

УДК 674.093.26

А. Н. ЧУБИНСКИЙ, Б. М. НУЛЛЕР

С.-Петербургская лесотехническая академия

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
ПРОЦЕССОВ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И ПРОПИТКИ ДРЕВЕСИНЫ  
ПРИ СКЛЕИВАНИИ**

Разработана модель процесса связанного деформирования и пропитки шпона связующим при склеивании фанеры, позволяющая определить глубину проникновения клея в древесину и обосновать продолжительность пьезотермической обработки пакета шпона.

The process model of bound deformation and impregnation of veneer with adhesive when plywood gluing which allows to determine the depth of the glue penetration into the wood and substantiate the duration of piezothermal treatment of veneer package.

Древесина как материал, подлежащий склеиванию, представляет собой неоднородную пористую деформируемую среду, которая взаимодействует с жидкостью (клеем). В сухой древесине поры играют пассивную роль, деформацию в первом приближении можно описать уравнениями теории упругости. В случае пропитки древесины движение жидкости за счет внутренних капиллярных сил без учета деформирования твердой фазы изучают при помощи теории фильтрации.

При совместном воздействии на пористый материал деформационных и фильтрационных нагрузок, имеющих место на первом этапе склеивания, используют видоизмененные физические законы и геометрические соотношения (законы Гука и Дарси, уравнения равновесия и сплошности).

Для описания этих процессов воспользуемся теорией связанного деформирования и фильтрации, получившей название теории уплотнения или консолидации [5].

Запишем основные соотношения:

уравнение равновесия

$$\frac{\partial}{\partial x} (\sigma - np) = 0; \tag{1}$$

уравнение сплошности

$$\frac{\partial}{\partial x} [nv + (1 - n)\dot{u}] = 0; \tag{2}$$

закон Гука — Био

$$\sigma = f(u') - (1 - n)p; \tag{3}$$

закон Дарси — Герсеванова

$$v - \dot{u} = -\frac{k}{n} \frac{\partial p}{\partial x}, \tag{4}$$

где  $x$  — пространственная координата, перпендикулярная склеиваемым листам древесины;

$\sigma$  — нормальные напряжения в древесине (скелете);

- $n$  — пористость древесины;  
 $p$  — поровое давление в клее;  
 $nv$  — скорость фильтрации (расход клея через единичную площадь среды в единицу времени);  
 $v$  — средняя скорость поровой жидкости в направлении  $x$ ;  
 $u$  — перемещение древесины (скелета) в направлении  $x$ ;  
 $k$  — коэффициент фильтрации клея в древесине,

$$k = \frac{n\delta^2}{\mu} \alpha; \quad (5)$$

- $\delta$  — средний диаметр поры;  
 $\mu$  — вязкость клея в древесине;  
 $\alpha$  — коэффициент геометрической формы порового пространства.

Предполагается, что характер процесса зависит от концентрации клея и температуры склеиваемого материала  $T$ .

Преобразуя (1) — (4) в соответствии с [2], получаем нелинейное уравнение двухфазной консолидации

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{1}{h' [p - P(t)]} \frac{\partial}{\partial x} k \frac{\partial p}{\partial x} + P(t), \quad (6)$$

где  $h' [p(t)]$  функция, обратная  $\sigma(t)$ ;

$P(t)$  — давление прессования в момент времени  $t$  (график наложения давления при склеивании),  $P(t) = p(0, t)$ .

Определяем граничные и начальные условия для выражения (6). На поверхности шпона (при  $x = 0$ ) справедливо равенство

$$p(0, t) = P(t). \quad (7)$$

Уравнение (6) описывает состояние древесины, пропитанной клеем, т. е. область  $x \in (0, l)$ . Граница этой области (функция  $l = l(t)$ ), отделяющая сухую и пропитанную древесину, по мере проникновения клея в глубь шпона смещается во времени, однако, скорость изменения  $l$  заранее неизвестна и подлежит определению в ходе решения краевой задачи. Таким образом, мы имеем дела с задачей Стефана, в которой условие на движущейся границе  $x = l$  описывается двумя равенствами:

$$v'(l, t) = K \frac{\partial l}{\partial t}; \quad p(l, t) = r(l), \quad (8)$$

где  $K$  — коэффициент поглощения клея древесиной;

$r(x)$  — функция, учитывающая поверхностное натяжение связующего.

Начальное условие задается на промежутке  $x \in [0, l(0)]$  минимальной длины. Предполагается, что давление на нем распределено по линейному закону

$$p(x, 0) = P(0) - \frac{x}{l} [p(0) + r(l)]; \quad (9)$$

$$x \in [0, l(0)].$$

Одновременно с проникновением в древесину клея наблюдается встречное движение двух фаз. Связующее (сухое вещество) является менее подвижной составной частью и обладает большей вязкостью по сравнению с содержащейся в клее водой, которая легко проникает в подложку, перемещаясь относительно адгезива.

Принято считать, что скорость молекулярной диффузии  $q$  (скорость воды в неподвижном связующем) пропорциональна градиенту концентрации  $c$  вещества, т. е. доле объема воды в единице объема раствора:

$$q = -s \frac{\partial c}{\partial x}. \quad (10)$$

Здесь  $s$  — коэффициент молекулярной диффузии.

Дифференцируя (10) по  $x$  и учитывая уравнение неразрывности клея

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = 0, \quad (11)$$

получаем

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} s \frac{\partial c}{\partial x}. \quad (12)$$

Если  $s$  не зависит от  $x$ , то выражение (12) принимает вид

$$\frac{\partial c}{\partial t} = s \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}. \quad (13)$$

Уравнение (12) справедливо для неподвижной среды.

Если клей движется в порах древесины со средней скоростью  $v$ , то частную производную  $\frac{\partial c}{\partial t}$  в (12) следует заменить на субстанциальную  $\frac{D(c)}{D(t)}$ , определяемую равенством

$$\frac{D(c)}{D(t)} = \frac{\partial c}{\partial t} + v \frac{\partial c}{\partial x}. \quad (14)$$

В результате уравнение (12) приобретает вид

$$\frac{\partial c}{\partial t} + v \frac{\partial c}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} s \frac{\partial c}{\partial x}. \quad (15)$$

Определяем граничные и начальные условия. Учитывая активное избирательное поглощение воды древесиной при первом ее контакте с клеем, на границе  $x = l(t)$ , разделяющей сухую и пропитанную зоны, можно поставить условие

$$c[l(t), t] = 0. \quad (16)$$

Второе граничное условие для уравнения (15) учитывает баланс поступления за время  $t$  в древесину клея и воды с учетом, что концентрация  $c(0, t)$  воды в слое клея толщиной  $H(t)$  на поверхности шпона распределена равномерно. Оно представляет собой интегральное уравнение, которое связывает первоначально заданную толщину  $H_0 = H(0)$ , зависящую от расхода клея на единицу площади, и концентрацию  $c_0 = c(0, 0)$  в клеевом слое на поверхности шпона с градиентом концентрации и давления:

$$\left[ H_0 + \int_0^t k \frac{\partial}{\partial x} p(0, \tau) d\tau \right] c(0, t) = H_0 c_0 + \int_0^t \left[ k \frac{\partial}{\partial x} p(0, \tau) + s \frac{\partial}{\partial x} c(0, \tau) \right] d\tau. \quad (17)$$

Начальное условие

$$c(x, 0) = c_0 - \frac{c_0 x}{l}. \quad (18)$$

Величина  $H(t) = H_0 \int_0^t k \frac{\partial}{\partial x} p(0, \tau)$  в левой части уравнения (17) определяет остаточную толщину клеевого слоя на поверхности шпона в момент времени  $t$ .

Известные теории адгезии [3] утверждают, что наибольшая прочность склеивания достигается при минимально возможной толщине

клеевого слоя. Следовательно, время  $t_k$ , при котором  $H(t_k) \rightarrow 0$ , характеризует требуемую степень отверждения клея определенной начальной концентрации, делающей невозможным его дальнейшее проникновение в древесину.

Экспериментально установлено [1, 6], что на поверхности шпона для фанеры горячего способа прессования отсутствует сплошная отвержденная клеевая прослойка определенной толщины  $H_\infty$ . Связующее проникает в древесину на глубину 0,06...0,16 мм, т. е. склеиваемые листы шпона контактируют между собой пропитанными клеем поверхностями.

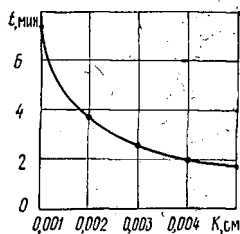


Рис. 1. Зависимость продолжительности  $t$  полного поглощения клея древесиной от коэффициента поглощения  $K$

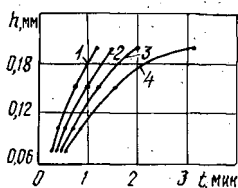


Рис. 2. Зависимость глубины  $h$  проникновения клея в шпон от продолжительности  $t$  пьезотермической обработки при различных значениях коэффициента поглощения  $K$ : 1—0,005; 2—0,004; 3—0,003; 4—0,002

Численное решение уравнений (6) и (15) при начальных и граничных условиях (7) — (9), (16) — (18) по методу конечных разностей [4] показывает удовлетворительное совпадение опытных и расчетных данных (рис. 1, 2), что позволяет использовать теорию консолидации для изучения процесса склеивания шпона, в том числе, и для установления расхода связующего в зависимости от его начальной вязкости и концентрации; обоснования температуры склеивания и продолжительности ее воздействия; обоснования графика изменения давления и др.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Бирюков В. Г. Исследование структуры клеевого шва фанеры методом микроскопии // Лесн. журн.—1983.—№ 6.—С. 67—70.—(Изв. высш. учеб. заведений).  
 [2]. Глаголевский В. Б., Нуллер Б. М. Об уравнении одномерной консолидации // Изв. ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева.—1993.—Т. 227.—С. 25—30.  
 [3]. Куликов В. А. Производство фанеры.—М.: Лесн. пром-сть, 1976.—368 с.  
 [4]. Нуллер Б. М. О численном решении нелинейных задач консолидации грунтов // Изв. ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева.—1965.—Т. 79.—С. 178—183.  
 [5]. Флорин В. А. Основы механики грунтов.—М.: Госстройиздат, 1961.—351 с.

Поступила 29 ноября 1994 г.