

УДК 630*532.5

РАСЧЁТ ДЕФОРМАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ДРЕВЕСИНЫ

О. А. Куницкая, И. В. Григорьев

ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный
лесотехнический университет им. С. М. Кирова»

Деформирование лесоматериалов зависят от условий размещения заготовок в пресс-формах, их начальной влажности W_0 , концентрации пропиточного раствора C и прироста его массы Q , способов создания давления P , температуры T , а также от формы и размеров инструментов прессования.

Основными показателями, влияющими на конечные свойства модифицированной древесины, являются: 1) скорость прессования $V_n = h / \tau$, где h - величина перемещения штампа за определенный интервал времени τ , обеспечивающая необходимую величину давления прессования P ; 2) температура сушки T ; 3) конечное время обработки t_k .

В качестве критерия эффективности технологических процессов принимают конечную плотность ρ образца (или его относительное уплотнение $\bar{\rho} = \rho / \rho_0$) при заданной его влажности W , т. е. степени \bar{W} необходимого обезвоживания. Величина ρ_0 зависит от плотности натуральной сухой древесины ρ_n , а также от W_0 , C и Q . В частности, по данным проф. В. А. Шамаева, для березы при $\rho_n = 550-570$ кг/м³ после их пропитки в 20-30 %-ных растворах карбамида и достижения влажности $W_0 = 40-50$ % величина $\rho_0 = 720-760$ кг/м³ [1].

Для достижения заданных показателей технологические параметры варьируют в широких интервалах: скорость прессования V_n - в диапазоне от 0,2 до 20 мм/мин и давление прессования P - от 0,5 до 2,5 МПа, температуру T - от 110 до 170°C, время обработки t_k - от 2 до 20 ч [1]. Такие границы интервалов обуславливают необходимость оптимизации этих параметров с целью достижения заданных показателей получения модифицированной древесины.

При прессовании от $h = 0$ до $h = 1,4$ мм наблюдается линейный характер поведения зависимостей $q_e(h)$ и $t_o(h)$ и в момент времени $\tau = 60$ с достигаются давление прессования $q_e = 1,506$ МПа, которое выдерживается постоянным в течение оптимального периода время обезвоживания $t_o = 543$ с. За этот период в слое h происходит уплотнение массива $\bar{\rho}$ и снижение его влажности W .

Анализ построенных логарифмических кривых свидетельствует о существовании двух участков - ветвей интенсивного и асимптотического затухания

показателей $\bar{\rho}$ и W , причем сопряжение этих ветвей происходит в момент времени $t \approx 3 \tau = 180-200$ с. Значит, за один цикл прессования ($N_u = 1$) в течение $t_0 = 543$ с относительное уплотнение достигает $\bar{\rho} = 1,085$, плотность древесины в пределах первого слоя $h = 1,4$ мм увеличивается с 760 до 825 кг/м³, а влажность уменьшилась с 50 до 49,15 %.

За пределами слоя h на некотором удалении $r \geq h$ давление прессования q_e вызывает в древесине действие вертикальных σ_r и тангенциальных σ_θ напряжений, равных:

$$\sigma_r = \frac{q_e}{(r/h)^n}, \quad \sigma_\theta = \mu \sigma_r. \quad (1)$$

Показатель степени n в формуле (1), обычно, принимают равным 2 при решении задачи Буссинеска, допуская, что напряжения затухают достаточно интенсивно с ростом расстояния r . Однако характер затухания напряжений для сред с внутренним трением, а к ним относится и древесина, лучше описывать коэффициентом n , равным:

$$n = \chi - \mu, \quad (2)$$

где $\chi = 3$ - для сферического фронта напряжений, $\chi = 2$ - для цилиндрического и $\chi = 1$ - для плоского.

Для оценки напряженно-деформированного состояния древесины под действием плоского штампа принимаем $n = 1 - \mu$. Для $\nu = 0,3$ и $\mu = 0,43$ величина $n = 0,57$, т. е. затухание плоского фронта напряжений в материале с удалением от поверхности пресса происходит достаточно медленно.

В соответствии с (1) при $n = 1 - \mu$ произведена оценка вертикальных напряжений σ_r , действующих в массиве древесины за пределами слоя h в направлении r , по мере изменения относительного расстояния $\bar{r} = r/h$ от 1 до 4. Анализ показал, что сжимающие напряжения даже на удалении от штампа на величину $\bar{r} = 4$ являются весьма существенными ($\sigma_r \approx 0,7$ МПа) и вносят существенный вклад в процесс прессования и обезвоживания древесины. Моделирование процесса прессования и обезвоживания древесины в поле высоких температур показало, что для обеспечения оптимальных условий процесса деформирования древесины необходимо, чтобы скорость прессования соответствовала уровню температур. Построенная зависимость V_n от T позволяет говорить о нелинейном росте скорости прессования с увеличением температуры обработки образца, причем наиболее интенсивный рост наблюдается при достижении уровня термообработки $T \geq 140^\circ\text{C}$.

На втором цикле обработки образца древесины ($N_u = 2$), выдерживая давление прессования постоянным и равным $q_\epsilon = 1,506$ МПа, математическая модель воспроизводит все вышеперечисленные операции и расчеты, однако учитывается то обстоятельство, что в пределах очередного слоя h массив был ранее подвержен общим деформациям ϵ от действия сжимающих напряжений σ_r , которые оказали дополнительное влияние на процесс модификации.

Основываясь на анализе напряженно-деформированного состояния массива в пределах следующего слоя h для исходных данных: $\bar{r} = 2$, $q_\epsilon = 1,506$ МПа и $\mu = 0,43$ по формуле (1) получим величину сжимающих напряжений $\sigma_r = 1,015$ МПа, которые по завершении первого цикла ($N_u = 1$) обуславливают действие дополнительных общих деформаций элемента массива $\Delta\epsilon = 0,0103$ и дополнительное уплотнение $\Delta\bar{\rho} = \Delta\epsilon + 1 = 1,01$. Суммарная величина относительного уплотнения второго слоя составит $\bar{\rho} = 1,085 + \Delta\epsilon = 1,095$.

Исследования прессования массива при последующих циклах позволили установить линейный характер поведения функции $\bar{\rho}(N_u)$:

$$\bar{\rho} = 1,075 + 0,01 N_u. \quad (3)$$

Аналогично, исследования по снижению влажности W очередного слоя массива по мере роста числа циклов N_u прессования и обезвоживания позволили получить зависимость:

$$W = 50 - 1,0224 \cdot N_u. \quad (4)$$

В частности, задавшись показателем конечной влажности древесины $W = 10$ %, с помощью (4) получим $N_u = 39$, что соответствует времени обработки образца $t_k = N_u t_0 = 39543 / 3600 = 5,9$ ч, после чего с помощью (3) оценим достигаемое уплотнение массива $\bar{\rho} = 1,465$ или его конечную плотность $\rho = 1113$ кг/м³. При необходимости обеспечить более низкие значения влажности, например $W = 5$ %, соотношения (3) и (4) дают следующие расчетные показатели: $N_u = 44$, $t_k = 6,6$ ч, $\bar{\rho} = 1,515$ или $\rho = 1152$ кг/м³.

Требование снижения конечной влажности лесоматериала в два раза (с 10 до 5 %) при прочих равных условиях и весьма близких (отличие менее 3,5 %) показателях его уплотнения обуславливает незначительное увеличение времени обработки (на 11,5-12 %). Результаты моделирования показали, что фактор температуры термообработки древесины с учетом взаимосвязи параметров T и V_n оказывает существенное влияние на величины t_0 и N_u .

Выявленные закономерности процессов прессования и обезвоживания, а также полученные корреляционные соотношения с достаточно высокими значениями коэффициента детерминации ($R^2 \geq 0,9$) позволили произвести расчет конечных технологических показателей при вариации W , $\bar{\rho}$ и T .

Статистическая обработка данных позволила установить уравнения линейной множественной регрессии:

$$t_{\kappa}(\bar{\rho}, W, T) = (k_1 W + k_2 \bar{\rho})(k_3 T + k_4), \quad (5)$$

$$\text{причем уплотнение } \bar{\rho} = k_5 T + k_6 W + k_7. \quad (6)$$

Для определения условного экстремума функции (5) вдоль поверхности связи (6) осуществлен поиск экстремума функции Лагранжа

$$L(\bar{\rho}, W, T, \lambda) = (k_1 W + k_2 \bar{\rho})(k_3 T + k_4) - \lambda(\bar{\rho} - k_5 T - k_6 W - k_7), \quad (7)$$

где λ – множитель Лагранжа.

Применительно к принятым условиям расчета значения коэффициентов k_i состав $k_1 = -0,561$; $k_2 = 7,98$; $k_3 = -0,0186$; $k_4 = -3,607$; $k_5 = 0,0032$; $k_6 = 0,0135$; $k_7 = 0,882$. Для оптимизации процесса, задавшись целевой функцией $t_{\kappa} \rightarrow \min$, приходим к решению системы уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial \bar{\rho}} = k_2(k_3 T + k_4) - \lambda = 0; \quad \frac{\partial L}{\partial W} = k_1(k_3 T + k_4) + \lambda k_6 = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial T} = \lambda k_5 + k_3(k_1 W + k_2 \bar{\rho}) = 0; \quad \frac{\partial L}{\partial \lambda} = k_5 T + k_6 W + k_7 - \bar{\rho} = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

при технологических ограничениях:

$$1,2 \leq \bar{\rho} \leq 1,8; \quad 2 \leq W \leq 12; \quad 110 \leq T \leq 170. \quad (9)$$

Точкой условного экстремума функции (5), для расчетных коэффициентов k_i , является точка $M_0(1,561; 10; 170)$, а требуемое время обработки образца составит $t_{\kappa} = 3,7$ ч. При этом достигается $\rho = 1186$ кг/м³ и ее $W = 10$ %.

Библиографический список

1 Шамаев, В. А. Физико-механическое модифицирование древесины. Воронеж : Изд-во ВГЛТА, 2003. - 260 с.