

## Остаточные напряжения и прочность адгезионного соединения при склеивании листовенного шпона

С.П. Исаев<sup>a</sup>, О.И. Бегунков<sup>b</sup>, Н.О. Бегункова<sup>c</sup>

Тихоокеанский государственный университет, ул. Тихоокеанская, 136, Хабаровск, Россия

<sup>a</sup> IsaevSP@pnu.edu.ru, <sup>b</sup> olegbeg@mail.ru, <sup>c</sup> natali-beg@mail.ru

<sup>a</sup> <https://orcid.org/0000-0003-1469-1300>,

<sup>b</sup> <https://orcid.org/0000-0002-5046-4212>,

<sup>c</sup> <https://orcid.org/0000-0001-5069-9604>

Статья поступила 21.10.2019, принята 14.11.2019

*В статье рассмотрен вопрос возникновения остаточных напряжений в клеевом слое при изготовлении фанеры из древесины лиственницы. Определены технологические факторы, вызывающие возникновение остаточных напряжений в клеевом соединении шпона в результате пьезотермообработки. Получены аналитические выражения, позволяющие определять значения остаточных напряжений в клеевом слое фанеры в зависимости от расхода клея — показатель, от которого в значительной степени зависит формирование «пограничного слоя», определяемого глубиной проникновения клея в древесину. Исследование напряженного состояния клеевого соединения шпона дает возможность установить взаимосвязь между технологическими параметрами процесса склеивания и характером возникновения остаточных напряжений, что позволяет управлять качеством процесса производства фанеры. Для этого рассмотрены и проанализированы способы определения остаточных напряжений в клеевых соединениях. Исходя из проведенного анализа, разработан метод определения остаточных напряжений в клеевом соединении шпона при производстве фанеры, который базируется на использовании тензометрии, а для оценки характера изменения остаточных напряжений, в зависимости от основных технологических параметров склеивания шпона, применен метод математического планирования с использованием насыщенного плана Рехтшафнера. Отмечено, что определяющее влияние на величину остаточных напряжений в клеевом слое фанеры оказывают расход клея, давление прессования, время выдержки в прессе, а также температура плит пресса. В результате проведенных теоретико-экспериментальных исследований предложена методика оптимизации режима склеивания, которая позволяет определять параметры получения фанеры с высокой прочностью с одновременным обеспечением в ней небольших остаточных напряжений.*

**Ключевые слова:** шпон; фанера; клей; клеевой слой; остаточные напряжения; прочность.

## Residual stresses and adhesive bond strength when gluing larch veneer

S.P. Isaev<sup>a</sup>, O.I. Begunkov<sup>b</sup>, N.O. Begunkova<sup>c</sup>

Pacific National University; 136, Tikhookeanskaya St., Khabarovsk, Russia

<sup>a</sup> IsaevSP@pnu.edu.ru, <sup>b</sup> olegbeg@mail.ru, <sup>c</sup> natali-beg@mail.ru

<sup>a</sup> <https://orcid.org/0000-0003-1469-1300>,

<sup>b</sup> <https://orcid.org/0000-0002-5046-4212>,

<sup>c</sup> <https://orcid.org/0000-0001-5069-9604>

Received 21.10.2019, accepted 14.11.2019

*The article considers the issue of residual stresses in the adhesive layer in the manufacture of plywood from larch wood. Technological factors causing the occurrence of residual stresses in the adhesive joint of veneer as a result of pressure-heat treatment are determined. Analytical expressions are obtained that make it possible to determine the values of residual stresses in the adhesive layer of plywood depending on the flow rate of glue, the value of which largely determines the formation of the "boundary layer", determined by the depth of penetration of glue into the wood. The study of the stress state of the veneer adhesive connection allows establishing the relationship between the technological parameters of the bonding process and the nature of the occurrence of residual stresses, which makes it possible to control the quality of the plywood production process. For this purpose, methods for determining residual stresses in adhesive joints have been considered and analyzed. Based on the analysis, a method has been developed and proposed for determining the residual stresses in the glued veneer joint in plywood production, which is based on the use of tensometry. To assess the nature of the change in residual stresses depending on the main technological parameters of veneer gluing, the method of mathematical planning using the rich Rechschafer's plan is used. It is noted that the decisive influence on the amount of residual stresses in the plywood adhesive layer is exerted by the glue consumption, pressing pressure, holding time in the press, and also the temperature of the press plates. As a result of theoretical and experimental studies, a method for optimizing the bonding mode was proposed, which allows one to determine the parameters for producing plywood with high strength while providing small residual stresses in it*

**Keywords:** veneer; plywood; glue; adhesive layer; residual stresses; strength.

**Введение.** Вопрос о напряжениях в адгезионных соединениях имеет несколько самостоятельных аспектов. Во-первых, межфазная граница в адгезионных соединениях оказывает влияние на скорость происходящих в них релаксационных процессов [19]. Поэтому от характера межфазных связей и их плотности, а также от структуры и свойств граничных слоев зависит кинетика релаксационных процессов, что в конечном итоге определяет долговечность адгезионных соединений. Во-вторых, в адгезионных соединениях особенно велика роль остаточных напряжений. Обусловленные особенностями химической природы полимера, режимов процесса формирования адгезионного соединения, различием термических коэффициентов расширения компонентов адгезионного соединения, эти напряжения, по существу, выполняют роль дополнительной нагрузки, снижающей прочность адгезионного соединения [20; 21].

Известно, что в отдельных случаях остаточные напряжения могут достигать по величине несущей способности материала, а также способствовать возникновению различных деформаций и короблений конструкций. Поэтому тема оценки максимального снижения остаточных напряжений в фанере, широко используемой в качестве конструкционного материала, является актуальной. В исследованиях различных авторов [1–11] отражены те или иные аспекты данного вопроса.

*Цель работы* — получение режима склеивания фанеры с минимальными остаточными напряжениями.

Задачи исследования, решаемые в данной работе, сформулированы следующим образом:

- 1) теоретически оценить величину остаточных напряжений в клеевом соединении шпона;
- 2) изучить влияние основных технологических факторов режима склеивания фанеры на остаточные напряжения;
- 3) построить математическую модель, отражающую влияние технологических факторов на величину остаточных напряжений;
- 4) рекомендовать режим склеивания, обеспечивающий минимальные остаточные напряжения в фанере и высокую ее прочность.

**Теоретико-экспериментальная оценка остаточных напряжений в клеевом соединении шпона.** Остаточные напряжения, возникающие в клеевом соединении шпона при изготовлении фанеры, обусловлены усушкой слоев пакета при склеивании и разбуханием при увлажнении (без нагрузки) и могут быть определены по формуле [12]:

$$\tau_{\text{ост}} = \Delta w \cdot \beta \cdot \omega \cdot \frac{sh \omega \cdot x}{ch \frac{\omega \cdot l}{2}}, \quad (1)$$

$$\omega^2 = \frac{G_{\text{кл}}}{E_1 \cdot h_2 \cdot h_{\text{кл}}} \cdot \left( 1 + \frac{E_2 \cdot h_2}{E_1 \cdot h_1} \right),$$

$$\beta = \frac{G_{\text{кл}}}{\omega \cdot h_{\text{к}}} \cdot (\alpha_1 - \alpha_2),$$

где  $\Delta w$  — величина различия между влажностью готовой фанеры и влажностью шпона с нанесенным клеевым слоем;  $G_{\text{кл}}$  — модуль сдвига клея;  $E_1, E_2$  — модули упругости склеиваемых листов шпона вдоль и

поперек волокон соответственно;  $h_1, h_2$  — толщины контактируемых листов шпона в склеиваемом пакете;  $h_{\text{к}}$  — толщина клеевого слоя;  $h_{\text{кл}}$  — толщина слоя клея между листами шпона;  $l$  — длина клеевого слоя;  $\alpha_1, \alpha_2$  — коэффициенты усушки склеиваемых листов шпона вдоль и поперек волокон соответственно;  $x$  — ширина клеевого слоя.

При склеивании листов шпона значения  $\omega \cdot l$  и  $\omega \cdot x$  достаточно велики, поэтому оправданно предположить, что отношение:

$$\frac{sh \omega \cdot x}{ch \frac{\omega \cdot l}{2}} = 1.$$

Следовательно, уравнение (1) примет следующий вид:

$$\tau_{\text{ост}} = \Delta w \cdot \beta \cdot \omega. \quad (2)$$

Согласно методу «пограничного слоя» [12], коэффициенты  $\omega$  и  $\beta$  в случае склеивания шпона равных толщин, с учетом глубины проникновения клея в древесину, могут быть определены по формулам:

$$\omega^2 = \frac{G_{\text{кл}}}{E_{2\text{к}} \cdot S_{\text{шп}} \cdot (2 \cdot h_{\text{п}} + h_{\text{кл}})} \cdot \left( 1 + \frac{E_{2\text{к}}}{E_{1\text{к}}} \right), \quad (3)$$

$$\beta = \frac{G_{\text{кл}}}{\omega \cdot h_{\text{п}}} \cdot (\alpha_1 - \alpha_2),$$

где  $E_{1\text{к}}$  — модуль упругости шпона, пропитанного клеем на глубину  $h_{\text{п}}$  при сжатии вдоль волокон;  $E_{2\text{к}}$  — модуль упругости шпона, пропитанного клеем на глубину  $h_{\text{п}}$  при сжатии поперек волокон;  $h_{\text{кл}}$  — толщина слоя клея между листами шпона;  $S_{\text{шп}}$  — толщина шпона.

Обобщенно формулу для определения напряжений в клеевом слое с учетом глубины проникновения клея в древесину можно определить следующим образом:

$$\tau_{\text{ост}} = \Delta w \cdot \frac{G_{\text{кл}}}{\omega \cdot h_{\text{п}}} \cdot (\alpha_1 - \alpha_2). \quad (4)$$

Полученное уравнение (4) позволяет сделать вывод о значительном влиянии на величину остаточных напряжений глубины проникновения клея в древесину. При этом глубина проникновения клея в древесину не является величиной постоянной и определяется прежде всего термодинамическими характеристиками клея и его расходом [13–18]. В этой связи проведен эксперимент по установлению влияния основных факторов режима склеивания на величину остаточных напряжений в клеевом слое листовенной фанеры.

#### Экспериментальная часть.

*Изучение влияния основных технологических факторов режима склеивания на остаточные напряжения.* В статье [1] рассмотрены различные способы оценки внутренних (остаточных) напряжений, отражены методики определения остаточных напряжений склеенной фанеры и предлагается использование тензометрического метода для их оценки.

Ранее проведенными исследованиями [2] по разработке режима склеивания фанеры конструкционного назначения были обоснованы шесть основных техноло-

гических факторов (табл. 1).

Таблица 1

Параметры переменных факторов

Наименование	Обозначение	Уровни варьирования	
		верхний	нижний
Расход клея, $кг/м^2$	$X_1$	0,180	0,140
Давление прессования, МПа	$X_2$	2,0	1,0
Время склеивания, с	$X_3$	640	420
Вязкость клея, с по ВЗ-4	$X_4$	180	60
Температура, °С	$X_5$	403	375
Наполнитель, масс. ч.	$X_6$	4	0

Для объективной оценки качества разрабатываемых режимов изготовления конструкционной фанеры в работах [2; 3] предлагаются на этапе экспериментальных исследований следующие выходные параметры: предел прочности при растяжении вдоль ( $Y_1$ ) и поперек ( $Y_2$ ) волокон; предел прочности при скалывании по клеевому слою вдоль наружных слоев ( $Y_3$ ); остаточные деформации ( $Y_4$ ).

Однако достоинства фанеры становятся реальными, если она сохраняет свои свойства в течение всего срока эксплуатации. При этом нельзя упускать из виду те напряжения, которые образуются как в период формирования клевого соединения (временные), так и в период остывания фанеры (остаточные) [4]. Учитывая определенную сложность определения временных напряжений в эксперименте, фиксировались только остаточные напряжения ( $Y_5$ ).

Для построения математической модели, отражающей влияние технологических факторов процесса склеивания фанеры на остаточные напряжения, использовали методы математического планирования экспериментов. В частности, использовали насыщенный план Рехтшафнера. Построение зависимости остаточных напряжений от технологических факторов режима склеивания позволит учитывать их при обосновании режима изготовления конструкционной фанеры.

Для определения остаточных напряжений на листе склеиваемого листа фанеры были выделены специальные зоны. На рис. 1 показаны зоны, из которых получают образцы для наклеивания тензодатчиков, и образцы шпона, прошедшие термо- и пьезообработку, для определения прочностных и упругих характеристик.

При таком распределении датчиков регистрировались деформации только в одном направлении, хотя, как отмечает А.Б. Израелит [7], материал будет испытывать плоское напряженное состояние. Такое допущение, естественно, вызовет некоторое искажение результатов. Однако при определении остаточных напряжений не ставилась цель определить точные числовые значения этих величин. Задача состояла в том, чтобы оценить с помощью методов математического планирования экспериментов влияние различных факторов режима склеивания и их взаимодействий на величину

остаточных напряжений в фанере.

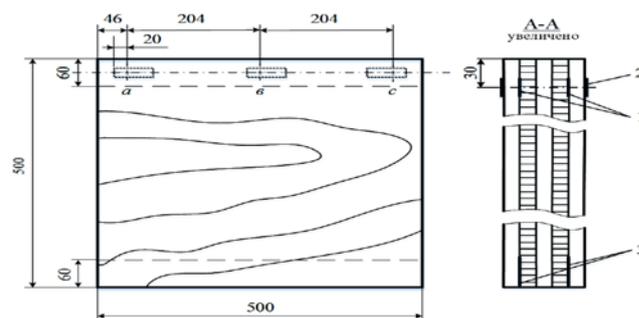


Рис. 1. Схема точек наклеивания датчиков и сверления отверстий на листе фанеры: 1 — полоски антиадгезионной пленки; 2 — тензодатчики; 3 — полосы антиадгезионной пленки

Расчетная схема определения остаточных напряжений показана на рис. 2.

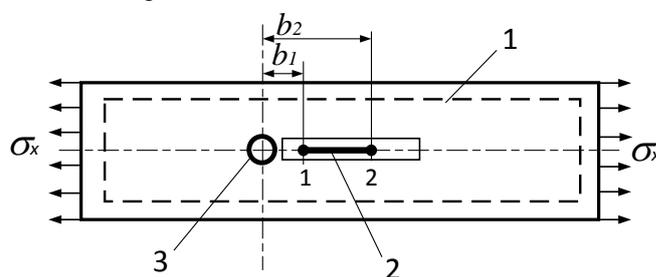


Рис. 2. Расчетная схема определения остаточных напряжений: 1 — антиадгезионная пленка; 2 — тензодатчик; 3 — отверстие

Для выявления остаточных напряжений был использован метод отверстий. При этом необходимо специально нарушить равновесное напряженное состояние в изготовленном материале (фанере) с помощью механического на него воздействия, например, сверления отверстия на глубину лицевого слоя. После сверления отверстия происходит перемещение материала между точками 1 и 2. Причиной перемещения точек являются деформации, возникающие при перераспределении напряжений в результате концентрации их вокруг сделанного отверстия. Такой метод для определения остаточных напряжений трехслойных конструкций использовали в работе [6].

Данный метод предполагает также исключение адгезионной связи на участке измерения деформаций в точках 1–2. Для этого предварительно перед склеиванием закладываются полоски антиадгезионной пленки (см. рис. 1) под наружные слои шпона размером  $20 \times 60$  мм. После склеивания из верхней зоны листа фанеры отделялась полоска шириной 60 мм, из которой изготавливалось три образца. На каждый образец с двух сторон наклеивались тензодатчики.

В нижней зоне пакета шпона также закладывается сплошная полоска антиадгезионной пленки размером  $60 \times 500$  мм. Листы шпона при прессовании уплотняются (особенно наружные), поэтому изменяются их прочностные и упругие характеристики. Полоска шпона отделяется после склеивания от листа фанеры, затем находятся прочностные и упругие свойства шпона.

Остаточные напряжения определялись по следующим формулам [5]:

$$\begin{aligned}\sigma_r &= \frac{\sigma_x}{2} \left( 1 - \frac{a^2}{r^2} \right) + \frac{\sigma_x}{2} \left( 1 + \frac{3a^4}{r^4} - 4 \frac{a^2}{r^2} \right) \cos 2\theta, \\ \sigma_\theta &= \frac{\sigma_x}{2} \left( 1 + \frac{a^2}{r^2} \right) - \frac{\sigma_x}{2} \left( 1 + \frac{3a^4}{r^4} \right) \cos 2\theta, \\ \tau_{r\theta} &= \frac{\sigma_x}{2} \left( 1 - \frac{3a^4}{r^4} + 2 \frac{a^2}{r^2} \right) \sin 2\theta,\end{aligned}$$

где  $\sigma_r$ ,  $\sigma_\theta$ ,  $\tau_{r\theta}$  — компоненты напряжений в точке с координатами  $r$  и  $\theta$ .

Для точек 1 и 2, расположенных на оси отверстия, имеем  $\theta = 0$ , и формулы соответственно упрощаются:

$$\begin{aligned}\sigma_r &= \frac{\sigma_x}{2} \left( 2 + \frac{3a^4}{r^4} - 5 \frac{a^2}{r^2} \right), \\ \sigma_\theta &= \frac{\sigma_x}{2} \left( \frac{a^2}{r^2} - \frac{3a^4}{r^4} \right), \\ \tau_{r\theta} &= 0.\end{aligned}$$

Эти формулы выражают те части напряжений, которые остаются после сверления отверстия. Разность радиальных и тангенциальных напряжений, образовавшихся в процессе сверления, будет равна:

$$\begin{aligned}\sigma'_r &= \sigma_x - \sigma_r = \frac{\sigma_x}{2} \left( 5 \frac{a^2}{r^2} - \frac{3a^4}{r^4} \right), \\ \sigma'_\theta &= \sigma_\theta - \frac{\sigma_x}{2} \left( \frac{a^2}{r^2} - \frac{3a^4}{r^4} \right).\end{aligned}$$

Подставляя полученные формулы в выражение обобщенного закона Гука, получим:

$$\begin{aligned}\varepsilon_r &= \frac{du}{dr} = \frac{1}{E} (\sigma'_r - \mu \sigma'_\theta), \\ \frac{du}{dr} &= \frac{a^2 \sigma_x}{2E} (5 + \mu) \frac{1}{r^2} - 3a^2 (1 + \mu) \frac{1}{r^4}.\end{aligned}$$

Для разности перемещений между точками 1 и 2 имеем:

$$\Delta_{1,2} = U_1 - U_2 = \int_{b_1}^{b_2} \frac{du}{dr} dr = \frac{a^2 \sigma_x^{\text{ост}}}{2E} R_1.$$

Тогда остаточные в лицевом слое напряжения будут определяться по формуле:

$$\sigma_x = \frac{2E \Delta_{1,2}}{a^2 R_1},$$

в которой:

$$R_1 = \frac{1}{b_1} \left[ 4 + (1 + \mu) \left( 1 - \frac{a^2}{b_1^2} \right) \right] - \frac{1}{b_2} \left[ 4 + (1 + \mu) \left( 1 - \frac{a^2}{b_2^2} \right) \right],$$

где  $E$  — модуль упругости лицевого слоя фанеры;  $\Delta_{1,2}$  — разность перемещения точек 1 и 2, произошедшего при сверлении в лицевом слое отверстия малого диаметра;  $a$  — радиус просверленного отверстия;  $b_1$  и  $b_2$  — расстояния от центра до точки 1 и 2 соответственно;  $\mu$  — коэффициент Пуассона шпона.

Разность перемещения точек 1 и 2 определялась экспериментально. Для этого применялись тензодатчики с базой 20 мм и автоматический измеритель деформаций АИД-2М. Точка 1 соответствовала началу решетки тензодатчика, а точка 2 — ее концу.

*Построение математической модели, отражающей влияние технологических факторов на величину остаточных напряжений.* В результате реализации матрицы планирования эксперимента согласно плану Рехтшафнера были получены экспериментальные данные испытания образцов. После обработки данных методами математической статистики с помощью ЭВМ было получено уравнение регрессии, отражающее влияние технологических факторов режима склеивания на остаточные напряжения:

$$\begin{aligned}Y &= 3,355 + 1,020X_1 + 1,041X_2 + 0,105X_3 + \\ &+ 0,430X_4 + 2,203X_5 - 0,262X_6 - 1,361X_1^2 + \\ &+ 0,231X_1X_2 + 0,501X_1X_5 + 0,681X_1X_6 - \\ &- 0,432X_2^2 + 0,301X_2X_4 + 0,493X_2X_5 - \\ &- 0,265X_2X_6 - 0,496X_3^2 + 0,156X_3X_5 - \\ &- 0,639X_3X_6 - 0,671X_4^2 - 0,104X_4X_5 - \\ &- 0,331X_4X_6 + 1,596X_5^2 + 0,151X_5X_6 + 1,101X_6^2,\end{aligned}\quad (5)$$

где  $X_1$  — расход клея;  $X_2$  — давление прессования;  $X_3$  — время выдержки в прессе;  $X_4$  — вязкость клея по ВЗ-4;  $X_5$  — температура плит пресса;  $X_6$  — наполнитель (древесная мука).

Для оптимизации режима склеивания фанеры также было использовано полученное уравнение регрессии. Решение задачи выполнялось на ЭВМ с применением алгоритма «случайный поиск с пересчетом» и принятых ограничений [2]. Результаты решения, а также остаточные напряжения в выбранных режимных точках приведены в табл. 2. В таблице представлены параметры пяти режимных точек, удовлетворяющих нашим условиям, а в табл. 3 — уровни факторов для этих точек в кодированном виде.

*Обоснование режима склеивания, обеспечивающего минимальные остаточные напряжения в фанере и высокую ее прочность.* Основным критерием для выбора режимной точки является прочность фанеры, которая оценивается комплексным показателем ее качества. В него входят все четыре выходных функции (см. табл. 2), а также введенный нами дополнительно пятый показатель — остаточные напряжения.

Анализ приведенных данных показывает, что явные преимущества имеет режимная точка V, имеющая в сравнении с другими более высокие прочностные показатели и меньшую упрессовку. Остаточные напряжения в этой точке также достаточно низкие.

Среди остальных режимных точек заслуживает внимания точка I. В целом фанера, существенно не уступая по прочности точкам (III–IV), имеет самые низкие показатели по остаточным напряжениям и более низкую упрессовку. Что касается в целом точек (II–IV), то они, имея неплохие прочностные характеристи-

ки, заметно превышают показатели по упрессовке и остаточным напряжениям (особенно точка II).

Таблица 2  
Расчетные значения выходных функций в точках условного экстремума

Наименование выходных функций	Значения выходных функций в точках				
	I	II	III	IV	V
Предел прочности при растяжении вдоль волокон, МПа ( $Y_1$ )	58,08	60,31	57,05	58,67	61,06
Предел прочности при растяжении поперек волокон, МПа ( $Y_2$ )	34,05	39,07	31,79	32,97	36,73
Предел прочности при скальвании, МПа ( $Y_3$ )	1,54	1,49	1,38	1,38	1,51
Упрессовка фанеры, % ( $Y_4$ )	16,52	20,69	18,65	16,91	15,71
Остаточные напряжения, МПа ( $Y_5$ )	2,05	6,08	2,52	2,87	2,68

Примечание: расчетные значения прочностных характеристик даны при влажности 12 %.

Таблица 3  
Координаты условных экстремумов

Наименование факторов	Координаты условных экстремумов в кодированном виде в точках				
	I	II	III	IV	V
Расход клея	-0,60	1,00	-1,00	0,97	0,96
Давление	0,19	0,65	-0,29	0,32	0,01
Время	0,00	0,14	-0,18	-0,24	0,17
Вязкость	1,00	1,00	-0,91	-0,99	1,00
Температура	-0,99	0,54	0,78	-0,97	-0,73
Наполнитель	-0,10	1,00	-0,53	-0,77	0,97

Теоретические исследования достаточно хорошо согласуются с результатами проведенных экспериментов. На рис. 3 показаны зависимости остаточных напряжений в клеевом слое листовенной фанеры от расхода клея, полученные на основе расчетных формул (3) и (4) и в результате обработки данных эксперимента.

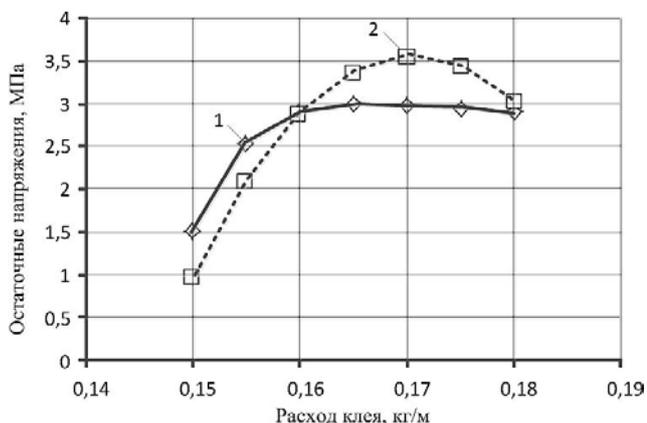


Рис. 3. Зависимости остаточных напряжений от расхода клея в клеевом слое листовенной фанеры: 1 — экспериментальная зависимость; 2 — теоретическая зависимость

Анализ изображенных на рис. 3 зависимостей позволяет сделать следующие промежуточные выводы:

- относительное расхождение между расчетными и экспериментальными значениями остаточных напряжений в зависимости от расхода клея изменяется в интервале от 1,3 до 35,5 %, что указывает на существенное влияние глубины проникновения клея в древесину шпона; при этом происходит также упрочнение разрушенного в процессе лущения шпона;

- характер теоретической кривой изменения остаточных напряжений в зависимости от расхода клея соответствует характеру экспериментальной зависимости, что подтверждается наличием корреляционной связи между расчетными и экспериментальными данными ( $R = 0,954$ );

- глубина проникновения клея в древесину зависит не только от его расхода, но также от других технологических параметров склеивания шпона в производстве фанеры.

Построенные по уравнению регрессии (5) зависимости, отражающие влияние давления, вязкости и температуры (рис. 4–6), показывают, что данные факторы для рассматриваемых режимных точек, как правило, имеют минимальные остаточные напряжения.

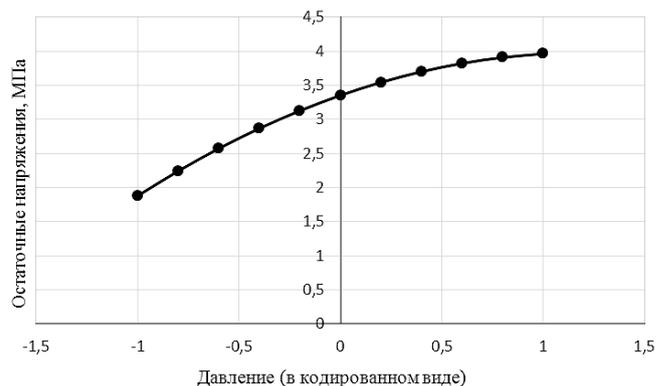


Рис. 4. Зависимость остаточных напряжений в фанере от давления прессования

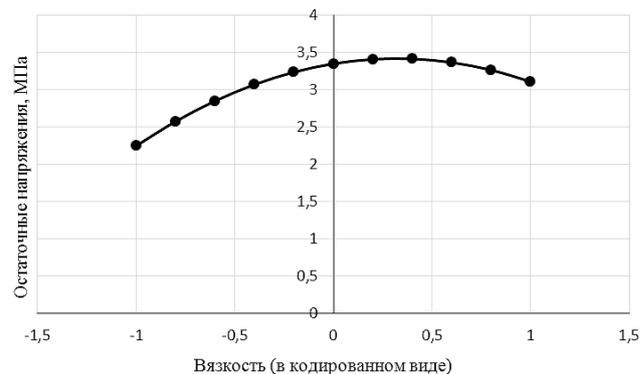


Рис. 5. Зависимость остаточных напряжений в фанере от вязкости клея

**Выводы.** Аналитические зависимости теоретической оценки величины остаточных напряжений в клеевом соединении шпона соответствуют результатам экспериментальных исследований, что позволяет прогнозировать развитие остаточных напряжений в клеевом слое фанеры.

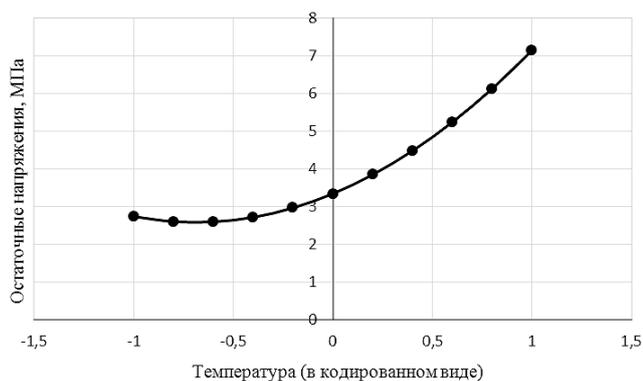


Рис. 6. Зависимость остаточных напряжений в фанере от температуры плит пресса

На рис. 7 показано совместное влияние давления прессования и температуры плит пресса на величину остаточных напряжений в фанере.

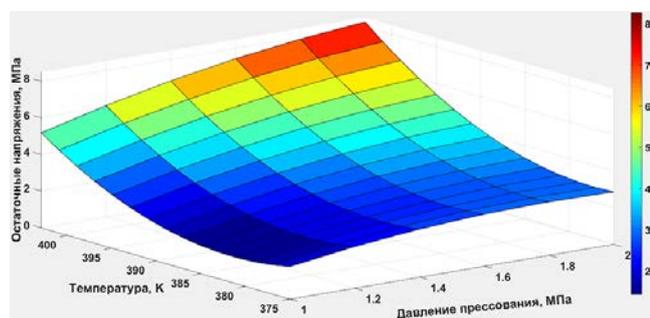


Рис. 7. Зависимость остаточных напряжений в фанере от давления прессования и температуры плит пресса

В результате изучения влияния основных технологических факторов режима склеивания шпона на остаточные напряжения в клеевом слое фанеры установлено, что основными технологическими параметрами, определяющими развитие остаточных напряжений и, как результат, прочность клевого соединения шпона, являются расход клея, давление прессования, время выдержки в прессе и температура плит пресса.

В целом можно сказать, что принятая методика оптимизации режима склеивания с целью получения фанеры с высокой прочностью обеспечивает также наличие в ней небольших остаточных напряжений.

#### Литература

1. Бегунков О.И., Бегункова Н.О. Оценка внутренних напряжений в фанере / Тихоокеан. гос. ун-т // Философия современного природопользования в бассейне реки Амур: материалы VII междунар. науч.-практической конф. Хабаровск, 2018. Вып. 7. С. 19–21.
2. Бегунков О.И. Исследование и разработка технологии склеивания фанеры конструкционного назначения марки ФСФ из древесины лиственницы: дис. ... канд. техн. наук. М., 1979. 191 с.
3. Бегунков О.И. Бегункова Н.О., Стёпина Д.С. Обоснование выходных параметров в исследованиях по разработке фанеры конструкционного назначения [Электронный ресурс] // Учен. заметки ТОГУ. 2017. Т. 8, № 1. С. 352 – 355. URL: [http://pnu.edu.ru/media/ejournal/articles-2017/TGU\\_8\\_57.pdf](http://pnu.edu.ru/media/ejournal/articles-2017/TGU_8_57.pdf) (дата обращения: 23.10.2019).

4. Сенчило Ю.Я. Исследование остаточных напряжений при склеивании строительных конструкций с применением пластмасс: дис. ... канд. техн. наук. М., 1969. 194 с.

5. Безухов Н.И. Примеры и задачи по теории упругости, пластичности и ползучести. М., 1965. 320 с.

6. Ковальчук Л.М., Сенчило Ю.Я. Остаточные напряжения при склеивании древесных материалов с бумажнослоистым пластиком // Деревообрабатывающая промышленность. 1970. № 1. С. 11–13.

7. Израелит А.Б. Оптимизация конструктивных форм гнутые изделия из шпона. М.: Лесная промышленность, 1977. 72 с.

8. Иванов Ю.М. Прочность и напряжения клеевых соединений древесины. М.: Лесная промышленность, 1973. 157 с.

9. Ковальчук Л.М. Производство деревянных клееных конструкций. М.: ООО РИФ «Стройматериалы», 2005. 336 с.

10. Глухих Л.С. Экспериментальное исследование внутренних напряжений в клеевом шве при фанеровании: дис. ... канд. техн. наук. Свердловск, 1970. 195 с.

11. Сасенко В.Т. Исследование и разработка новых видов фанеры конструкционного назначения из древесины лиственницы: дис. ... канд. техн. наук. М., 1980. 192 с.

12. Фрейдлин А.С., Турусов Р.А. Свойства и расчет адгезионных соединений. М.: Химия, 1990. 256 с.

13. Чубинский А.Н., Блыскова Г. Микроскопическое исследование фанеры в области клевого слоя // Лесной журнал. 1987. № 1. С. 122–124.

14. Chubinsky A.N., Okuma M., Sugiyama J. Observation on the deformation of wood cells in the gluing process of veneer // Bull. Of Tokyo Univ. Forests. 1990. Vol. 82, № 2. P. 131–135.

15. Goto T., Saiki H., Onishi H. Studies on wood gluing. XIII: Gluability and scanning electron microscopic study of wood-polypropylene bonding // Wood Sci. and Technol. 1982. Vol. 16, № 4. P. 21–31.

16. Harada H., Davies G.W., Plomley K.F. Preliminary microscopic studies of wood structure and adhesion in plywood // Forest Products J. 1968. Vol. 18, № 2. P. 86–90.

17. Hare D.F., Kutscha N.P. Microscopy of Eastern spruce plywood gluelines // Wood Sci. 1974. Vol. 1.6, № 3. P. 294–303.

18. Murmanis L., River B. H., Stewart H. Microscopy of abrasive-planed and knife-planed surfaces in wood-adhesives bounds // Wood and Fiber Sci. 1983. Vol. 15, № 2. P. 102–115.

19. Kurt R. The strength of press-glued and screw-glued wood-plywood joints // European Journal of Wood and Wood Products. 2003. Vol. 61, Is. 4. P. 269–272.

20. Kamke F.A., Lee J.N. Adhesive penetration in wood – a review // Wood and Fiber Sci. 2007. Vol. 39, № 2. P. 205–220.

21. Buckley C. J., Phanopoulos C., Khaleque N., Engle A., Hollwill M. E. J., Michette A. G. Examination of the penetration of polymeric di-phenyl-diisocyanate (pMDI) into wood structure using chemicalstate x-ray microscopy // Holzforschung. 2002. Vol. 56, № 2. P. 215–222.

#### References

1. Begunkov O.I., Begunkova N.O. Assessment of internal stresses in plywood / Tihookean. gos. un-t // Filosofiya sovremennogo prirodopol'zovaniya v bassejne reki Amur: materialy VII mezhdunar. nauch.-prakticheskoy konf. Habarovsk, 2018. Vyp. 7. P. 19–21.

2. Begunkov O.I. Research and development of technology bonding of plywood of structural naming of brand FFS from larch: dis. ... kand. tekhn. nauk. M., 1979. 191 p.

3. Begunkov O.I. Begunkova N.O., Styopina D.S. Justification of output parameters in research on the development of plywood for structural purposes [Elektronnyj resurs] // Uchen. zametki TOGU. 2017. Vol. 8, № 1. P. 352–355. URL:

[http://pnu.edu.ru/media/ejournal/articles-2017/TGU\\_8\\_57.pdf](http://pnu.edu.ru/media/ejournal/articles-2017/TGU_8_57.pdf)  
(data obrashcheniya: 23.10.2019).

4. Senchilo Yu.Ya. Study of residual stresses during bonding of structural structures using plastic: dis. ... kand. tekhn. nauk. M., 1969. 194 p.
5. Bezuhov N.I. Examples and problems in the theory of elasticity, plasticity and creep. M., 1965. 320 p.
6. Koval'chuk L.M., Senchilo Yu.Ya. Residual stresses when gluing wood materials with paper-layered plastic // *Derevoobrabatativaushaya promishlennost'* (Woodworking industry). 1970. № 1. P. 11–13.
7. Izraelit A.B. Optimization of structural forms of bent-glued veneer products. M.: *Lesnaya promyshlennost'*, 1977. 72 p.
8. Ivanov Yu.M. The strength and tension of the adhesive joints of wood. M.: *Lesnaya promyshlennost'*, 1973. 157 p.
9. Koval'chuk L.M. Production of wooden glued structures. M.: OOO RIF «Strojmaterialy», 2005. 336 p.
10. Gluhih L.S. Experimental study of internal stresses in the adhesive seam during veneering: dis. ... kand. tekhn. nauk. Sverdlovsk, 1970. 195 p.
11. Saenko V.T. Research and development of new types of structural plywood made of larch wood: dis. ... kand. tekhn. M., 1980. 192 p.
12. Frejdin A.S., Turusov R.A. Properties and calculation of adhesive compounds. M.: Himiya, 1990. 256 p.
13. Chubinskij A.N., Blyskova G. Microscopic examination of adhesive layer in plywood // *Lesnoj zhurnal*. 1987. № 1. P. 12–124.
14. Chubinsky A.N., Okuma M., Sugiyama J. Observation on the diformation of wood cells in the gluing process of veneer // *Bull. Of Tokyo Univ. Forests*. 1990. Vol. 82, № 2. P. 131–135.
15. Goto T., Saiki H., Onishi H. Studies on wood gluing. XIII: Gluability and scanning electron microscopic study of wood-polypropylene bonding // *Wood Sci. and Technol.* 1982. Vol. 16, № 4. P. 21–31.
16. Harada H., Davies G.W., Plomley K.F. Preliminary microscopic studies of wood structure and adhesion in plywood // *Forest Products J.* 1968. Vol.18, № 2. P. 86–90.
17. Hare D.F., Kutscha N.P. Microscopy of Eastern spruce plywood gluelines // *Wood Sci.* 1974. Vol. 1.6, № 3. P. 294–303.
18. Murmanis L., River B. H., Stewart H. Microscopy of abrasive-planed and knife-planed surfaces in wood-adhesives bounds // *Wood and Fiber Sci.* 1983. Vol. 15, № 2. P. 102–115.
19. Kurt R. The strength of press-glued and screw-glued wood-plywood joints // *European Journal of Wood and Wood Products*. 2003. Vol. 61, Is. 4. P. 269–272.
20. Kamke F.A., Lee J.N. Adhesive penetration in wood - a review // *Wood and Fiber Sci.* 2007. Vol. 39, № 2. P. 205–220.
21. Buckley C.J., Phanopoulos C., Khaleque N., Engleln A., Hollwill M.E.J., Michette A.G. Examination of the penetration of polymeric di-phenyl-diisocyanate (pMDI) into wood structure using chemicalstate x-ray microscopy // *Holzforschung*. 2002. Vol. 56, № 2. P. 215–222.