

РАСЧЕТ УСИЛИЙ ПРЕССОВАНИЯ ПРОФИЛЬНЫХ  
ИЗДЕЛИЙ ИЗ ШПОНА

В электротрансформаторах для разделения обмоток используются в настоящее время, так называемые, распорные рейки (клинья). Изготавливаются они из высокосортных буковых пиломатериалов путем механической обработки. При этом полезный выход готовых клиньев не превышает 30—35%. Размеры их в зависимости от типов и мощности трансформаторов могут быть: длина от 300 до 600 мм, ширина от 9 до 16 мм и толщина от 3 до 12 мм.

На кафедре клееных материалов и плит БТИ им. С.М.Кирова с целью замены ценной буковой древесины в электротехнической промышленности на менее дефицитный материал были проведены исследования по изготовлению аналогичных клиньев из березового шпона методом прессования в специальной пресс-форме [1].

Разработанная на кафедре конструкция пресс-формы позволяет получать готовые детали практически без дальнейшей механической обработки их.

Пресс-форма состоит из матрицы и пуансона. Рабочая поверхность матрицы выполнена с чередованием рассекающих ножей и впадин, причем пространство между смежными ножами, т.е. впадина, имеют конфигурацию готового изделия. По периметру матрица снабжена отсекателями.

Работа пресс-формы заключается в следующем. Набранный пакет шпона с нанесенным на склеиваемые поверхности клеем укладывается на рабочую поверхность матрицы таким образом, чтобы волокна древесины шпона были направлены вдоль впадин. При рабочем ходе ползуна пресса давление через пуансон передается на пакет шпона. В результате происходит разрезание пакета шпона ножами матрицы на отдельные заготовки, их уплотнение в области впадин и формование изделия с одновременным склеиванием шпона. Благодаря такой конструкции пресс-формы представляется возможность в результате одной запрессовки получить несколько готовых деталей.

Использованный в конструкции пресс-формы способ разделения пакета на отдельные детали в процессе прессования может быть применен при изготовлении не только клиньев, но и других профильных изделий.

Однако конструкция пресс-формы затрудняет правильно выбрать удельное давление, необходимое для разрезания пакета шпона, его уплотнения во впадины, склеивания и формования самого изделия, так как помимо контактных сил на шпон будут действовать и другие силы. В данной работе теоретически доказывается возможность определения оптимального удельного давления прессования.

Для перерезания (расслаивания) шпона вдоль волокон в точках А, В, С (рис. 1) необходимо усилие, равное

$$P_1 = \sigma_{в(ср)} F_n, \quad (1)$$

где  $\sigma_{в(ср)}$  — временное сопротивление срезу шпона вдоль волокон, которое можно определить опытным путем;  $F$  — площадь среза одного листа шпона по одной линии среза;  $n$  — число срезов;

$$F = b \cdot n, \quad (2)$$

где  $b$  — длина линии среза (клина).

После того как лист шпона разрезан, отдельные отрезки его под давлением перемещаются в трапецидальное пространство  $A_1ABB_1$ . При этом отрезок шпона  $AB$  длиной  $l$  укорачивается.

Так, если он смещается на величину, равную толщине шпона  $h$ , то его длина уменьшается на  $\Delta l = h \operatorname{tg} \alpha$ .

Относительная деформация при этом будет равна

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l}.$$

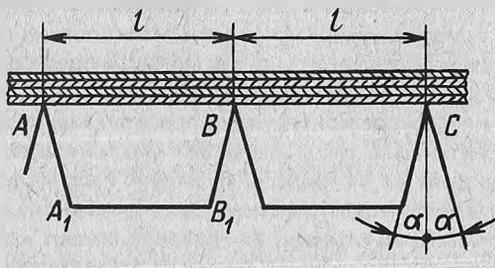


Рис. 1.

Напряжение, возникающее в листе шпона, равно

$$\sigma = \epsilon E_t = \frac{h \operatorname{tg} \alpha}{l} E_t, \quad (3)$$

где  $E_t$  — модуль упругости отрезка шпона в тангенциальном направлении. Силы, с которыми лист шпона давит на стенки  $AA_1$  и  $BB_1$ , равны

$$N = \sigma F = \frac{b h^2 \operatorname{tg} \alpha}{l} E_t. \quad (4)$$

Так как стенки  $AA_1$  и  $BB_1$  наклонные, то для продвижения отрезка шпона необходимо некоторое усилие.

Рассмотрим силы, действующие на шпон (рис. 2).

Нормальное давление листа на стенки будет равно

$$N^* = N \cos \alpha = \frac{b h^2 \sin \alpha}{l} E_t. \quad (5)$$

Сила трения, препятствующая движению листа шпона, равна

$$P_{тр} = N^* k, \quad (6)$$

где  $k$  — коэффициент трения древесины о стенки пресс-формы. Запишем условие равновесия листа шпона

$$\Sigma y = 0; 2N^* \sin \alpha + 2P_{\text{ТР}} \cos \alpha - P_2^* = 0.$$

Отсюда  $P_2^* = 2N^* \sin \alpha + 2P_{\text{ТР}} \cos \alpha$ .

Подставляя значения  $N^*$  и  $P_{\text{ТР}}$  согласно выражениям (5) и (6), получим

$$P_2^* = 2 \frac{bh^2 \sin \alpha}{l} E_t (\sin \alpha + K \cos \alpha).$$

Так как количество разрезающих ножей в пресс-форме равно  $n$ , то количество клиньев, получаемых в результате одной запрессовки, равно  $n-1$ .

Тогда сила, необходимая для продвижения отрезка шпона на величину  $h$  по всем  $n-1$  впадинам, будет равна

$$P_2 = P_2^* (n-1) = \frac{2bh^2 \sin \alpha}{l} E_t (n-1) (\sin \alpha + K \cos \alpha). \quad (7)$$

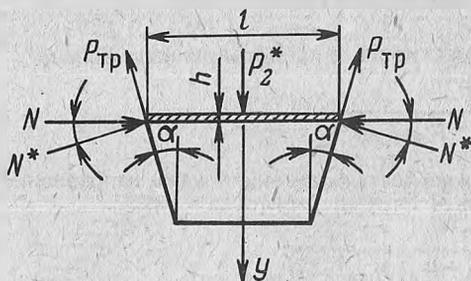


Рис. 2.

Если один клин прессуется из  $m$  листов шпона, то первый лист должен продвинуться  $m$  раз на величину  $h$ , второй —  $m-1$  раз на величину  $h$ , третий  $m-2$  раза на величину  $h$  и т.д., последний на величину  $h$ . (Это условие справедливо в том случае, если высота впадины  $H$  равна сумме толщин шпона, т.е.  $H = mh$  до тех пор, пока не началось уплотнение и формование клина. Если  $H < mh$ , то продвижение будет меньшим, и наоборот.)

Таким образом, число продвижений всех листов шпона в одном клине (при  $H = mh$ ) на величину  $h$  будет равно

$$m_1 = \frac{1+m}{2} m. \quad (8)$$

Если не было бы потери устойчивости прямолинейной формы равновесия отдельными отрезками шпона, то сила продвижения их во всех впадинах

$$P_3 = P_2 m_1 = P_2 \frac{1+m}{2} m. \quad (9)$$

Но отдельные листы потеряют устойчивость, когда напряжение  $\sigma$  достигнет критического значения. Для дальнейшего продвижения этих отрезков

не потребуется увеличивать силу; она останется на уровне силы, соответствующей критическому напряжению.

Для определения критического напряжения рассмотрим лист как ортотропную пластинку. Уравнение равновесия для ортотропной пластинки имеет вид [2]

$$D_t \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2D_n \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + D_a \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} + h(\sigma_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \sigma_y \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + 2\tau \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}) = 0. \quad (10)$$

В нашем случае  $\sigma_y = \tau = 0$ . Тогда уравнение (10) запишется

$$D_t \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2D_n \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + D_a \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} + h\sigma_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = 0. \quad (11)$$

Здесь введены следующие обозначения:

$D_a$  — изгибная жесткость в продольном направлении

$$D_a = \frac{E_a h^3}{12(1 - \mu_{at}\mu_{ta})};$$

$D_t$  — изгибная жесткость в тангенциальном направлении

$$D_t = \frac{E_t h^3}{12(1 - \mu_{at}\mu_{ta})};$$

$D_n$  — приведенная жесткость

$$D_n = D_t \mu_{at} + 2D_k;$$

$D_k$  — крутильная жесткость

$$D_k = \frac{1}{2} \sigma_{at} h^3,$$

где  $E_a$  — модуль упругости в продольном (аксиальном) направлении;  $E_t$  — модуль упругости в тангенциальном направлении;  $\mu_{ta}, \mu_{at}$  — коэффициенты Пуассона (первый индекс показывает направление нагружения, второй — направление поперечной деформации);  $\sigma_{at}$  — модуль сдвига в аксиально-тангенциальной плоскости.

Отрезок шпона можно рассматривать шарнирно закрепленным по краям АС и БД, а края АВ и СД свободные (рис. 3). Тогда граничными условиями будут  $w = 0$ :

$$M_x = -D_t \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \mu_{at} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) = 0$$

при  $x = 0, x = l$ .

Выберем решение уравнения (11) в виде

$$w(x, y) = w_0 \sin \frac{m\pi x}{l}, \quad (12)$$

где  $m$  — число полуволн по направлению  $x$ .

Найдем производные от  $w$

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} = \frac{m^4 \pi^4}{l^4} w_0 \sin \frac{m\pi x}{l};$$

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} = 0; \quad \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = 0; \quad \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = -\frac{m^2 \pi^2}{l^2} w_0 \sin \frac{m\pi x}{l}.$$

Подставляя значения производных в уравнение (11), получим

$$\sigma_{кр} = \frac{\pi^2 \sqrt{D_t D_a}}{b^2 h} \left[ \sqrt{\frac{D_t}{D_a}} \frac{m^2 b^2}{l^2} + \frac{2D_n}{\sqrt{D_t D_a}} + \sqrt{\frac{D_a}{D_t}} \frac{l^2}{b^2 m^2} \right]. \quad (13)$$

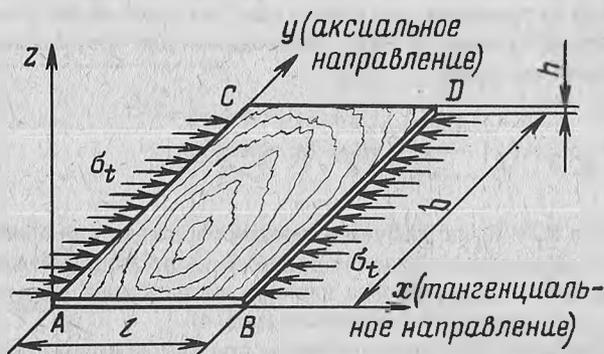


Рис. 3.

В нашем случае  $b \gg l$ , поэтому можно принять  $m = 1$ . Тогда

$$\sigma_{кр} = \frac{\pi^2 \sqrt{D_t D_a}}{b^2 h} \left[ \sqrt{\frac{D_t}{D_a}} \frac{b^2}{l^2} + \frac{2D_n}{\sqrt{D_t D_a}} + \sqrt{\frac{D_a}{D_t}} \frac{l^2}{b^2} \right]$$

или

$$\sigma_{кр} = \frac{\pi^2}{b^2 h} \left( D_t \frac{b^2}{l^2} + 2D_n + D_a \frac{l^2}{b^2} \right). \quad (14)$$

Кроме того,  $b$  настолько больше  $l$ , что можно принять в формуле (14)

$b \rightarrow \infty$ .

Тогда

$$\sigma_{кр} = \frac{\pi^2 D_t}{h^2}. \quad (15)$$

Согласно формуле (3), если лист шпона продвигается во впадину пресс-формы  $m_2$  раза на величину  $h$ , то в листе возникнет сжимающее напряжение в тангенциальном направлении, равное

$$\sigma_t = \frac{h \operatorname{tg} \alpha}{l} E_t m_2. \quad (16)$$

Приравнявая напряжение  $\sigma_{кр}$  и  $\sigma_t$  согласно формулам (15) и (16), определим  $m_2$ , при котором лист шпона потеряет устойчивость. Тогда для продвижения листов в пределах  $m_2$  необходимо приращение силы, а дальше сила остается неизменной. Продвижение  $m$  листов шпона в пределах  $m_2$  будет равно

$$m_3 = \frac{1 + m_2}{2} m_2 + (m - m_2) m_2. \quad (17)$$

Таким образом,  $m$  листов шпона продвинутся  $m_3$  раза на величину  $h$ , при этом каждый раз сила должна увеличиться на величину  $P_2$ , дальнейшее продвижение шпона за пределами  $m_2$  происходит без увеличения силы.

Следовательно, суммарная сила, необходимая для продвижения во впадине всех листов шпона, равна

$$P_4 = P_2 m_3 = P_2 \left[ \frac{1 + m_2}{2} m_2 + (m - m_2) m_2 \right]. \quad (18)$$

Помимо сил  $P_1$  и  $P_4$  потребуется некоторое усилие для обжатия листов, потерявших устойчивость в процессе продвижения по зазору между рассекающими ножами пресс-формы. Когда верхние листы шпона достигнут нижней границы  $A_1 B_1$ , они начинают обжиматься (рис. 4).

Для определения силы обжатия найдем, при каком положении листа шпона он соприкасается в средней своей точке с основанием впадины.

Между стрелой прогиба листа  $f_1$  и уменьшением его длины  $l$ , т.е.  $\Delta$ , можно записать приближенную зависимость [3]

$$\Delta_1 = \frac{\pi^2 f_1^2}{4l}. \quad (19)$$

С другой стороны, как видно из рис. 4,

$$\Delta_1 = 2(H - f_1) \operatorname{tg} \alpha. \quad (20)$$

Подставляя уравнение (20) в уравнение (19), получим

$$2(H - f_1) \operatorname{tg} \alpha = \frac{\pi^2 f_1^2}{4l}. \quad (21)$$

Решая уравнение (21) относительно  $f_1$ , найдем

$$f_1 = \frac{4l \operatorname{tga} \left( \sqrt{1 + \frac{\pi^2 H}{2l \operatorname{tga}}} - 1 \right)}{\pi^2} \quad (22)$$

Таким образом, по формуле (22) можно определить, при каком зазоре  $f$  между краями листа и основанием впадины пресс-формы середина листа соприкоснется с основанием впадины. После этого начнется обжатие листа. Лист средним участком будет прилегать к основанию. В результате свободная длина на каждом конце станет равной  $l_1 = \frac{l}{4}$ , и лист может перейти в новую форму равновесия с тремя полуволнами (4). Это произойдет при критическом напряжении

$$\sigma_{\text{кр}}^* = \frac{16\pi D}{hl^2} \quad (23)$$

Сила обжатия при этом будет равна

$$R_1 = 2\sigma_{\text{кр}}^* hb \frac{f_1}{l_1} = \frac{8\sigma_{\text{кр}}^* hb}{l} f_1 \quad (24)$$

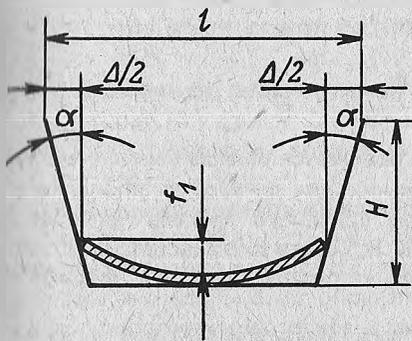


Рис. 4.

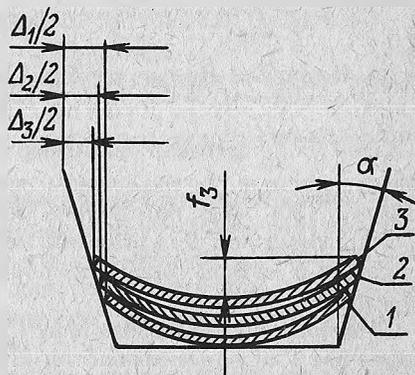


Рис. 5.

Переход листа шпона в новую форму равновесия с тремя полуволнами затруднен, так как при обжатии он будет соприкасаться с соседним листом и вызовет его обжатие. В результате дальнейшего прессования этот процесс будет распространяться на все листы шпона, потерявшие устойчивость.

Из рис. 5 видно, что уменьшение длины каждого последующего листа меньше, чем предыдущего, т.е.  $\Delta_1 > \Delta_2 > \Delta_3 > \Delta_4 > \dots > \Delta_{n+1}$ , соответственно и стрела прогиба каждого последующего листа будет меньше, чем предыдущего  $f_1 > f_2 > f_3 > \dots > f_n > f_{n+1}$ . Тогда для произвольного листа шпона п

$$\Delta_n = \frac{\pi^2 f_n^2}{4l} \quad (25)$$

с другой стороны, согласно рис. 4 и 5

$$\Delta_n = 2 [H - (n - 1) h - f_1] \operatorname{tga}. \quad (26)$$

Решая уравнения (25) и (26) совместно, получим

$$f_n = \frac{2\sqrt{2l[H - (n-1)h - f_1] \operatorname{tga}}}{\pi}. \quad (27)$$

Подставляя  $f_1$  согласно уравнению (22) в формулу (27), получим

$$f_n = \frac{2\sqrt{2l[H - (n-1)h - \frac{4l \operatorname{tga}(\sqrt{1 - \frac{\pi^2 H}{2l \operatorname{tga}})})}{\pi^2}] \operatorname{tga}}{\pi}. \quad (28)$$

Таким образом, сила обжатия  $n$ -го листа будет равна

$$R_n = 2 \sigma_{кр}^* h b \frac{f_n}{l_1} = 8 \frac{\sigma_{кр}^* h b}{l} f_n. \quad (29)$$

Сила, необходимая для обжатия всех  $m_2$  листов, потерявших устойчивость, определится формулой

$$R = \sum_{n=1}^{n=m_2} R_n = \frac{8 \sigma_{кр}^* h b}{l} \sum_{n=1}^{n=m_2} f_n. \quad (30)$$

Если  $\sigma_{кр}^*$  согласно уравнению (23) получается больше условного предела прочности в тангенциальном направлении для древесины шпона, то в формулу (30) надо подставлять значение условного предела прочности.

При суммарной силе обжатия, меньшей  $R$ , между листами шпона остается просвет и не будет происходить склеивания листов шпона, т.е. формирования изделия.

А теперь, просуммировав силу  $P_4$ , согласно формуле (18) и  $R$  согласно выражению (30) получим некоторую силу

$$P^* = P_4 + R, \quad (31)$$

необходимую для продвижения листов шпона одного клина в пресс-форме и удаления зазоров между листами.

К силе  $P^*$  следует прибавить еще некоторую силу  $R_1$ , обеспечивающую удельное давление на листы шпона и формирование изделия.

Тогда сила, необходимая для изготовления одного клина, будет равна

$$P = P^* + R_1. \quad (32)$$

Для изготовления  $n_1$  клиньев необходимо создать усилие

$$T = P n_1. \quad (33)$$

Проконтролировать эту силу по манометру пресса невозможно, так как прижим матрицы после перерезания пакета шпона и уплотнения его во впадины упираются в пуансон; усилие пресса будет расходоваться на их прижим, а не на уплотнение клина. Поэтому давление прессования клиньев должно регулироваться правильным набором количества листов шпона.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А.с. 651945 (СССР). Пресс-форма для изготовления изделий из шпона/А.Н.Минин, В.А.Хабаров, Г.С.Вахранев, П.В.Каршакевич и др. — Оpubл. в Б.И., 1979 № 10.
2. Вольмир А.С. Устойчивость деформируемых систем: — М.: Наука, 1967. — 314 с.
3. Беляев Н.М. Сопротивление материалов. — М.: Гостехтеориздат, 1958. — 316 с.
4. Федосьев В.И. Избранные задачи и вопросы по сопротивлению материалов. — М.: Наука, 1967. — 376 с.

УДК 674.817

Э.А.ГУЦО, инженер, А.Н.МИНИН, профессор,  
Н.З.ЗАХАРОВ, канд.техн.наук (БТИ)

### ВЛИЯНИЕ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ПРЕССОВАНИЯ НА СВОЙСТВА ПЛИТ ИЗ ОТХОДОВ ОКОРКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО СЫРЬЯ

Исследования, публикуемые в данной статье, являются частью работы, выполненной на кафедре клееных материалов и плит БТИ им. С.М.Кирова по разработке технологии получения плит из отходов окорки древесины сосны, ели, березы и осины.

Влияние продолжительности прессования на свойства плит изучали в диапазоне 0,2; 0,4; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0 мин/мм. Для установления и сравнения физико-механических свойств плит из отходов окорки древесины сосны, ели, березы и осины были определены: влажность, плотность, пределы прочности при статическом изгибе и растяжении перпендикулярно пласти плиты, водопоглощение и разбухание по толщине.

Математическая обработка результатов исследований проведена на ЭВМ "Мир-2" методом вариационной статистики. Результаты на каждый вид испытаний после их математической обработки приведены в виде средних арифметических величин.

По средним значениям физико-механических свойств плит определены показатели аппроксимирующих функций влияния продолжительности прессования на физико-механические свойства плит. По функциям, описывающим эти процессы, определены абсолютная и относительная ошибки и построены графики (рис. 1—3).

Из графиков видно, что продолжительность прессования плит оказывает существенное влияние на их свойства. Влажность плит, полученных из отходов окорки древесины сосны, ели, березы с увеличением продолжительности прессования от 0,2 до 2,0 мин/мм толщины плиты, уменьшается (рис. 1,а). Это можно объяснить тем, что с увеличением продолжительности