 9625–84 (СТ СЭВ 2378–80), ГОСТ 9625–09, ГОСТ 9622–87 (СТ СЭВ 2377–80). Рентгенозащитные свойства армирующего слоя оценивали свинцовым эквивалентом [7].

Исследования проводили следующим образом: через образцы материала и фольгу из свинца (толщина 1 мм) рентгенаппаратом пропускали рентгеновские лучи (время экспозиции – 0,02 с, сила тока – 25 мА, напряжение на трубке – 60 кВ). Полученную рентгенограмму оценивали по прозрачности с применением люксметра.

#### *Результаты исследования и их обсуждение*

Композиционный слоистый материал «Фанотрен Б» рекомендуется использовать в качестве конструкционного в местах с повышенным радиационным фоном: в строительных конструкциях (при облицовке стен и потолков, устройстве напольных фанерных покрытий); при изготовлении продукции специализированного назначения (контейнеры, тара, дверные полотна, мебель, защитные экраны, ширмы, жалюзи) и т. д. Материал включает армирующие слои, ослабляющие поток рентгеновского излучения, и слои шпона, которые придают прочность и эстетичность конструкциям. Фанера является многослойным материалом, поэтому необходимо знать закономерности распределения статической нагрузки между отдельными слоями шпона [3, 10].

Теоретические исследования позволили построить математическую модель, описывающую напряженно-деформированное состояние слоистого материала [10].

Известно, что теория прогиба тонких пластин базируется на гипотезах Кирхгофа [11]:

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 ( $\sigma_z = 0$ ).

В пластине возникают нормальные ( $\sigma_x, \sigma_y$ ) и касательные ( $\tau_{xz}, \tau_{yz}$ ) напряжения [11]:

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

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

где  $M_x$ ,  $M_y$  и  $Q_x$ ,  $Q_y$  – функции моментов и сил;  $I_x$  – момент инерции прямоугольника относительно оси  $x$ ,  $I_x = \frac{bh^3}{12}$ ;  $I_y$  – момент инерции прямоугольника относительно оси  $y$ ,  $I_y = \frac{b^3h}{12}$ ;  $h$  – толщина пластины;  $b$ ,  $z$  – соответственно наименьший и наибольший размер пластины.

Основное разрешающее уравнение изгиба пластин – уравнение Софи-Жермен [11], выражает зависимость между прогибами и нагрузкой:

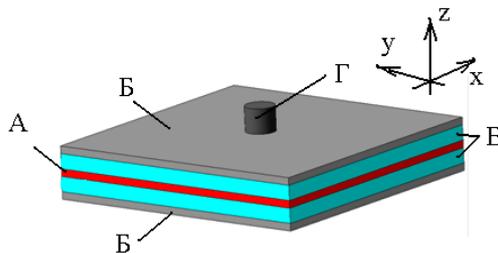
$$\nabla^2 \nabla^2 f = \frac{\partial^4 f}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 f}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 f}{\partial y^4} = \frac{1}{D} q(x, y),$$

где  $f$  – прогиб;  $D$  – жесткость пластины;  $q(x, y)$  – интенсивность распределенной поперечной нагрузки на пластину по площади.

Для определения прочностных характеристик разработанного материала была создана модель пластины, состоящая из слоев А и Б толщиной 1,5 мм – лущеный шпон (слои имеют взаимно перпендикулярное направление волокон древесины); слой В толщиной 3,0 мм – рентгенозащитный слой; Г – металлический пуансон [5, 10] (рис. 2). При моделировании учитывались механические свойства материалов, входящих в конструкцию.

Рис. 2. Твердотельная модель пластины из материала «Фанотрен Б»

Fig. 2. Solid model of a plate made from the “Fanotren B” material



Относительные или простейшие деформации, выявленные в процессе проведения испытаний образцов, были объединены в зону локальной остаточной деформации, в которой и наблюдалось разрушение.

Для моделирования соотношения «напряжение–деформация» разработанного материала использовали метод конечных элементов.

Расчет выполнен в виде полей напряжений по критерию фон Мизеса (рис. 3) и перемещений (рис. 4) [9, 10]. Расчет полей перемещений и напряжений при толщине рентгенозащитного слоя от 1 до 3 мм представлен в табл. 1.

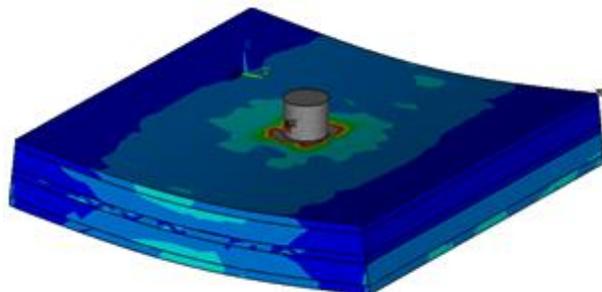


Рис. 3. Поле напряжений по фон Мизесу (максимальное напряжение – 27 МПа)

Fig. 3. Von Mises Stress field (maximum stress – 27 MPa)

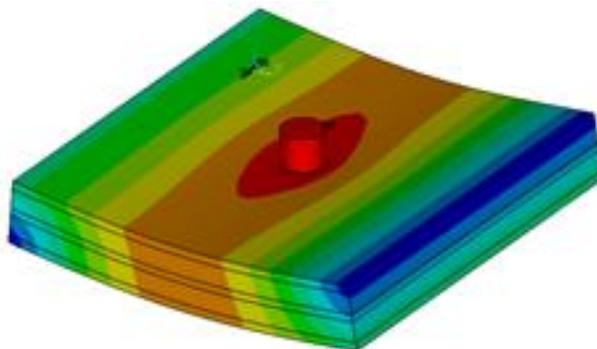


Рис. 4. Поле перемещений (максимальный прогиб – 1,45 мм)

Fig. 4. Displacement field (maximum deflection – 1.45 mm)

Т а б л и ц а 1

## Результаты расчета полей напряжений и перемещений

Толщина РЗС, мм	Напряжение, МПа	Прогиб, мм
1	98	12,8
2	60	5,41
3	27	1,45

Дальнейшие эксперименты по исследованию материала проходили по двум направлениям: определение оптимальной рецептуры пропитывающего состава и рациональных режимов прессования материала.

Определение рецептуры пропитывающего состава для РЗС проводили согласно плану В<sub>3</sub> (Бокса) для трех независимых переменных [2]. Постоянные факторы эксперимента приведены в табл. 2, значения входных параметров и диапазоны их изменения – в табл. 3.

Т а б л и ц а 2

## Постоянные факторы при определении пропитывающего состава для РЗС

№ п/п	Фактор	Значение фактора с ошибкой определения
1	Продолжительность смешивания компонентов, мин	5±1
2	Продолжительность сушки РЗС, ч	48±1
3	Температура прессования, °С	50±2
4	Продолжительность прессования РЗС, мин	5±1
5	Толщина рентгенозащитного слоя, мм	3,0±0,1

Т а б л и ц а 3

## Значения входных параметров и диапазоны их изменений при определении пропитывающего состава для РЗС

№ п/п	Показатель	Переменная	Натуральные значения			Шаг варьирования
			-1	0	+1	
1	Количество наполнителя (сульфата бария), г	$x_1$	150	175	200	25
2	Количество связующего (ПВА-клея), г	$x_2$	100	150	200	50
3	Количество воды, г	$x_3$	80	95	110	15

На основании статистической обработки результатов эксперимента были построены регрессионные модели, адекватно описывающие защитные свойства РЗС:

$$y_1 = 1602,9 + 189,47x_1 - 281,6x_2 - 58,27x_3 - 7,92x_1^2 + 130,75x_2^2 + 23,75x_3^2 - 97,58x_1x_2 + 9,25x_1x_3 - 13,67x_2x_3; \quad (1)$$

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

где  $y_1$  – плотность рентгенозащитного слоя, кг/м<sup>3</sup>;  $y_2$  – свинцовый эквивалент, мм Pb/мм;  $x_1$  – количество наполнителя, г;  $x_2$  – количество связующего, г;  $x_3$  – количество воды, г.

На рис. 5 приведены поверхности отклика свинцового эквивалента РЗС от количества компонентов, входящих в пропитывающий состав.

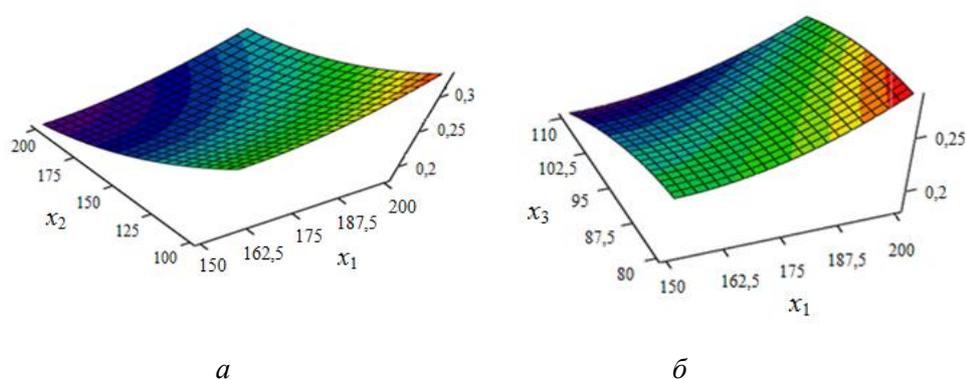


Рис. 5. Поверхность отклика (выходной параметр – свинцовый эквивалент):  $x_1$  – количество наполнителя;  $x_2$  – количество связующего;  $x_3$  – количество воды

Fig. 5. Response surface (output parameter – lead equivalent):  $x_1$  – amount of filler;  $x_2$  – amount of binder;  $x_3$  – amount of water

Уравнения регрессии (1) и (2) использовались для определения оптимальной рецептуры пропитывающего состава с применением метода покоординатного поиска [2]. Была поставлена задача оптимизации:

целевая функция плотности РЗС

$$W_1 = 1602,9 + 189,47x_1 - 281,6x_2 - 58,27x_3 - 7,92x_1^2 + 130,75x_2^2 + 23,75x_3^2 - 97,58x_1x_2 + 9,25x_1x_3 - 13,67x_2x_3 \rightarrow \max; \quad (3)$$

целевая функция свинцового эквивалента РЗС

$$W_2 = 0,23 + 0,025x_1 - 0,049x_2 - 0,028x_3 + 0,013x_1^2 + 0,015x_2^2 - 0,008x_3^2 + 0,017x_1x_2 - 0,002x_1x_3 - 0,027x_2x_3 \rightarrow \max. \quad (4)$$

Для функций (3) и (4) система ограничений имеет следующий вид:

$$-1 \leq x_1 \leq 1;$$

$$-1 \leq x_2 \leq 1;$$

$$-1 \leq x_3 \leq 1.$$

Компромиссная задача была решена методом условного центра масс [2]. Рациональные количества компонентов в пропитывающем составе для РЗС: наполнителя – 197 г ((51±2) %); связующего – 100 г ((26±1) %); воды – 86 г ((23±1) %). Эти значения позволяют получить РЗС плотностью 2354 кг/м<sup>3</sup>, имеющий свинцовый эквивалент 0,27 мм Pb/мм.

Определение режимов прессования слоистого материала проводили аналогично описанному выше. Постоянные факторы эксперимента приведены в табл. 4, значения входных параметров и диапазоны их изменений – в табл. 5.

Т а б л и ц а 4

**Постоянные факторы при определении режимов прессования**

№ п/п	Фактор	Значение фактора
1	Толщина РЗС, мм	3±0,1
2	Состав пропитывающей композиции, %:	
	наполнитель	51
	связующее	26
	вода	23
3	Слойность	3
4	Продолжительность открытой выдержки пакета, мин	6±1

Т а б л и ц а 5

**Значения входных параметров и диапазоны их изменений при определении режимов прессования**

№ п/п	Показатель	Переменная	Натуральные значения			Шаг варьирования
			-1	0	+1	
1	Расход связующего $q$ , г/м <sup>2</sup>	$x_1$	150	175	200	25
2	Температура прессования $t$ , °С	$x_2$	50	60	70	10
3	Продолжительность прессования $\tau$ , мин	$x_3$	6	7	8	1

Полученные результаты использовали для построения регрессионных моделей, описывающих физико-механические свойства материала:

$$y_{изг} = 38,1 + 1,19x_1 - 1,7x_2 + 1,65x_3 - 6,52x_1^2 + 0,23x_2^2 - 4,57x_3^2 + 0,34x_1x_2 - 0,22x_1x_3 + 0,02x_2x_3; \quad (5)$$

$$y_{ск} = 1,21 - 0,012x_1 - 0,086x_2 + 0,18x_3 - 0,27x_1^2 - 0,05x_2^2 - 0,09x_3^2 + 0,11x_1x_2 - 0,005x_1x_3 - 0,004x_2x_3; \quad (6)$$

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

где  $y_{изг}$ ,  $y_{ск}$ ,  $y_p$  – прочность при статическом изгибе, скалывании и растяжении, МПа;  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$  – см. в табл. 5.

По регрессионным моделям (5)–(7) были построены поверхности отклика (рис. 6).

Рациональные значения параметров прессования слоистого материала: расход связующего – 176 г/м<sup>2</sup>; температура прессования – 50 °С; продолжительность склеивания – 8 мин.

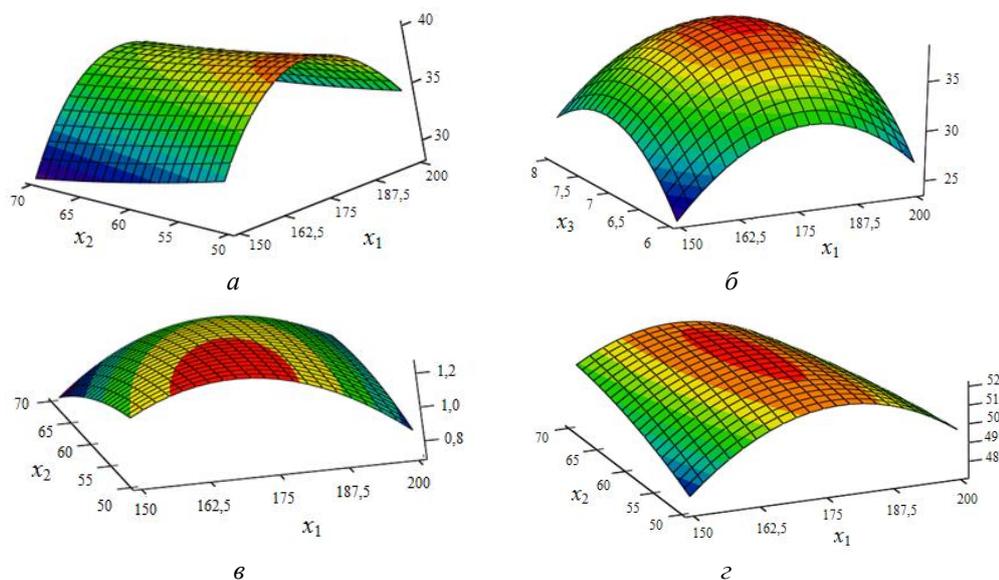


Рис. 6. Поверхность отклика (выходной параметр – прочность при статическом изгибе (а, б), скальвании (в), растяжении (г)):  $x_1$  – расход связующего;  $x_2$  – температура прессования;  $x_3$  – продолжительность прессования

Fig. 6. Response surface (output parameter – cross-breaking strength (а, б); shear strength (в); tensile strength (г)):  $x_1$  – binder consumption;  $x_2$  – pressing temperature;  $x_3$  – pressing time

Показатели физико-механических свойств материала: прочность при статическом изгибе – 39 МПа; прочность при скальвании – 1,34 МПа; прочность при растяжении – 53 МПа.

#### Выводы

1. Уменьшение толщины РЗС ведет к росту прогибов и напряжений в них.
2. Увеличение количества наполнителя и уменьшение количества связующего и воды в пропитывающем составе повышают плотность и защитные свойства РЗС.
3. Оптимальная рецептура пропитывающей композиции, %: содержание минерального наполнителя – 51; содержание воды – 23; содержание связующего – 26.
4. Режимные параметры прессования материала: расход связующего – 176 г/м<sup>2</sup>; температура прессования – 50 °С; продолжительность склеивания – 8 мин.
5. Материал толщиной 9,5 мм (плотность 1600 кг/м<sup>3</sup>, свинцовый эквивалент 0,54 мм Рв/мм) обладает прочностью при статическом изгибе 39 МПа, при скальвании – 1,34 МПа, при растяжении – 53 МПа.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абушенко А.В. Что такое композиционные материалы? Режим доступа: <http://www.dpk-deck.ru/page/compositi-opred.html> (дата обращения: 25.01.2019).
2. Андреев В.Н., Герасимов Ю.Ю. Принятие оптимальных решений: теория и применение в лесном комплексе. Йожсуу, Финляндия: Изд-во ун-та Йоэнсуу, 1999. 200 с.

3. *Ветошкин Ю.И., Коцюба И.В., Яцун И.В., Одинцева С.А.* Общий подход к расчету напряженного деформированного состояния композиционного слоистого материала «Фанотрен Б» с защитными свойствами от рентгеновского излучения // Вестн. МГУЛ–Лесн. вестн. 2007. № 8. С. 149–152.
4. *Ветошкин Ю.И., Яцун И.В., Коцюба И.В.* Эксплуатационные свойства композиционных материалов на основе древесины: моногр. Екатеринбург: УГЛТУ, 2018. 100 с.
5. *Ветошкин Ю.И., Яцун И.В., Цой Ю.И.* Композиционный слоистый материал «Фанотрен» // Изв. СПбЛТА. 2015. Вып. 210. С. 149–156.
6. *Волынский В.Н.* Технология клееных материалов: учеб. пособие. Архангельск: Изд-во АГТУ, 1998. 295 с.
7. *Голубев Б.П.* Дозиметрия и защита от ионизирующих излучений. М.; Л.: Гос. науч.-техн. изд-во энергет. лит., 1963. 336 с.
8. *Леонов В.В., Артемьева О.А., Кравцова Е.Д.* Материаловедение и технология композиционных материалов: курс лекций. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2007. 241 с.
9. *Мэттьюс Ф., Ролингс Р.* Композитные материалы. Механика и технология: учеб. М.: Техносфера, 2004. 408 с.
10. *Одинцева С.А., Исаков С.Н., Яцун И.В.* Анализ напряженно-деформированного состояния слоистого материала специального назначения на основе древесины // Деревообраб. пром-сть, 2017. № 4. С. 34–39.
11. *Сидоров В.Н.* Лекции по сопротивлению материалов и теории упругости. М.: Ред.-изд. центр Ген. штаба ВС РФ, 2002. 352 с.
12. *Яцун И.В., Ветошкин Ю.И., Шишкина С.Б.* Применение отходов деревоперерабатывающих производств в изготовлении конструкционных материалов со специфическими свойствами // Лесотехн. журн. 2014. Т. 4, № 3(15). С. 220–229. DOI: 10.12737/6294
13. *Bekhta P., Salca E.-A.* Influence of Veneer Densification on the Shear Strength and Temperature Behavior inside the Plywood during Hot Press // Construction and Building Materials. 2018. Vol. 162. Pp. 20–26. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.11.161
14. *Bekhta P., Sedliacik Y.* Effect of Surface Treatment on Bondability of Birch Veneer with PF Resin // International Wood Products Journal. 2015. Vol. 6, iss. 2. Pp. 49–52. DOI: 10.1179/2042645314y.0000000089
15. *Gilbert B.P.* Compressive Strength Prediction of Veneer-Based Structural Products // Journal of Materials in Civil Engineering. 2018. Vol. 30, iss. 9. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002417
16. *Kajaks J., Kalnins K., Reihmane S., Bernava A.* Recycled Thermoplastic Polymer Hot Melts Utilization for Birch Wood Veneer Bonding // Progress in Rubber Plastics and Recycling Technology. 2014. Vol. 30, iss. 2. Pp. 87–102. DOI: 10.1177/147776061403000202
17. *Popovska V.J., Antonovic A., Iliev B.* Compressive Strength of Composite Wood-Based Panels // 26th International Conference on Wood Science and Technology (ICWST) Implementation of Wood Science in Woodworking Sector, 2015. Zagreb: Šumarski fakultet, 2015. Pp. 111–117.
18. *Popovska V.J., Iliev B., Zlateski G.* Impact of Veneer Layouts on Plywood Tensile Strength // Drvna Industrija. 2017. Vol. 68(2). Pp. 153–161. DOI: 10.5552/drind.2017.1634
19. *Shamaev V., Efimova T., Ishchenko T.* Production of High Strength Plywood from Birch Wood // Acta Facultatis Xylogiae Zvolen. 2018. Vol. 60(2). Pp. 135–141. DOI: 10.17423/afx.2018.60.2.13
20. *Spulle U., Lipinskis I., Tuherm H.* Some Bending Properties of I-Joists Made with Birch Laminated Plywood Panels // Drewno. 2017. Vol. 60, nr. 200. Pp. 125–134. DOI: 10.12841/wood.1644-3985.157.09

UDC 674.419

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.3.110

**Study of Physical and Mechanical and X-Ray Protection Properties of Wood-Based Composite Laminated Material “Fanotren B”***I.V. Yatsun, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: G-7651-2019,**ORCID: 0000-0003-3195-2410**A.G. Gorokhovskiy, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: O-6030-2018,**ORCID: 0000-0001-8847-8217**S.A. Odintseva, Candidate of Engineering, Senior Lecturer; ResearcherID: G-7837-2019,**ORCID: 0000-0002-6765-3941*

Ural State Forest Engineering University, ul. Sibirskiy trakt, 37, Yekaterinburg, 620100, Russian Federation; e-mail: iryatsun@mail.ru

Physical and mechanical and x-ray protection properties of new wood-based composite material “Fanotren B”, which consist of alternating layers of peeled birch veneer and reinforcing x-ray protective layers, are studied. The x-ray protective layer is nonwoven fabric – sintepon impregnated with x-ray protective composition; consist of barium sulfate, adhesive based on polyvinyl acetate dispersion and water. The material is recommended to be used in construction and decoration of premises in the areas with high radiation background. A distinctive feature of the developed material is the absence of lead and materials based on it. We had the following research objectives: to study the stress strain behavior of the material; to determine the balanced formulation of saturating composition for the x-ray protective layer; to evaluate its physical and mechanical properties. The stress – strain ratio of the material was simulated by the finite element method, the physical and mechanical properties were evaluated by the standard methods, the protective properties of the x-ray protective layer were measured by the lead equivalent of the image transparency on the radiograph with the use of lux meter. Theoretical studies have shown that the behavior of metal faced plywood under external load is described by the Sophie Germain’s equation with acceptable accuracy. The modeling was carried out on a solid model, which took into account mechanical properties of the materials included in the design and scheme of laying out the veneer layers. The developed model of the stress strain behavior has showed that the decrease of the protective layer thickness leads to the increase of deflections and stresses in it. Computer simulation revealed the stress increase in the areas of bonding the material protective layer and outer side of veneer. The impregnating composition was determined experimentally: mineral filler content is 51 %, binder content is 26 %, and water content is 23 %. The technological modes of composite laminated material formation were determined: binder consumption is 176 g/m<sup>2</sup>; pressing temperature is 50 °C; gluing time is 8 min. The material with the thickness of 9.5 mm has density of 1600 kg/m<sup>3</sup>; a lead equivalent is 0.54 mm Pb/mm; cross-breaking strength along the outer layers is 39 MPa; shear strength along the adhesive layer is 1.34 MPa; tensile strength along the fibers is 53 MPa.

**For citation:** Yatsun I.V., Gorokhovskiy A.G., Odintseva S.A. Study of Physical and Mechanical and X-Ray Protection Properties of Wood-Based Composite Laminated Material “Fanotren B”. *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 2019, no. 3, pp. 110–120. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.3.110

**Keywords:** composite material, metal faced plywood, X-ray protection, ionizing radiation protection, laminated wood-based material, composite plywood, stress strain behavior, physical and mechanical properties.

## REFERENCES

1. Abushenko A.V. *What are Composite Materials?* Available at: <http://www.dpk-deck.ru/page/compositi-opred.html> (accessed 25.01.19).

2. Andreev V.N., Gerasimov Yu.Yu. *Making Optimal Decisions: Theory and Application in the Forest Complex*. Finland, Joensuu University Publ., 1999. 200 p.
3. Vetoshkin Yu.I., Kotsyuba I.V., Yatsun I.V., Odintseva S.A. General Approach to the Calculation of the Stress Strain Behavior of the Composite Material “Fanotren B” with the X-Ray Protective Properties. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa – Lesnoy vestnik* [Forestry Bulletin], 2007, no. 8, pp. 149–151.
4. Vetoshkin Yu.I., Yatsun I.V., Kotsyuba I.V. *Operational Properties of Wood-Based Composite Materials*: Monography. Yekaterinburg, USFEU Publ., 2018. 100 p.
5. Vetoshkin Yu.I., Yatsun I.V., Tsoy Yu.I. Composite Laminated Material «Fanotren». *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehnicheskoj Akademii* [News of the Saint Petersburg State Forest Technical Academy], 2015, no. 210, pp. 149–156.
6. Volynskiy V.N. *Technology of Laminated Materials*. Arkhangelsk, ASTU Publ., 1998. 229 p.
7. Golubev B.P. *Dosimetry and Ionizing Radiation Protection*. Moscow, Gosudarstvennoye nauchno-tekhnicheskoye izdatel'stvo energeticheskoy literatury, 1963. 336 p.
8. Leonov V.V., Artem'yeva O.A., Kravtsova E.D. *Materials Science and Technology of Composite Materials*: Lecture Course. Krasnoyarsk, SibFU Publ., 2007. 241 p.
9. Matthews F.L., Rawlings R.D. *Composite Materials. Engineering and Science*. Moscow, Technosphaera Publ., 2004. 408 p.
10. Odintseva S.A., Isakov S.N., Yatsun I.V. Analysis of Stress Strain Behavior of Wood-Based Laminated Material of Special Purpose. *Derevoobrabativaushaya promishlennost'* [Woodworking Industry], 2017, no. 4, pp. 34–40.
11. Sidorov V.N. *Lectures on Mechanics of Materials and Theory*. Moscow, Printing and Publications Center of the General Staff of the Armed Forces of the Russian Federation, 2002. 352 p.
12. Yatsun I.V., Vetoshkin Y.I., Shishkin S.B. Application of Waste Wood of Processing Industries in the Manufacture of Construction Materials with Specific Properties. *Lesotehnicheskij zurnal* [Forestry Engineering Journal], 2014, vol. 4, no. 3(15), pp. 220–229.
13. Bekhta P., Salca E.-A. Influence of Veneer Densification on the Shear Strength and Temperature Behavior inside the Plywood during Hot Press. *Construction and Building Materials*, 2018, vol. 162, pp. 20–26. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.11.161
14. Bekhta P., Sedliacik Y. Effect of Surface Treatment on Bondability of Birch Veneer with PF Resin. *International Wood Products Journal*, 2015, vol. 6, iss. 2, pp. 49–52. DOI: 10.1179/2042645314y.0000000089
15. Gilbert B.P. Compressive Strength Prediction of Veneer-Based Structural Products. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2018, vol. 30, iss. 9. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002417
16. Kajaks J., Kalnins K., Reihmane S., Bernava A. Recycled Thermoplastic Polymer Hot Melts Utilization for Birch Wood Veneer Bonding. *Progress in Rubber Plastics and Recycling Technology*, 2014, vol. 30, iss. 2, pp. 87–102. DOI: 10.1177/147776061403000202
17. Popovska V.J., Antonovic A., Iliev B. Compressive Strength of Composite Wood-Based Panels. *26th International Conference on Wood Science and Technology (ICWST) Implementation of Wood Science in Woodworking Sector, 2015*. Zagreb, Šumarski fakultet, 2015, pp. 111–117.
18. Popovska V.J., Iliev B., Zlateski G. Impact of Veneer Layouts on Plywood Tensile Strength. *Drvna Industrija*, 2017, vol. 68(2), pp. 153–161. DOI: 10.5552/drind.2017.1634
19. Shamaev V., Efimova T., Ishchenko T. Production of High Strength Plywood from Birch Wood. *Acta facultatis xylologiae Zvolen*, 2018, vol. 60(2), pp. 135–141. DOI: 10.17423/afx.2018.60.2.13
20. Spulle U., Lipinskis I., Tuherm H. Some Bending Properties of I-Joists Made with Birch Laminated Plywood Panels. *Drewno*, 2017, vol. 60, nr. 200, pp. 125–134. DOI: 10.12841/wood.1644-3985.157.09

Received on January 30, 2019