

А. А. Барташевич, В. Я. Руденко

НАГРЕВ ЩИТОВ ПРИ ФАНЕРОВАНИИ И ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ВЫДЕРЖКИ

При горячем фанеровании щиты нагреваются и затем выдерживаются до полного охлаждения перед механической обработкой. Несоблюдение последнего условия снижает качество щитовых деталей.

Согласно существующему режиму, щиты после фанерования должны выдерживаться в стопе в течение 24 ч. Однако такая рекомендация слишком общая и не учитывает степени нагрева щитов, т. е. режима фанерования, их размеров и свойств материалов, поэтому не всегда соответствует производственным условиям. Так, при фанеровании в многопролетных прессах щиты нагреваются в значительной мере, и в случае их больших размеров охлаждение стопы длится несколько суток. В связи с этим в литературе нередко рекомендуется выдерживать щиты после фанерования не одни сутки, а несколько (до пяти). Обоснованных рекомендаций относительно продолжительности технологической выдержки щитов после фанерования их в однопролетных прессах вообще не имеется. Более того, существует мнение, что в случае непродолжительного прессования щитов, выдержка практически не требуется. Однако при этом не учитывается, что сокращение времени прессования достигается за счет повышения температуры плит пресса, т. е. значительный нагрев щитов и в данном случае будет иметь место.

Наша работа посвящена теоретическим и экспериментальным исследованиям определения степени нагрева щитов и продолжительности выдержки их после фанерования в зависимости от различных факторов.

Экспериментальные исследования проводились на Молодечненском производственном мебельном объединении применительно к щитам из трехслойных древесностружечных плит плотностью 0,7 и 0,65 г/см³ и влажностью 7% при фанеровании их строганым шпоном дуба толщиной 0,8 мм. Температура плит пресса принималась 120°C, давление прессования — 7 кг/см². Расчетные значения температур определялись для этих же условий. Тепловые свойства материалов, необходимые для определения расчетных значений скорости нагрева и охлаждения щитов, были приняты по литературным данным [1, 2].

Температуру в клеевом слое во время фанерования Б. С. Чушинов [3] рекомендует определять так же, как в случае одностороннего нагрева, т. е. для полуограниченного тела, так как толщина плиты во много раз больше облицовочного слоя. Коэффициент температуропроводности при этом берется средний — по коэффициентам материала основы и облицовочного слоя.

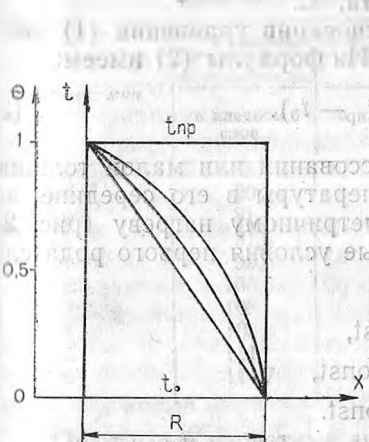


Рис. 1. Кривые распределения температуры в неограниченной пластине при несимметричном нагреве.

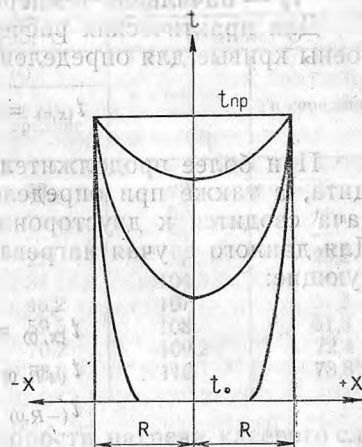


Рис. 2. Кривые распределения температуры в неограниченной пластине при симметричном нагреве.

Для такого случая контактного нагрева (одномерная несимметричная задача) имеем следующие граничные условия первого рода (рис. 1):

$$t_{(0,\tau)} = t_{np} = \text{const},$$

$$t_{(R,\tau)} = t_0 = \text{const}.$$

Формула для определения относительной избыточной температуры следующая [4]:

$$\theta = \text{erf} \frac{x}{2\sqrt{a\tau}} = \text{erf} \frac{1}{2\sqrt{FO}}; \quad (1)$$

$$\theta = \frac{t_{np} - t(x,\tau)}{t_{np} - t_0}, \quad (2)$$

где FO — число Фурье,

erf — обозначение функций ошибок Гаусса,

$$\text{erf} N = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^N e^{-N^2} dN,$$

x — расстояние от поверхности до рассматриваемой точки нагрева, м;
 a — коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{с}$;
 τ — время, с;
 $t_{\text{пр}}$ — температура плит пресса, $^{\circ}\text{C}$;
 $t_{(x,\tau)}$ — температура в рассматриваемой точке при $\tau=0$, $^{\circ}\text{C}$;
 t_0 — начальная температура щита, $^{\circ}\text{C}$.

Для практических расчетов на основании уравнения (1) построены кривые для определения θ [4]. Из формулы (2) имеем:

$$t_{(x,\tau)} = t_{\text{пр}} - \theta(t_{\text{пр}} - t_0). \quad (3)$$

При более продолжительном прессовании или малой толщине щита, а также при определении температуры в его середине задача сводится к двустороннему симметричному нагреву (рис. 2). Для данного случая нагрева граничные условия первого рода следующие:

$$\begin{aligned} t_{(x,0)} &= t_0 = \text{const}, \\ t_{(+R,0)} &= t_{\text{пр}} = \text{const}, \\ t_{(-R,0)} &= t_{\text{пр}} = \text{const}. \end{aligned}$$

Решение уравнения Фурье для данного случая имеет вид:

$$\theta = \frac{t_{\text{пр}} - t_{(x,\tau)}}{t_{\text{пр}} - t_0} = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos \mu_n \frac{x}{R} \exp(-\mu_n^2 FO), \quad (4)$$

где $A_n = \frac{2}{\mu_n} (-1)^{n+1}$ — начальная тепловая амплитуда.

Для практических расчетов построены кривые для определения θ в зависимости от FO и $\frac{x}{R}$ [4].

В табл. 1 приведены расчетные и опытные значения изменений температуры в клеевом слое и в середине щита во время прессования при плотности плиты $0,65 \text{ г/см}^3$.

Температура замерялась с помощью медь-константановых термомпар. Тепловые коэффициенты принимались для расчетных значений температур, равных

$$t_{\text{расч}} = \frac{t_0 + t_{\text{кл.сл}}}{2}.$$

При расчете значений температур по формулам были сделаны следующие допущения:

1) процесс прогрева происходит без выделения и отдачи тепла

- 2) плотность материала во время прессования не изменяется;
 3) при расчете температуры в середине щита последний по сечению принят однородным (с тепловыми свойствами древесностружечной плиты).*

Таблица 1

Скорость нагрева при фанеровании ($t_{пр} = 120^\circ\text{C}$)

Время, мин	Расчетные значения температуры, °C			Опытные, °C	
	по формуле (3) в клеевом слое	по формуле (4)		в клеевом слое	в середине
		в клеевом слое	в середине		
0	20	20	20	20	20
0,25	81	80	—	65	—
0,5	91,5	91	—	84	—
1	99,5	98,4	22	97,2	25,2
2	105,5	105,5	34	104,3	41,5
3	108	108,4	46,2	107	51,2
4	109,8	110,2	59,5	108	61,3
5	111	112	70,2	109,2	72,4
6	111,7	112,9	78,6	110	78,8

Опытные и расчетные значения скорости нагрева клеюого слоя и середины щита в основном хорошо согласуются. Несколько меньшая фактическая скорость нагрева клеюого слоя по сравнению с расчетной объясняется снижением температуры плит пресса при нагрузке пакетов и наличием прокладок, что при расчете не учитывалось. Фактическое нарастание температуры на поверхности дюралюминиевой прокладки толщиной 2,5 мм, контактирующей с поверхностью щита для значения $t_{пр} = 120^\circ\text{C}$ следующее: отрезку времени в 5 сек, 10, 15, 20, 30, 45, 50, 55 сек соответствует температура в 83°C , 100, 107, 110, 114, 119, 120, 120°C .

Скорость нагрева середины пакета, согласно опытным данным, вначале выше, чем расчетная по формуле (4). Связано это с тем, что пакет по толщине (при $x > \delta$) нагревается не только за счет теплопроводности, но и за счет массопереноса (парогазовой смеси).

Вместе с клеем на поверхность древесностружечной плиты вносится некоторое количество воды. При достижении в клеюом слое температуры 100°C происходит интенсивное образование паров воды и газа. Парогазовая смесь распределяется параллельно и пер-

* Если щит принять однородным и при расчете температуры в клеюом слое, то максимальная разность ее значений не превышает 3%, хотя коэффициент α для дуба выше, чем для плиты, но $R \gg \delta$, где δ — толщина облицовочного слоя. Учитывая такое небольшое расхождение температур, не будет большой погрешностью принимать пакет однородным во всех случаях, тем более, что фактическая скорость нарастания температуры в клеюом слое несколько отстает от расчетной.

пендикулярно к плоскости прессования. Последний поток ускоряет прогрев щита по толщине тем больше, чем выше его газопроницаемость (меньше плотность плиты, меньше ее начальная влажность, ширина древесных стружек и т. д.). В данном случае имеет место эффект несколько замедленного «парового удара».

С увеличением времени прессования расчетные и опытные значения температуры в середине щита практически выравниваются. Меньшая фактическая скорость нарастания температуры по сравнению с расчетной во второй период времени прессования связана, вероятнее всего, с потерей тепла на испарение, не учитываемой при расчете. В начале прессования эта потеря перекрывалась массопереносом, ускоряющим прогрев. Но так как количество вносимой с клеем воды относительно небольшое, эффект «парового удара» быстро затухает.

По окончании фанерования щиты укладываются в плотные стопы. В зависимости от соотношения размеров стопы последнюю можно рассматривать как пластину неограниченных размеров (одномерная симметричная задача) или как параллелепипед ограниченных размеров (трехмерная симметричная задача). В этих случаях имеются граничные условия третьего рода. Теплообмен между стопой и воздухом происходит по закону Ньютона, а дифференциальные уравнения Фурье, соответственно в 1 и 2-м случаях, имеют вид:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}, \quad (5)$$

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right). \quad (6)$$

Относительная избыточная температура θ в данных случаях есть функция числа FO относительной координаты $\frac{x}{R}$ и критерия

$$B_i = \frac{\alpha}{\lambda} R,$$

где $2R_1, 2R_2, 2R_3$ — стороны параллелепипеда (стопы), м;
 $2R$ — толщина пластины, м;
 α — коэффициент теплоотдачи, ккал/м²·ч·град;
 λ — коэффициент теплопроводности, ккал/м·ч·град.

Для определения θ в первом случае (неограниченная пластина) рекомендуется формула [4]:

$$\theta = \frac{t_0 - t(x, \tau)}{t_0 - t_c} = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos \nu_n \frac{x}{R} \exp(-\nu_n^2 FO), \quad (7)$$

$$\text{где } A = \frac{2 \sin \mu_n}{\mu_n + \sin \mu_n \cos \mu_n} = (-1)^{n+1} \frac{2B_i \sqrt{B_i^2 + \mu_n^2}}{\mu_n (B_i^2 + B_i + \mu_n^2)},$$

μ_n — корни характеристического уравнения;

t_0 — начальная температура нагретой пластины, °C;

t_c — температура среды (окружающего воздуха), °C.

Для практического решения данной задачи построены кривые

$$\theta = f\left(\frac{x}{R}, FO, B_i\right) \text{ для случаев } \frac{x}{R} = 0 \text{ и } \frac{x}{R} = 1 \text{ [4].}$$

Общее решение трехмерной задачи на охлаждение имеет сложный вид и для практических расчетов малоприсгодно, поэтому мы его не приводим. Решение данной задачи можно представить в виде произведения решений трех неограниченных пластин, пересечением которых образован параллелепипед [4]:

$$\frac{t(x, y, z, \tau) - t_c}{t_0 - t_c} = \frac{t(x, \tau) - t_c}{t_0 - t_c} \cdot \frac{t(y, \tau) - t_c}{t_0 - t_c} \cdot \frac{t(z, \tau) - t_c}{t_0 - t_c}, \quad (8)$$

$$\text{или } 1 - \theta_{x, y, z} = (1 - \theta_x) (1 - \theta_y) (1 - \theta_z),$$

откуда имеем:

$$\theta_{x, y, z} = 1 - (1 - \theta_x) (1 - \theta_y) (1 - \theta_z). \quad (9)$$

Значения $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ определяются по тем же кривым, что и для неограниченной пластины.

Нами были проведены опыты по определению скорости охлаждения свободных и уложенных в плотные стопы щитов после их фанерования. Размеры щитов и стопы показаны на рис. 3. Охлаждение производилось в условиях естественной конвекции. Свободные щиты охлаждались в вертикальном положении. Расчетные и опытные данные приведены в табл. 3 и 4.

Анализ опытных данных. После окончания прессования в течение непродолжительного времени идет процесс выравнивания температуры по толщине щита, при этом температура наружных слоев значительно снижается, а внутреннего слоя — повышается. При укладке плит в плотную стопу повышение температуры в середине щита более заметно, чем у свободно охлаждаемого щита, так как в данном случае практически нет потерь тепла.

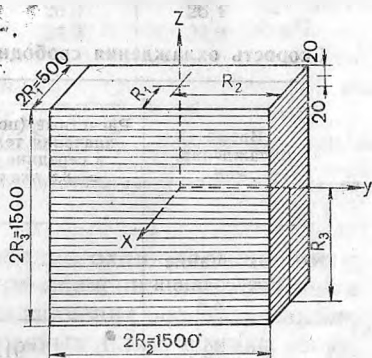


Рис. 3. Положение начала координат к трехмерной задаче (на охлаждение стопы).

Таблица 2

Скорость охлаждения свободного щита
при плотности плиты $0,65 \text{ г/см}^3$ ($t_c = -21^\circ\text{C}$)

Время охлаждения, мин	Расчетные по формуле (7) значения температуры, $^\circ\text{C}$		Опытные значения температуры, $^\circ\text{C}$	
	на поверхности	в середине	на поверхности	в середине
	при $\alpha = 7 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{ч}$			
0	—	—	120	65,2
5,25	—	—	77	77
0	77	77	77	77
3	61	74,4	60,8	74,5
6	56,3	68,6	56	68,7
10	50,7	61,9	50,3	62,2
15	45,5	54,6	45	54,8
20	40,9	48,5	40,3	48,9
30	36	38,9	35,3	39,4
45	28,3	31,1	27,4	31,5
60	24,9	26	24,3	26,5
75	23,2	24,2	22,6	24,5
90	22,2	22,9	21,8	23,2
120	21,6	21,6	21,4	21,9
150	—	—	—	—

Таблица 3

Скорость охлаждения свободного щита при плотности плиты $0,7 \text{ г/см}^3$

Время охлаждения, мин	Расчетные (по формуле 7) значения температуры в середине щита при $\alpha = 8,8 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{ч}$, $^\circ\text{C}$	Опытные значения температуры, $^\circ\text{C}$	
		в клеевом слое	в середине щита
Окончание прессования	—	118,7	82,7
4,5	—	91,0	91,0
0	91,0	91,0	91,0
2	90,3	83,8	92,3
4,5	86,8	75,2	88,4
10	76,6	66,1	77,1
20	62,4	54,6	62,7
30	52	44,1	51,4
45	41,4	37	40,8
60	35,8	32,8	35,3
90	29,8	29,1	29,8
120	27,8	27,7	28

 $t_c = 26^\circ\text{C}$

При достижении одинаковой температуры в клеевом слое и в середине свободно охлаждаемого щита направление теплового потока к середине еще не прекращается, и она продолжает несколько нагреваться, хотя поверхностные слои продолжают охлаждаться. Такой характер теплопереноса заметно выражен при свободном охлаждении щитов и почти отсутствует при охлаждении их в плотном слое.

Таблица 4

Скорость охлаждения центра стопы при плотности плиты $0,7 \text{ г/см}^3$

Время охлаждения, ч	Расчетные значения температуры в центре стопы при $\alpha = 8,8 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{°C}$		Опытные значения температуры в центре стопы, °C	
	по формуле (7)	по формуле (8)	в клеевом слое	в середине щита
Окончание прессования 0,1			124,3 99,8	87,9 99,8
0	99,8	99,8	99,8	99,8
6	99,8	99,8	91,9	92,1
12	99,0	99,0	83,3	83,6
24	93,6	93,6	69,8	70,2
48	76,7	76,7	47,9	48,2
72	63,6	63,6	34,7	34,9
96	53,7	53,0	28,7	28,8
120	46,0	45,1	26,3	26,4
150	39,8	38,8	24,9	24,9
200	32,1	30,9		
240	29,0	27,7		
Среднее значение $t_c = 23^\circ\text{C}$				

Примечание. За начало охлаждения принято время выравнивания температуры по сечению щитов.

Скорости охлаждения середины свободно охлаждаемого щита, согласно опытным данным, соответствует значение коэффициента теплоотдачи $\alpha = 7-8,8 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{°C}$. Эти значения несколько выше, чем для нефанерованных древесностружечных плит, однако ниже, чем для древесины дуба. По-видимому, в данном случае на теплоотдачу плит оказывает свое влияние облицовка строгаными шпоном дуба.

Для полученного опытным путем коэффициента теплоотдачи была рассчитана и скорость охлаждения центра плотно уложенной стопы (см. табл. 4). Однако в данном случае расчетная скорость охлаждения оказалась намного меньшей, чем по опытным данным. Это можно объяснить тем, что между щитами имеются, хотя и малые, воздушные зазоры, и стопа не является сплошным телом, как

было принято при расчетах. Кроме того, вероятно предположить, что значение α для плит в направлении, перпендикулярном к пласти, меньше, чем в направлении, параллельном пласти. А в данном случае теплоотдача происходит через кромки плит, хотя значение принято как и при свободно охлаждаемом щите.

После выравнивания температуры по сечению щитов при охлаждении их в плотно уложенной стопе снижение ее затем идет практически одинаковой скоростью в середине и в клеевом слое.

Из расчетов видно также, что при соотношении размеров стопы $3R_1 = R_2 = R_3$ задача на охлаждение может решаться практически как одномерная, так как наибольшая разность температур по формулам (7) и (8) в приводимом примере составляет $1,3^\circ\text{C}$. В течение же первых трех суток разницы в расчетных значениях температур вообще не наблюдается.

Выводы

1. Продолжительность технологической выдержки щитов после фанерования зависит от их размеров, степени нагрева, тепловых свойств и условий охлаждения и должна определяться с учетом этих факторов.

2. Расчетный метод определения скорости нагрева клеювого шва и скорости охлаждения свободной плиты согласуется с опытными данными. Значение коэффициента теплоотдачи фанерованных плит при этом оказывается выше, чем нефанерованных.

Расчет скорости нагрева середины щита дает несколько заниженные значения при малом времени прессования, так как формула (4) не учитывает явления массопереноса газообразной смеси.

Фактическая скорость охлаждения щитов, уложенных в стопу выше расчетной. Значение коэффициента теплоотдачи для вертикальных стенок стопы требует уточнения, так как данный показатель для кромок и пластей плит вероятнее всего неодинаков, а стопка не является сплошным телом.

3. После окончания прессования в результате выравнивания температуры по сечению происходит значительное повышение ее в середине щитов.

4. Выдержка щитов в стопе требует длительного времени. Резкое сокращение его может быть достигнуто за счет расчленения щитов в стопе, например прокладками.

Литература

- [1] Г. М. Шварцман. Тепловые свойства древесностружечных плит. «Деревообрабатывающая промышленность», 1970, № 7. [2] И. П. Бердинских. Склеивание древесины. Киев, 1965. [3] Б. С. Чудинов. Теория тепловой обработки древесины. М., 1968. [4] А. В. Лыков. Теория теплопроводности. М., 1967.