

МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ  
И ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ

УДК 621.79

ТЕПЛОВАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ПРИКЛЕИВАНИЯ  
ПРИ ОБЛИЦОВЫВАНИИ КРОМОК МЕБЕЛЬНЫХ ЩИТОВ  
С ПОМОЩЬЮ КЛЕЕВ-РАСПЛАВОВ

В. В. АМАЛИЦКИЙ

Московский технологический институт

Процесс приклеивания на кромкооблицовочном оборудовании состоит из последовательного формирования адгезионного соединения клея-расплава с материалом заготовки, адгезионного соединения клея-расплава с облицовочным материалом в зоне прикатки, когезионной прочности клеевого шва при остывании.

Определяющая характеристика процесса — температура клея-расплава в момент прижима облицовочного материала  $T_{\text{скл}}$ . Максимальная прочность приклеивания достигается при  $T_{\text{скл}} = 120 \dots 135$  °С. Возможности оборудования для создания необходимой  $T_{\text{скл}}$  ограничены.

Наши эксперименты показали, что стабильность процесса можно обеспечить предварительным подогревом и подсушиванием кромки щита перед нанесением клея-расплава за счет контакта поверхности кромки с нагревательным элементом. Для хорошего качества приклеивания необходимо также, чтобы к концу зоны прикатки температура клея-расплава уже не превосходила температуры его размягчения, равной 80 °С.

Задача сводится к определению температуры нагревательного элемента, при которой температура клея-расплава в момент прижима облицовочного материала равна 120 °С и не выше 80 °С в конце зоны прикатки. Для решения поставленной задачи разработана тепловая модель процесса приклеивания кромок.

Приклеивание кромок осуществляется на высокой скорости подачи  $S = 15 \dots 40$  м/мин. Каждое поперечное сечение кромки подвергается воздействию следующих факторов процесса, которые можно считать установившимися: температуры окружающего воздуха  $T_f$ , температуры клея-расплава на поверхности клеевого ролика и т. д. Это позволяет рассматривать задачу переноса тепла как одномерную

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} \gg \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{x=0}; \quad \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} \gg \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{x=0}, \quad (1)$$

т. е. градиент температуры направлен перпендикулярно к поверхности кромки, и переносом тепла вдоль осей  $z$  и  $y$  можно пренебречь; перенос тепла осуществляется вдоль оси  $x$  с началом координат на поверхности кромки и положительным направлением вглубь материала. Задача сводится к определению зависимостей температуры  $T$  от координаты  $x$  и времени  $\tau$

$$T = f(x, \tau). \quad (2)$$

Рассмотрим последовательно тепловые процессы на этапах приклеивания кромок.

1. *Предварительный подогрев.* Установившаяся температура нагревательного элемента —  $T_w$ . Начальная температура материала щита —

$T(x, 0) = T_0$ . Температурное поле в материале щита на данном этапе описывают уравнением

$$C_{\text{щ}}(T) \rho_{\text{щ}}(T) \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda_{\text{щ}}(T) \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial \lambda_{\text{щ}}(T)}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x}, \quad (3)$$

где  $C_{\text{щ}}(T)$ ,  $\rho_{\text{щ}}(T)$  и  $\lambda_{\text{щ}}(T)$  — соответственно удельная массовая теплоемкость, плотность и коэффициент теплопроводности материала щита — функции температуры.

Начальные и граничные условия

$$\tau = 0 \Rightarrow T(x, 0) = T_0 = \text{const}; \quad (4)$$

$$x = 0 \Rightarrow T(0, \tau) = T_{\text{в}} = \text{const}. \quad (5)$$

Это значит, что поверхность кромки щита при контакте с нагревательным элементом сразу приобретает температуру  $T_{\text{в}}$  и не меняет ее на протяжении времени контакта с нагревательным элементом;

$$x = \infty \Rightarrow T(\infty, \tau) = T_0 = \text{const}, \quad (6)$$

т. е. за краткое время протекания процесса удаленные от поверхности кромки слои материала щита не успевают прогреться.

Длительность данного этапа  $\tau_1$  определяется отношением длины нагревательного элемента  $l_{\text{н.э}}$  к скорости подачи

$$\tau_1 = \frac{l_{\text{н.э}}}{S}. \quad (7)$$

2. *Охлаждение кромки (переходный процесс)*. Воздух движется вдоль кромки со скоростью  $W_f = S$ . Плотность конвективного теплового потока  $q_{\alpha}$  выражают через поверхность кромки щита

$$q_{\alpha} = \alpha [T_f - T(0, \tau)], \quad (8)$$

где  $\alpha$  — коэффициент теплообмена.

Плотность теплового потока излучения

$$q_R = \sigma_{\text{щ}} [T_f^4 - T^4(0, \tau)]. \quad (9)$$

Здесь  $\sigma_{\text{щ}}$  — коэффициент излучения материала щита.

Температурное поле в материале щита описывают уравнением (3). Начальные и граничные условия

$$\tau = \tau_1 \Rightarrow T(x, \tau) = T(x, \tau_1); \quad (10)$$

$$x = 0 \Rightarrow \lambda_{\text{щ}}(T) \frac{\partial T(0, \tau)}{\partial x} = \alpha [T_f - T(0, \tau)] + \sigma_{\text{щ}} [T_f^4 - T^4(0, \tau)]. \quad (11)$$

Следовательно, плотность теплового потока, приходящего к поверхности кромки за счет теплопроводности, равна сумме плотностей конвективного и лучистого потоков с поверхности кромки в окружающую среду;

$$x = \infty \Rightarrow T(\infty, \tau) = T_0 = \text{const}. \quad (12)$$

Длительность этапа  $\tau_{\text{II}} - \tau_1$  определяется отношением расстояния от нагревательного элемента до клеенаносящего ролика  $l_{\text{ок}}$  к  $S$

$$\tau_{\text{II}} - \tau_1 = \frac{l_{\text{ок}}}{S}. \quad (13)$$

3. *Нанесение и охлаждение клея.* На кромку щита наносят слой клея-расплава толщиной  $\delta$  при температуре  $T_k$ . Тепло из клеевого слоя отводится в материал щита и в окружающую среду в результате конвекции и излучения. Плотности соответствующих тепловых потоков задаются как (8) и

$$q_R = \sigma_{кл} [T_f^4 - T^4(0, \tau)], \quad (14)$$

где  $\sigma_{кл}$  — коэффициент излучения клея.

Начало координат по оси  $x$  переносят на поверхность клеевого слоя. Соотношение между новой  $x'$  и старой  $x$  координатами

$$x' = x + \delta. \quad (15)$$

Температурное поле в клеевом слое

$$C_{кл}(T) \rho_{кл}(T) \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda_{кл}(T) \frac{\partial^2 T}{\partial x'^2} + \frac{\partial \lambda_{кл}(T)}{\partial x'} \frac{\partial T}{\partial x'}. \quad (16)$$

Здесь  $C_{кл}(T)$ ,  $\rho_{кл}(T)$  и  $\lambda_{кл}(T)$  — соответственно удельная массовая теплоемкость, плотность и коэффициент теплопроводности клея — функции  $T$ .

Температурное поле в материале щита

$$C_{щ}(T) \rho_{щ}(T) \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda_{щ}(T) \frac{\partial^2 T}{\partial x'^2} + \frac{\partial \lambda_{щ}(T)}{\partial x'} \frac{\partial T}{\partial x'}. \quad (17)$$

Начальные и граничные условия на данном этапе

$$\tau = \tau_{II} \Rightarrow \begin{cases} T(x', \tau_{II}) = T_k = \text{const}; \\ 0 \leq x' \leq \delta, \end{cases} \quad (18)$$

т. е. температура в клеевом слое в момент нанесения распределена равномерно по глубине слоя;

$$x' = 0 \Rightarrow \lambda_{кл}(T) \frac{\partial T(0, \tau)}{\partial x'} = \alpha [T_f - T(0, \tau)] + \sigma_{кл} [T_f^4 - T^4(0, \tau)]; \quad (19)$$

$$\lambda_{кл}(T) \frac{\partial T}{\partial x'} \Big|_{x'=\delta-} = \lambda_{щ}(T) \frac{\partial T}{\partial x'} \Big|_{x'=\delta+}. \quad (20)$$

Значит, на границе клей — щит принимается идеальный тепловой контакт;

$$x' = \infty \Rightarrow T(\infty, \tau) = T_0 = \text{const}. \quad (21)$$

Длительность этапа  $\tau_{III} - \tau_{II}$  определяют отношением расстояния  $l_{ок.к}$  от клеенаносящего ролика до зоны прикатки к  $S$

$$\tau_{III} - \tau_{II} = \frac{l_{ок.к}}{S}. \quad (22)$$

4. *Прижим облицовочного материала и дальнейшее охлаждение клея.* К кромке щита с нанесенным клеем прижимают облицовочный материал толщиной  $\Delta$ , имеющий температуру  $T_{об}$ .

Тепло из клеевого слоя отводится в материал щита, в облицовочный материал, а с его поверхности — в окружающую среду за счет конвективного теплового потока, плотность которого определяется как (8). Поскольку разность между  $T_{об}$  и  $T_f$  невелика, действием излучения можно пренебречь. Начало координат переносят на поверхность облицовочного материала. Соотношение между новой  $x''$  и старыми координатами

$$x'' = x' + \Delta = x + \delta + \Delta. \quad (23)$$

Температурное поле в облицовочном материале

$$C_{об}(T) \rho_{об}(T) \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda_{об}(T) \frac{\partial^2 T}{\partial x^{112}} + \frac{\partial \lambda_{об}(T)}{\partial x''} \frac{\partial T}{\partial x''}, \quad (24)$$

где  $C_{об}(T)$ ,  $\rho_{об}(T)$ ,  $\lambda_{об}(T)$  — соответственно удельная массовая теплоемкость, плотность и коэффициент теплопроводности облицовочного материала — функции температуры.

Температурное поле в клеевом слое и в материале щита

$$C_{кл}(T) \rho_{кл}(T) \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda_{кл}(T) \frac{\partial^2 T}{\partial x^{112}} + \frac{\partial \lambda_{кл}(T)}{\partial x''} \frac{\partial T}{\partial x''}; \quad (25)$$

$$C_{щ}(T) \rho_{щ}(T) \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda_{щ}(T) \frac{\partial^2 T}{\partial x^{112}} + \frac{\partial \lambda_{щ}(T)}{\partial x''} \frac{\partial T}{\partial x''}. \quad (26)$$

Начальные и граничные условия на данном этапе

$$\tau = \tau_{III} \Rightarrow \begin{cases} T(x'', \tau_{III}) = T_{об} = \text{const}; \\ 0 \leq x'' \leq \Delta, \end{cases} \quad (27)$$

т. е. температура в облицовочном материале в момент прижима распределена равномерно по его глубине;

$$\tau = \tau_{III} \Rightarrow \begin{cases} T(x'', \tau_{III}) = T(x', \tau_{III}); \\ \Delta < x'' < \infty; \\ x'' = x' + \Delta; \end{cases} \quad (28)$$

$$x'' = 0 \Rightarrow \lambda_{об}(T) \frac{\partial T(0, \tau)}{\partial x''} = \alpha [T_f - T(0, \tau)]; \quad (29)$$

$$\lambda_{об}(T) \frac{\partial T}{\partial x''} \Big|_{x'' = \Delta -} = \lambda_{кл}(T) \frac{\partial T}{\partial x''} \Big|_{x'' = \Delta +}; \quad (30)$$

$$\lambda_{кл}(T) \frac{\partial T}{\partial x''} \Big|_{x'' = (\Delta + \delta) -} = \lambda_{щ}(T) \frac{\partial T}{\partial x''} \Big|_{x'' = (\Delta + \delta) +}, \quad (31)$$

т. е. на границах облицовочный материал — клей и клей — щит — идеальный тепловой контакт;

$$x'' = \infty \Rightarrow T(\infty, \tau) = T_0 = \text{const}. \quad (32)$$

Длительность этапа  $\tau_{IV} - \tau_{III}$  определяют как отношение расстояния между первым и последним роликами прижимной зоны  $l_{пр}$  к  $S$

$$\tau_{IV} - \tau_{III} = \frac{l_{пр}}{S}. \quad (33)$$

При  $\tau > \tau_{IV}$  закономерности IV этапа сохраняются.

Для решения уравнений методом конечных разностей [1—3], основанным на замене непрерывного процесса теплообмена скачкообразным в пространстве и во времени, материалы разбивают вдоль оси  $x$  на слои толщиной  $\Delta x$ , а время — на промежутки  $\Delta \tau$ . Номер слоя по координате  $x$  обозначим через  $i$ , а номер промежутка  $\Delta \tau$  времени  $\tau$  — через  $k$ .

Конечно-разностная аппроксимация уравнений (3), (16), (17), (24) — (26) в соответствии с [1] имеет вид:

$$C_{i, k-1} \rho_{i, k-1} \frac{T_{i, k} - T_{i, k-1}}{\Delta \tau} = \lambda_{i, k-1} \frac{T_{i-1, k-1} - 2T_{i, k-1} + T_{i+1, k-1}}{(\Delta x)^2} + \\ + \frac{\lambda_{i+1, k-1} - \lambda_{i-1, k-1}}{2\Delta x} \frac{T_{i+1, k-1} - T_{i-1, k-1}}{2\Delta x}, \quad (34)$$

откуда

$$T_{i, k} = \frac{\Delta \tau}{C_{i, k-1} \rho_{i, k-1} (\Delta x)^2} \left[ \lambda_{i, k-1} (T_{i-1, k-1} - 2T_{i, k-1} + T_{i+1, k-1}) + \right. \\ \left. + \frac{(\lambda_{i+1, k-1} - \lambda_{i-1, k-1})(T_{i+1, k-1} - T_{i-1, k-1})}{4} \right] + T_{i, k-1}. \quad (35)$$

Уравнение (35) можно решить при известном температурном поле в предыдущий  $(k-1)$ -й момент времени.

Из уравнения (29) для точки поверхности с координатой  $x_0$  в момент  $\tau_k$  получим [1]

$$\frac{\Delta x}{2} C_{0, k-1} \rho_{0, k-1} \frac{T_{0, k} - T_{0, k-1}}{\Delta \tau} + \lambda_{0, k-1} \frac{T_{1, k-1} - T_{0, k-1}}{\Delta x} = \\ = \alpha (T_f - T_{0, k-1}), \quad (36)$$

отсюда

$$T_{0, k} = \left[ \alpha (T_f - T_{0, k-1}) - \lambda_{0, k-1} \frac{T_{1, k-1} - T_{0, k-1}}{\Delta x} \right] \times \\ \times \frac{2\Delta \tau}{\Delta x C_{0, k-1} \rho_{0, k-1}} + T_{0, k-1}. \quad (37)$$

Аналогично из (11), (19) найдем

$$T_{0, k} = \left[ \alpha (T_f - T_{0, k-1}) + \sigma (T_f^4 - T_{0, k-1}^4) - \right. \\ \left. - \lambda_{0, k-1} \frac{T_{1, k-1} - T_{0, k-1}}{\Delta x} \right] \frac{2\Delta \tau}{\Delta x C_{0, k-1} \rho_{0, k-1}} + T_{0, k-1}. \quad (38)$$

Наши исследования позволяют выделить три основных фактора, определяющих тепловой режим:  $T_0$ ,  $T_f$  и  $S$ . При помощи разработанной программы решения модели на ЭВМ проведены машинные эксперименты по установлению их влияния на  $T_w$ , необходимую для обеспечения оптимального теплового режима. Диапазоны варьирования определены для производственных и возможных неблагоприятных условий ( $T_0 = 5 \dots 25$  °C;  $S = 15 \dots 36$  м/мин;  $T_f = 10 \dots 20$  °C).

Из конструктивных соображений на расстоянии  $l_{ок} = 0,3$  м до клееносящего ролика устанавливают металлический нагревательный элемент длиной  $l_{н.э} = 0,15$  м, температура на поверхности которого регулируется в диапазоне  $100 \dots 300$  °C. Расстояния  $l_{ок,к} = 0,3$  м,  $l_{пр} = 0,425$  м.  $T_k = 200$  °C,  $\delta = 0,00025$  м,  $\Delta = 0,0005$  м,  $T_{об} = T_f$ .

Для расчета определены теплофизические характеристики древесностружечных плит, клея-расплава КРУС, двухслойного полиэфирного пластика.

В результате расчета на ЭВМ получено уравнение регрессии

$$T_w = 412,885 - 1,47T_0 - 0,5T_f - 8,206S + 0,0696S^2. \quad (39)$$

Данное уравнение позволяет определить  $T_w$  для качественного и стабильного приклеивания кромки. Разработанный метод расчета позволяет получить аналогичные выражения для любых материалов, используемых в процессе облицовывания. Для этого необходимо определить теплофизические характеристики материалов.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1]. Купцова В. С. Основы вычислительной математики в приложении к теплофизическим задачам. Ч. 1.— М.: МЛТИ, 1975.— 100 с. [2]. Лариков Н. Н.

Теплотехника.— М.: Стройиздат, 1985.— 432 с. [3]. Романенко П. Н., Обливин А. Н., Семенов Ю. П. Теплопередача.— М.: Лесн. пром-сть, 1969.— 432 с.

Поступила 19 мая 1987 г.

УДК 674.053 : 621.933.6.025.7

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ КРУГЛЫХ ПИЛ НОВОЙ КОНСТРУКЦИИ

В. Н. ПЛЮСНИН, Ц. А. ГОТЛИБ, А. И. ШЕЙНОВ,  
В. А. ДЫМОЧКО

Ленинградская лесотехническая академия

В настоящее время наметилась тенденция применения в лесопильном производстве круглопильных станков для раскроя бревен и брусьев. Возможность надежной работы круглопильных станков в высокопроизводительных режимах резания с минимальными потерями древесины в опилки в значительной степени определяется эксплуатационной надежностью режущего инструмента (круглых пил).

В ЛТА проводят теоретические исследования, связанные с разработкой новой конструкции тонких (до 1,5 мм) круглых пил для раскроя брусьев высотой до 250 мм с минимальным объемом потерь древесины в опилки. Их принципиальное отличие от серийно выпускаемых состоит в том, что центральная часть диска пилы разделена технологическими прорезями на спицы, концы которых имеют форму усеченного сектора (рис. 1, а) и расположены с зазором в секторных пазах шайбы с радиальными перемычками между пазами.

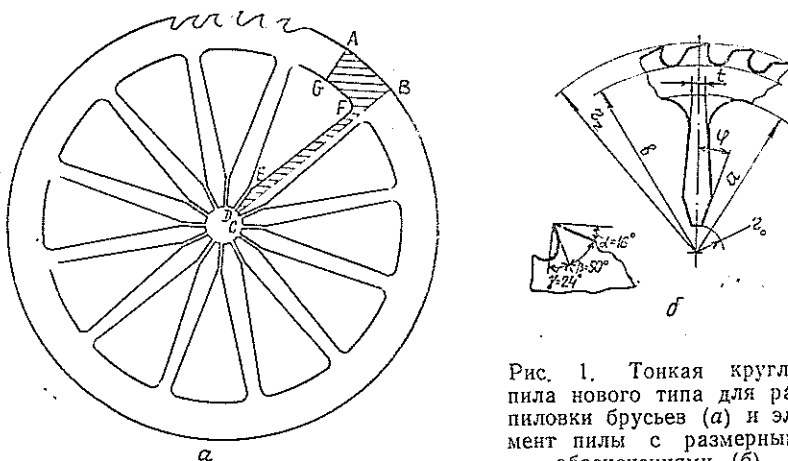


Рис. 1. Тонкая круглая пила нового типа для распиловки брусьев (а) и элемент пилы с размерными обозначениями (б)

При вращении пилы концы спиц могут перемещаться в секторных пазах шайбы в радиальном направлении, обеспечивая самонапряжение периферийной части (обода), имеющей форму узкого кольца. Это позволяет исключить большие радиальные градиенты температурных полей и полей напряжений. Неоднородность нагрузки и местный нагрев в зоне резания компенсируются свободным расширением обода. Тем самым устраняется основной недостаток круглых пил со сплошным диском.

Известно, что во вращающихся дисках, имеющих центральное отверстие, напряжения тем выше, чем больше диаметр отверстия. Кроме