

УДК 674.11

А. А. Барташевич, Л. В. Игнатович, С. С. Утгоф
Белорусский государственный технологический университет

РАСЧЕТ ТЕПЛОВЫХ И ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМОВ СКЛЕИВАНИЯ СЛОИСТЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ДРЕВЕСНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В данной работе приведены расчеты тепловых и деформационных параметров режимов склеивания слоистых композиционных древесных материалов. Представлены формулы для определения температуры в зоне клеевой прослойки слоистых клееных материалов, а также деформационные параметры процесса склеивания фанеры, связанные с зависимостями давления прессования от различных факторов. Тепловые и деформационные параметры режимов склеивания учитываются при составлении технологических режимов изготовления фанеры, фанерных плит или другой продукции, в частности новой сложной формы, которые можно определять экспериментально или расчетным методом.

Известно, что на качество клееных слоистых материалов оказывает большое влияние температурно-деформационная зависимость параметров склеивания. Теоретический метод расчета тепловых и деформационных параметров режимов склеивания слоистых композиционных древесных материалов, приведенный в статье, следует использовать в исследовательских целях, при освоении нового, нестандартного оборудования, а также для анализа причин в случае появления отклонений качества склеиваемой фанеры от нормативных требований.

Ключевые слова: тепловые и деформационные параметры, слоистые композиционные древесные материалы, фанера, клей, прочность, долговечность.

A. A. Bartashevich, L. V. Ignatovich, S. S. Utgof
Belarusian State Technological University

RESEARCH OF FEATURES OF STRUCTURAL CHANGES OF COMPACTED ALDER WOOD FOR MANUFACTURE OF JOINT-AND-CONSTRUCTION PRODUCTS AND CONSTRUCTION ELEMENTS OF FURNITURE

This paper presents calculations of the thermal and deformation parameters of the bonding modes of laminated composite wood materials. Formulas are presented for determining the temperature in the zone of the adhesive layer of laminated glued materials, as well as the deformation parameters of the plywood bonding process associated with the dependences of the pressing pressure on various factors. The thermal and deformation parameters of the bonding modes are taken into account when compiling the technological regimes for the manufacture of plywood, plywood boards or other products, in particular, a new complex shape that can be determined experimentally or by calculation.

It is known that the temperature-strain dependence of the bonding parameters has a great influence on the quality of glued laminated materials. The theoretical method for calculating the thermal and deformation parameters of the bonding regimes of laminated composite wood materials, given in the article, should be used for research purposes, in the development of new, non-standard equipment, as well as for analyzing the reasons in case of deviations in the quality of glued plywood from regulatory requirements.

Key words: thermal and deformation parameters, laminated composite wood materials, plywood, glue, strength, durability.

Введение. Древеснослоистый композиционный материал (фанера, гнукотклееные детали, слоистые пластики и др.) – многослойный материал, который может изготавливаться путем склеивания листов специально подготовленного лущеного и строганого шпона. Для повышения прочности данного материала слои шпона накладываются так, чтобы волокна древесины каждого листа были перпендикулярны соседним, поэтому, что бы направления внешних слоев совпадали, количество слоев шпона обычно нечетное: три и более [1–4].

В основном листы фанеры имеют нечетное количество слоев шпона: в этом случае шпон расположен симметрично относительно среднего слоя. Если слоев шпона в фанере четыре, то центральные слои располагают и склеивают перпендикулярно наружным, что увеличивает общую прочность и стойкость к деформации [1–4].

Современные древеснослоистые композиционные материалы – это композиции, изделия из которых имеют определенное сочетание эксплуатационных свойств. Например, фанера – это система разнородных материалов, каждый имеет

свое конкретное назначение в готовом изделии. Ни шпон, ни клей не могут выполнять свою функцию независимо, а в фанере они используются совместно и должны рассматриваться как единая композиция. Следовательно, клееный композиционный материал – это материал, свойства которого и количественно, и качественно отличаются от свойств каждого из его составляющих [3, 4].

Процесс изготовления слоистых материалов из древесины (фанеры, гнуклееных деталей, слоистых пластиков и др.) включает несколько операций, важнейшей из которых является операция склеивания пакетов в горячем прессе.

На качество клеевого соединения (прочность, водостойкость, долговечность) оказывают влияние многие факторы – вид клея, его состав, вязкость, удельный расход, температура плит пресса, продолжительность и давление прессования [5–7].

Для получения клееных композиций из древесины широко применяется карбамидоформальдегидный клей. В настоящее время карбамидоформальдегидные смолы являются наиболее востребованными в производстве слоистых композиционных древесных материалов и изделий из древесины, они обеспечивают высокую прочность и качество склеивания, а также время их отверждения можно регулировать в значительных пределах.

Клеевые композиции на основе карбамидоформальдегидных смол отверждаются в процессе горячего склеивания только под воздействием отвердителя, который создает в клею кислую среду, способствующую протеканию последнего этапа поликонденсации. С повышением температуры процесс структурообразования происходит более полно, что должно вести к увеличению прочностных показателей клеевого соединения.

Основная часть. *Расчет параметров тепловых режимов процесса склеивания фанеры.* Существенное влияние на характер образования адгезионно-когезионных связей оказывают режимы склеивания, особенно температура. Нагрев ускоряет процесс отверждения клея и приводит к образованию полимеров с другими свойствами в сравнении с отверждением в нормальных условиях [8].

При соответствующем режиме нагрева прочность и водостойкость клеевой прослойки повышается за счет более полного структурирования полимера. В начальный период нагрева уменьшается вязкость клея, что обеспечивает лучшую его растекаемость и смачиваемость поверхности. Это ведет к увеличению количества активных центров поверхности материала, активных групп клея и их временному геометрическому

совпадению. Площадь контакта клея с материалом увеличивается из-за лучшего заполнения клеем неровностей на поверхности склеиваемого материала.

Для горячего склеивания фанеры важен выбор нагревательного оборудования и режимов нагрева, обеспечивающих высокую производительность и прочность склеивания. Выбор типа нагревательного оборудования и параметров режимов склеивания может быть обоснован расчетным методом.

При склеивании с кондуктивным нагревом тепло передается клеевой прослойке через слой древесного материала от внешнего теплоносителя. Определяющим фактором при установлении режимов склеивания являются размеры и теплотехнические характеристики древесно-слоистого материала, например из лущеного шпона [9, 10].

Тепло передается кондуктивно благодаря теплопроводности материала. Необходимое общее время нагрева складывается из времени нагрева материала до наиболее удаленного клеевого слоя и времени, необходимого для отверждения клея. Отверждение клея начинается уже в период прогрева материала, т. е. еще до достижения требуемой температуры.

Теплотехнические свойства натуральной древесины и процесс теплопереноса от времени проведения опытов не зависят.

Расчетный метод определения режимов склеивания основан на экспериментальном определении достигаемой полноты отверждения клея и прочности соединений при различной температуре клеевой прослойки [11, 12].

Расчет параметров тепловых режимов процесса склеивания фанеры рассматривается, когда наружные листы шпона склеиваются с внутренним (трехслойная фанера из шпона толщиной 1,5 мм).

Система состоит из трех неограниченных пластин в граничных условиях четвертого рода. Для упрощения расчетных формул принят ряд допущений:

- термические свойства склеиваемых материалов являются постоянными и соответствуют средней температуре нагрева шпона;
- тепло от нагревателя (плит пресса) передается кондуктивно только за счет теплопроводности;
- начальная температура панели одинакова по всему объему, а температура нагревателя одинакова по всей площади контакта;
- поверхность шпона в начальный период нагрева принимает температуру нагревателя.

Рассматриваем случай, когда температура нагревателя постоянная. Температура в зоне клеевой прослойки может быть выражена формулой (1):

$$t = t_0 + \frac{2K}{1+K} (t_{np} - t_0) \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{1-K}{1+K} \right)^{n-1} \operatorname{erfc} \frac{2n-1}{2\sqrt{Fo_1}}, \quad (1)$$

где t – текущая температура рассматриваемой плоскости, °C; t_0 – температура окружающей среды, °C; t_{np} – температура на поверхности нагревателей, °C; K – критерий, характеризующий тепловую активность первого верхнего слоя листа шпона слоистого материала по отношению ко второму среднему слою:

$$K = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \sqrt{\frac{a_2}{a_1}}, \quad (2)$$

где λ_1 и λ_2 – коэффициенты теплопроводности соответственно для среднего слоя древеснослоистого материала, Вт/м·град; a_1 и a_2 – коэффициенты температуропроводности для среднего слоя, м²/с; erfc – обозначение функции ошибок Гаусса с аргументом

$$\frac{2n-1}{2\sqrt{Fo_1}}, \quad (3)$$

Fo_1 – обозначение критерия Фурье для слоистого композиционного древесного материала толщиной R :

$$Fo_1 = \frac{a_1 \tau}{R^2}, \quad (4)$$

где τ – время, с; R – расстояние от поверхности шпона до клеевой прослойки.

Для слоистого композиционного древесного материала – фанеры – критерий K близок к 1. Тогда формула значительно упрощается. Рассматриваемую систему тел можно заменить одним полуограниченным телом, соприкасающимся с нагревателем, температура которого постоянна. Формула для определения температуры в клеевой прослойке запишется так:

$$t = t_0 + (t_{np} - t_0) \operatorname{erfc} \frac{1}{2\sqrt{Fo_1}}. \quad (5)$$

Анализ расчетных и экспериментальных значений температур показал удовлетворительное согласование их между собой в течение всего цикла нагрева [8, 10].

Деформационные параметры склеивания слоистых материалов. Деформационные параметры процесса склеивания фанеры связаны с зависимостью давления прессования от различных факторов. Они должны учитываться при составлении технологических режимов изготовления фанеры, фанерных плит или другой древеснослоистой продукции. Их можно определять экспериментально или расчетным методом.

В процессе прессования необходимо обеспечить плотное прилегание поверхностей листов склеиваемого пакета и получение клеевой прослойки требуемой толщины.

При ровных поверхностях склеиваемых листов шпона и с наименьшим допустимым ГОСТ параметром шероховатости достигнуть двухстороннего контакта жидкой клеевой прослойки со склеиваемыми листами лущеного шпона трудно, даже при сравнительно низком давлении, например 0,5 МПа. Если склеиваемые поверхности имеют большие неровности и шероховатость, давление потребует большой величины, и оно будет зависеть от размеров и жесткости, а также от величины неровностей поверхности склеиваемых материалов.

Шероховатость поверхности лущеного шпона, из которого изготавливается фанера, допускается до $Rm_{max} = 320$ мкм. При формировании пакета листы шпона укладываются взаимно перпендикулярно. При этом в местах контакта выступающих элементов волокон на поверхности образуются выступы, а по соседству с ними – впадины.

В процессе склеивания давление по площади пакетов распределяется неравномерно из-за неровностей. При прессовании давление на первом этапе будет восприниматься выступами неровностей [13, 14].

Постепенно, при увеличении давления, выступы будут сминаться, и деформацию выступов при смятии достаточно произвести в пределах закона Гука, при этом деформация связана с напряжением зависимостью

$$\xi = \frac{\sigma}{E}, \quad (6)$$

где ξ – деформация (относительное уменьшение высоты); σ – напряжение (предел прочности при смятии поперек волокон); E – модуль упругости при смятии поперек волокон.

Максимальная величина неровностей теоретически может достигнуть величины $2Rm_{max}$ (двойной величины неровностей).

Полностью устранить неровности прессованием невозможно, они только уменьшаются за счет ликвидации пористости и некоторой поперечной деформации. Пустоты неустраненных неровностей заполняет клей, который до начала желатинизации имеет высокую текучесть.

Для устранения неровностей потребуется усилие пресса, величина которого может быть определена формулой

$$P = F \sigma_{cm}, \quad (7)$$

где F – площадь склеивания; σ_{cm} – предел прочности при смятии поперек волокон древесины.

Предел прочности при смятии вдоль волокон при температуре 20°C равен: для березы – 58 МПа, для ольхи – 45 МПа. При смятии поперек волокон показатель прочности в 20 раз меньше, чем при смятии вдоль волокон.

При температуре 100°C предел прочности необходимо корректировать по формуле

$$t = t_0 - K(t - 20), \quad (8)$$

где K – поправочный коэффициент на температуру [7].

С учетом поправочного коэффициента предел прочности при смятии поперек волокон равен: для березы – 2,3 МПа, для ольхи – 1,4 МПа.

Усилие пресса для устранения неровностей поверхностей шпона при склеивании фанеры размером 1600×1600 мм (до обрезки) составит:

– для березового шпона

$$P_{Rm} = F\sigma_{cm} = 1600 \cdot 1600 \cdot 2,3 = 5\,888\,000, \\ H = 588,8 \text{ т};$$

– для ольхового шпона

$$P_{Rm} = F\sigma_{cm} = 1600 \cdot 1600 \cdot 1,4 = 3\,584\,000, \\ H = 358,4 \text{ т}.$$

Для создания контакта склеиваемых поверхностей понадобится дополнительное усилие пресса. Его следует принимать минимальным ($P_{мин}$), соответствующим давлению величиной до 0,1 МПа. При этом усилие пресса понадобится величиной

$$P_{мин} = 0,1F = 1600 \cdot 1600 \cdot 0,1 = 256\,000, \\ H = 25,6 \text{ т}.$$

На величину давления кроме размеров и свойств древесины (плотности, шероховатости поверхности шпона) оказывает значительное влияние вязкость клея. При большой вязкости для получения клеевой прослойки требуемой толщины необходимо значительное давление. Зависимость между вязкостью и давлением при склеивании с интенсивным нагревом может выражаться следующим уравнением [7]:

$$P = \frac{\mu_k b^2 \cdot 10^3}{2 \cdot 981 \cdot t y_n^2} \approx \frac{\mu_k \cdot b^2}{2 t y_n^2}, \quad (9)$$

где P – удельное давление, кгс (1 кгс = 0,1 МПа); μ_k – вязкость клея в период максимального разжижения, сП; b^2 – ширина склеиваемых пластин, см; y_n^2 – требуемая толщина клеевой прослойки, мкм; t – время вязко-текучего состояния, с.

Усилие пресса для формирования клеевой прослойки составит

$$P_{кл} = PF, \quad (10)$$

где $P_{кл}$ примерно составляет $0,2P_{Rm}$ (т. е. 0,2 усилия прессования для устранения неровностей поверхности шпона).

Общее усилие пресса при склеивании фанеры из березового шпона составит

$$P_{общ} = P_{Rm} + P_{мин} + P_{кл} = 588,8 + 25,6 + \\ + (0,2 \cdot 588,8) = 732,16 \text{ т}.$$

Такое усилие прессования создает давление при склеивании 2,86 МПа.

Общее усилие пресса при склеивании фанеры из ольхового шпона составит

$$P_{общ} = P_{Rm} + P_{мин} + P_{кл} = 358,4 + 25,6 + \\ + (0,2 \cdot 358,4) = 455,68 \text{ т}.$$

Такое усилие прессования создает давление при склеивании 1,78 МПа.

Заключение. На основании данных исследований можно заключить следующее.

1. Анализ расчетных и экспериментальных значений температур показал удовлетворительное согласование данных параметров между собой. Для практики достаточен экспериментальный метод как более легкий для расчета тепловых параметров режимов склеивания слоистых композиционных древесных материалов.

2. Определение влияния величины давления на деформационные параметры режимов склеивания слоистых древесных материалов в зависимости от состояния склеиваемых пластин, величины неровностей, особенностей строения древесины, из которой изготовлен шпон (составляющей P_{Rm}), весьма затруднительно, так как эти факторы не постоянны.

Список литературы

1. Фанера общего назначения с наружными слоями из шпона лиственных пород: ГОСТ 3916.1–96. Введ. 01.01.98. М.: Изд-во стандартов, 1999. 26 с.
2. Фанера общего назначения с наружными слоями из шпона хвойных пород: ГОСТ 3916.2–96. Введ. 01.01.98. М.: Изд-во стандартов, 1999. 27 с.
3. Ярцев В. П., Киселева О. А., Сузюмов А. В. Прогнозирование прочности и долговечности строительной фанеры [Электронный ресурс] // ООО «Рикконэ»: сайт. URL: <http://www.best-fanera.ru/info/prognoz-prochnosti-fanery.html> (дата обращения: 22.01.2020).
4. Древесные композиционные материалы [Электронный ресурс] // Знайтовар.Ру – торговля, бизнес, товароведение, экспертиза: сайт. URL: <https://znaytovar.ru/new2778.html> (дата обращения: 22.01.2020).
5. Хрулев В. М. Долговечность клееной древесины. М.: Лесная пром-сть, 1971. 160 с.

6. Иванов Ю. М., Лепарский Л. О., Сенчило Ю. Я. Прочность и напряжения клеевых соединений древесины. М.: Лесная пром-сть, 1973. 160 с.
7. Боровиков А. М., Уголев Б. Н. Справочник по древесине. М.: Лесная пром-сть, 1989. 294 с.
8. Рындин В. О. Исследование старения древесных композитов под воздействием различных эксплуатационных факторов // Сборник авторефератов магистров ТГТУ. 2006. № 7. С. 21–34.
9. Веретиков И. И. Влияние температурно-влажностных воздействий на прочностные показатели клеевых соединений // Труды БГТУ. 2015. № 2: Лесная и деревообраб. пром-сть. С. 170–173.
10. Кириллов А. Н. Конструкционная фанера. М.: Лесная пром-сть, 1981. 112 с.
11. Древесина слоистая клееная. Метод определения предела прочности при скалывании: ГОСТ 9624–93. Введ. 01.01.95. М.: Изд-во стандартов, 1994. 10 с.
12. Ефимов В. А., Петрова А. П., Аниховская Л. И. Ускоренные испытания клеевых соединений // Клеи. Герметики. Технологии. 2005. № 7. С. 1–12.
13. Кашубский Н. В., Сельский А. А., Смолин А. Ю. Неразрушающие методы контроля материалов и изделий. Красноярск: ИПК СФУ, 2009. 108 с.
14. Савицкий С. С. Методы и средства неразрушающего контроля. Минск: БНТУ, 2012. 183 с.

References

1. GOST 3916.1-96.1. General purpose plywood with outer layers of hardwood veneer. Moscow, Standartinform Publ., 1999. 26 p. (In Russian)
2. GOST 3916.2-96.1. General purpose plywood with external layers of softwood veneer. Moscow, Standartinform Publ., 1999. 27 p. (In Russian)
3. Yartsev V. P., Kiselyova O. A., Suzyumov A. V. *Prognozirovaniye prochnosti i dolgovechnosti stroitel'noy fanery* [Predicting the strength and durability of construction plywood]. Available at: <http://www.best-fanera.ru/info/prognoz-prochnosti-fanery.htm> (accessed 22.01.2020).
4. *Drevesnyye kompozitsionnye materialy* [Wood composite materials]. Available at: <https://znayto-var.ru/new2778.html> (accessed 22.01.2020).
5. Khrulev V. M. *Dolgovechnost' kleenoy drevesiny* [The durability of laminated wood]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1971. 160 p.
6. Ivanov Yu. M., Leparskiy L. O., Senchilo Yu. Ya. *Prochnost' i napryazheniya kleevykh soyedineniy drevesiny* [Strength and stresses of glued wood joints]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1973. 160 p.
7. Borovikov, A. M., Ugolev B. N. *Spravochnik po drevesine* [Wood reference]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1989. 294 p.
8. Ryndin V. O. Study of the aging of wood composites under the influence of various operational factors. *Sbornik avtoreferatov magistrrov TGTU* [Collection of Master's Abstracts of TGTU], 2006, no. 7, pp. 21–34 (In Russian).
9. Veretnikov I. I., Effects of temperature and moisture actions on strength factors of adhesive joints. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2015, no. 2: Forest and Woodworking Industry, pp. 170–173 (In Russian).
10. Kirillov A. N. *Konstruksionnaya fanera* [Construction plywood]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1981. 112 p.
11. GOST 9624-93. Wood laminated glued. Method for determining the breaking strength. Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ., 1994. 10 p. (In Russian).
12. Yefimov V. A., Petrova A. P., Anikhovskaya L. I. Accelerated tests of adhesive joints. *Klei. Germetiki. Tekhnologii* [Glues. Sealants. Technologies], 2005, no. 7, pp. 1–12 (In Russian).
13. Kashubskiy N. V., Sel'skiy A. A., Smolin A. Yu. *Nerazrusayushchiye metody kontrolya materialov i izdeliy* [Non-destructive methods of control of materials and products]. Krasnoyarsk, IPK SFU Publ., 2009, 108 p.
14. Savitskiy S. S. *Metody i sredstva nerazrusayushchego kontrolya* [Methods and means of non-destructive testing]. Minsk, BNTU Publ., 2012. 183 p.

Информация об авторах

Барташевич Александр Александрович – кандидат технических наук, почетный доктор, профессор, профессор кафедры технологии и дизайна изделий из древесины. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: BAArch_AABS@mail.ru.

Игнатович Людмила Владимировна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологии и дизайна изделий из древесины. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: ignatovich@belstu.by, lignatovich6@gmail.com.

Утгоф Светлана Сергеевна – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры технологии и дизайна изделий из древесины. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: utgof@belstu.by

Information about the authors

Bartashevich Aleksander Aleksandrovich – PhD (Engineering), Honoris Causa, Professor, Professor of the Department of Technology and Design of Wooden Articles. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str, 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: BAArch_AABS@mail.ru

Ignatovich Ludmila Vladimirovna – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Technology and Design of Wooden Articles. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: ignatovich@belstu.by, lignatovich6@gmail.com

Utgof Svetlana Sergeevna – PhD (Engineering), Senior Lecturer, the Department of Technology and Design of Wooden Articles. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: utgof@belstu.by

Поступила 09.03.2020