ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

№ 1 ЛЕСНОЙ ЖУРНАЛ 1995

МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ И ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ

УДК 674.093.26

А. К. ЛЕОНТЬЕВ, А. Н. ЧУБИНСКИЙ

Леонтьев Анатолий Константинович родился в 1929 г., окончил в 1953 г. Ленинградский политехнический институт, доктор технических наук, профессор кафедры теплотехники С.-Петербургской лесотехнической академии. Имеет 93 научных труда в области теплофизики.

Чубинский Анатолий Николаевич родился в 1948 г., окончил в 1972 г. Ленинградскую лесотехническую академию, кандидат технических наук, доцент кафедры механической технологии древесины и древесных материалов С.-Петербургской лесотехнической академии. Имеет 47 научных трудов в области технологии склеивания древесины.

РАСЧЕТ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ МНОГОСЛОЙНОЙ ДЕРЕВЯННОЙ ПЛАСТИНЫ ПРИ ПЬЕЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ

Разработана методика расчета теплового состояния деревянной пластины при пьезотермической обработке, позволяющая определить температурные поля и продолжительность нагрева клееных материалов из шпона в процессе склеивания.

The calculation methods of wood plate heat condition at piezothermal treatment which allow to determine temperature fields and heating duration of veneer glued materials in the course of gluing have been developed.

Проблема расчета теплового состояния слоеной древесины возникла одновременно с разработкой технологии горячего прессования фанеры и других композитных материалов. Знание температурных полей в поперечном сечении склеиваемого пакета шпона из древесины различных пород необходимо, в частности, для определения длительности процесса пьезотермической обработки.

Разработанные ранее методики расчета теплового состояния склеиваемого материала [1, 3] имеют ряд недостатков. Наиболее существенным из них является тот, когда авторы не учитывают изменение толщины слоя в процессе прессования.

Предлагаемый нами инженерный метод расчета температурных полей в пакете шпона (пластине) при пьезотермической обработке основан на решении классического уравнения теплопроводности для плоского однородного симметрично нагреваемого с обеих сторон слоя материала, толщина которого намного меньше длины и ширины.

Как известно [3], решение уравнения нестационарной теплопроводности для материала пластины с постоянными теплофизическими свойствами при граничном условии первого рода (постоянные температура поверхностей и начальная температура) имеет вид

$$\Theta = \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{(2n-1)} \cos\left(\frac{2n-1}{2}\pi\eta\right) \exp\left[-\left(\frac{2n-1}{2}\right)^2 \pi^2\tau\right], \tag{1}$$

где Θ — безразмерная температура,

$\Theta = \dfrac{T_w - T(\eta, \tau)}{T_w - T_0}$;

T_w — размерная температура поверхностей пластины;

$T(\eta, \tau)$ — текущая температура в точке на расстоянии x от центра пластины;

T_0 — размерная начальная температура пластины;

$\eta = x/\delta$;

x — размерная координата;

δ — половина толщины пластины в момент времени τ;

τ — безразмерное время, $\tau = at/\delta^2$;

a — коэффициент температуропроводности пластины;

t — размерное время.

В предлагаемой методике использованы две характерные температуры: в центре пакета шпона и среднеинтегральная по всему сечению. Безразмерная температура в центре пакета шпона может быть определена следующим образом [4]:

$$\Theta_\delta = \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{(2n-1)} \exp\left[-\left(\frac{2n-1}{2}\right)^2 \pi^2\tau\right], \tag{2}$$

где $\Theta_\delta = \dfrac{T_w - T_\delta(\tau)}{T_w - T_0}$;

T_δ — размерная температура в центре пакета шпона.

Для среднеинтегральной справедлива формула [4]:

$$\overline{\Theta} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} \exp\left[-\left(\frac{2n-1}{2}\right)^2 \pi^2\tau\right]. \tag{3}$$

Здесь $\overline{\Theta} = \dfrac{T_w - \overline{T}(\tau)}{T_w - T_0}$;

$\overline{T}$ — размерная среднеинтегральная температура пакета шпона.

При $\tau \geqslant 0{,}3$ (погрешность не более 1 %) вместо формул (2) и (3) можно использовать следующие выражения:

$$\Theta_\delta \cong 1{,}27\, e^{-2{,}46\tau}; \tag{4}$$

$$\overline{\Theta} \cong 0{,}81\, e^{-2{,}46\tau}. \tag{5}$$

Отсюда следует

$$\overline{\Theta} = 0{,}637\Theta_\delta. \tag{6}$$

Зависимость между размерными температурами (при $\tau \geqslant 0{,}3$) имеет вид [4]

$$\overline{T} = 0{,}363 T_w + 0{,}637 T_\delta. \tag{7}$$

Значения $\overline{\Theta}$ и Θ_δ при различных значениях τ представлены в таблице.

τ	Θ_δ	$\overline{\Theta}$	τ	Θ_δ	$\overline{\Theta}$
0	1,00	1,00	0,50	0,37	0,24
0,05	0,99	0,75	0,60	0,29	0,18
0,10	0,95	0,64	0,70	0,23	0,15
0,15	0,87	0,56	0,80	0,18	0,11
0,20	0,77	0,50	0,90	0,14	0,09
0,25	0,69	0,43	1,00	0,11	0,07
0,30	0,61	0,39	1,10	0,08	0,05
0,40	0,47	0,30	1,20	0,07	0,04

Количество теплоты Q, необходимое для нагрева 1 м^2 пакета шпона от начальной температуры T_0 до среднеинтегральной $\overline{T}$, можно определить по формуле

$$Q = s_0 \rho c (T_w - T_0)(1 - \overline{\Theta}), \tag{8}$$

где s_0 — начальная толщина пакета шпона, $s_0 = 2\delta_0$;
ρ — начальная плотность пакета шпона;
c — начальная теплоемкость пакета шпона.

Безразмерное время выдержки пакета шпона при горячем прессовании находится из формул (2) или (3) при заданной предельной температуре в центре пакета или среднеинтегральной. Если в качестве характерной выбрать температуру в центре пакета шпона T_δ и предположить, что процесс заканчивается при условии

$$\Theta_\delta \leqslant 0{,}05\,[T_\delta = T_w - 0{,}05\,(T_w - T_0)],$$

то расчет длительности времени прессования t_δ можно производить по формуле

$$t_\delta = 1{,}31 \frac{\delta_\infty^2}{a_\infty}, \tag{9}$$

где δ_∞ — половина толщины пакета шпона в конце процесса,

$$\delta_\infty = \delta_0 (1 - \varepsilon_\infty);$$

ε_∞ — полная деформация пакета шпона в конце процесса,

$$\varepsilon_\infty = f\,(P, T, s_0);$$

P — давление прессования;
a_∞ — коэффициент температуропроводности при среднеинтегральной температуре пакета шпона в конце процесса.

Основная трудность в реализации предлагаемой методики расчета теплового состояния пакета шпона состоит в определении его текущей полной деформации в зависимости от технологических факторов. Проведенные ранее исследования [5] позволили установить следующее.

1. Начальная полная деформация линейно зависит от давления и может быть рассчитана по формуле

$$\varepsilon_0 = 0{,}045 P.$$

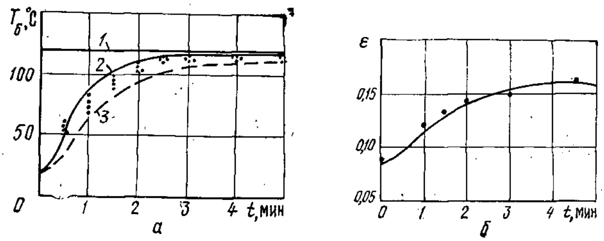
2. Приведенная максимальная полная деформация лиственничного пакета шпона толщиной 9 мм зависит в основном от давления и темпе-

ратуры плит пресса при влажности шпона, соответствующей требованиям стандарта, и может быть аппроксимирована выражением

$$\varepsilon_{\max} = 0{,}045P\left[1 + 0{,}8\left(\frac{T_w - 20}{100}\right)^3\right]; \qquad (10)$$

а текущая

$$\varepsilon = 0{,}045P\left[1 + 0{,}8\left(\frac{\overline{T} - 20}{100}\right)^3\right]. \qquad (11)$$



Опытные (обозначены точками) и расчетные зависимости температуры в центре пакета шпона (*а*) и его полной деформации ε (*б*) от времени прессования t ($P = 1{,}8$ МПа; $T_w = 120$ °C; $s_0 = 9$ мм): *1* — $T_w = 120$ °C; *2* — $T_б = f(t)$; *3* — $\overline{T} = f(t)$

На рисунке приведены опытные и расчетные данные, отражающие изменение во времени температуры в центре пакета лиственничного шпона (рисунок *а*) с начальной (базовой) толщиной $s_0 = 9$ мм и полной текущей деформации (рисунок *б*). Расчет температуры в центре пакета и среднеинтегральной проведен по формуле (2) и (3), деформации — (11).

3. Полная деформация пакета шпона зависит от среднеинтегральной температуры и начальной толщины пакета. Она может быть представлена в виде

$$\varepsilon = 0{,}045P\left[1 + 0{,}8\left(\frac{\overline{T} - 20}{100}\right)^3 + 1{,}5\left(\frac{s - s_0}{s_0}\right)\left(\frac{\overline{T} - 20}{100}\right)^{1/4}\right], \qquad (12)$$

где s — толщина пакета шпона;

s_0 — базовая толщина пакета шпона, $s_0 = 9$ мм.

Формулы (10) — (12) справедливы при следующих значениях технологических параметров: $1{,}0$ МПа $\leqslant P \leqslant 1{,}8$ МПа; 100 °C $\leqslant T_w \leqslant 140$ °C; 9 мм $\leqslant s \leqslant 45$ мм.

Соответствие опытных и расчетных данных позволяет представить следующую методику расчета времени установления теплового равновесия слоеной древесины при горячем прессовании в зависимости от технологических факторов.

1. По формулам для безразмерной температуры в центре пакета или среднеинтегральной задают условие установления теплового равновесного состояния пакета шпона в процессе горячего прессования:

$$\Theta_б = a_б \text{ или } \overline{\Theta} = \overline{a}.$$

Здесь $a_б$, $\overline{a}$ — соответственно относительная погрешность установления равновесия в центре и по сечению.

Если принять в качестве критерия $a_б$ с недостачей 5 % ($a_б = 0{,}05$), то безразмерная равновесная температура в центре пакета шпона

$$\Theta_б = 0{,}05$$

или в размерных величинах

$$T_\delta = 0{,}95T_w + 0{,}05T_0. \qquad (13)$$

2. Рассчитывают предельную полную деформацию пакета шпона в условиях теплового равновесия при $\overline{T} = T_w$ по формуле (12).

3. Определяют половину толщины пакета шпона с учетом полной деформации:

$$\delta_\infty = \delta_0(1 - \varepsilon_\infty). \qquad (14)$$

4. Рассчитывают безразмерное время установления теплового равновесия по формулам (4) или (5). Подставляя вместо Θ_δ и $\overline{\Theta}$ предельные (равновесные) значения, получают

$$\tau_\delta = 0{,}409 \ln\left(\frac{1{,}27}{a_\delta}\right) = 0{,}098 + 0{,}94 \lg\left(\frac{1}{a_\delta}\right); \qquad (15)$$

$$\overline{\tau} = 0{,}409 \ln\left(\frac{0{,}81}{\overline{a}}\right) = -0{,}096 + 0{,}94 \lg\left(\frac{1}{\overline{a}}\right). \qquad (16)$$

5. Размерное время установления теплового равновесия определяют как

$$t_\delta = \frac{\delta_\infty^2}{a}\tau_\delta; \qquad (17)$$

$$\overline{t} = \frac{\delta_\infty^2}{a}\overline{\tau}. \qquad (18)$$

Здесь a — коэффициент температуропроводности (для древесины лиственницы $a = 1{,}6 \cdot 10^{-7}$ м²/с [2]).

Пример. Рассчитать время установления теплового равновесия при горячем прессовании лиственничного пакета шпона начальной толщины 32,4 мм при $P = 1{,}6$ МПа и $T_w = 115$ °С. Расчет провести по температуре в центре пакета.

По формуле (12) определяем $\varepsilon_\infty = 0{,}4$. Зная ε_∞, находим из выражения (14) $\delta_\infty = 9{,}72$ мм. Если принять $a_\delta = 0{,}05$, то, исходя из формулы (15), безразмерное время $\tau_\delta = 1{,}22$, а размерное (17) — $t_\delta = 720{,}4$ с или 12 мин. Размерное время установления теплового равновесия, рассчитанное из среднеинтегральной температуры по формулам (16) и (18), составляет 666 с или 11,1 мин.

Предложенная нами методика расчета установления теплового равновесия может быть использована для определения продолжительности прессования клееных слоистых материалов из шпона. Естественно, что время склеивания в большей степени зависит от кинетики отверждения связующего. Однако время установления теплового равновесия не должно быть меньше продолжительности отверждения клея при соответствующей температуре.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1]. Бавельский М. Д., Генкин Л. И. Расчет режимов прессования плоских древесных материалов // Деревообрабатывающая пром-сть.— 1970.— № 10.— С. 15—17. [2]. Кротов Л. Н., Ловецкий В. И. Влияние температуры на теплофизические свойства древесины лиственницы // Технология деревообработки: Сб. науч. тр. СибТИ.— 1973.— С. 114—120. [3]. Севастьянов К. Ф. Интенсификация процесса склеивания фанеры.— М.: Лесн. пром-сть, 1976.— 144 с. [4]. Теплотехнический справочник.— М.; Л.: Госэнергоиздат, 1957.— 728 с. [5]. Чубинский А. Н. Формирование клеевых соединений древесины.— СПб: Изд-во СПб ГУ, 1992.— 164 с.

Поступила 29 ноября 1994 г.