

РЕОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МОДИФИЦИРОВАННОЙ ДРЕВЕСИНЫ ПРИ СЖАТИИ*

При создании и получении новых композитных материалов важное значение имеет возможность получить расчетным путем характеристики композита, зависящие от свойств исходных компонентов.

Для древесины, модифицированной смолами, не проникающими в стенки клеток древесины, такие зависимости получены [1, 2] для модулей упругости в трех главных направлениях при кратковременном действии сжимающих нагрузок:

$$E_a^* = E_a + km_n E_H; \quad (1)$$

$$E_r^* = E_r + \frac{b_1 E_H E_r}{c_1 E_r + d_1 E_H}; \quad (2)$$

$$E_t^* = E_t + \frac{b_2 E_H E_t}{c_2 E_t + d_2 E_H}; \quad (3)$$

где E_a^* , E_r^* , E_t^* , E_a , E_r , E_t — модули упругости модифицированной и натуральной древесины вдоль волокон, радиальном и тангенциальном направлениях; E_H — модуль упругости наполнителя; k — коэффициент объемного заполнения пустот в древесине [3]; m_n — коэффициент пористости древесины;

$$b_1 = 2,63(1 - \eta_2)(1 - \sqrt{1 - k});$$

$$c_1 = (1 - \eta_1)(1,85 + 0,78\sqrt{1 - k});$$

$$d_1 = d_2 = 1,42 \eta_1 \eta_2;$$

$$b_2 = 2,63(1 - \eta_1)(1 - \sqrt{1 - k});$$

$$c_2 = (1 - \eta_2)(1,85 + 0,78\sqrt{1 - k}).$$

Здесь η_1 , η_2 — коэффициенты, определяющие части стенок клеток древесины, ориентированные соответственно в тангенциальном и радиальном направлениях [2].

Как показано в работе [4], деформации древесины во времени могут быть описаны уравнением

$$nE\dot{\epsilon} + H\epsilon = n\dot{\sigma} + \dot{\sigma}, \quad (4)$$

*В работе принимал участие канд.техн.наук Макаревич С.С.

где E — мгновенный модуль упругости; H — длительный модуль упругости; n — время релаксации.

Закон деформирования смолы ПН-1 с достаточной точностью тоже соответствует уравнению (4) [5].

Полагая, что в начальный момент деформация отсутствует, и применяя преобразование Лапласа—Карсона, из (4) получим

$$\varepsilon(p) = \frac{\sigma(p)}{E}, \quad (5)$$

где p — параметр преобразования; \bar{E} — изображение модуля упругости,

$$\bar{E} = \frac{nEp + H}{np + 1}. \quad (6)$$

В соответствии с этим модуль упругости модифицированной древесины вдоль волокон (?) может быть выражен через параметр преобразования следующим образом:

$$\bar{E}_a^* = \frac{n_a E_a p + H_a}{n_a p + 1} + km_n \frac{n_n E_n p + H_n}{n_n p + 1}. \quad (7)$$

Величина, обратная \bar{E}_a^* , которая нужна для формирования уравнения (5), имеет вид

$$\frac{1}{\bar{E}_a^*} = \frac{\lambda p^2 + \gamma p + \eta}{p^2 + \delta p + \varepsilon}, \quad (8)$$

где $\lambda = \frac{1}{E_a + km_n E_n}$; $\gamma = \frac{n_a + n_n}{n_a n_n (E_a + km_n E_n)}$;

$$\eta = \frac{1}{n_a n_n (E_a + km_n E_n)}$$
; $\varepsilon = \frac{H_a + km_n H_n}{n_a n_n (E_a + km_n E_n)}$;

$$\delta = \frac{n_a (E_a + km_n H_n) + n_n (H_a + km_n E_n)}{n_a n_n (E_a + km_n E_n)}.$$

Разложим выражение (8) на элементарные дроби:

$$\frac{1}{\bar{E}_a^*} = A + \frac{Bp}{p - r_1} + \frac{Cp}{p - r_2}, \quad (9)$$

где

$$A = \frac{F_1(0)}{F_2(0)} ; B = \frac{F_1(r_1)}{r_1 F_2'(r_1)} ; C = \frac{F_1(r_2)}{r_2 F_2'(r_2)}$$

$$F_1(p) = \lambda p^2 + \gamma p + \eta; \quad F_2(p) = p^2 + \delta p + \varepsilon$$

r_1, r_2 — корни уравнения $F_2(p) = 0$.

Тогда

$$A = \frac{\eta}{\varepsilon} = \frac{1}{H_a + km_n H_H};$$

$$B = \frac{\lambda r_1^2 + \gamma r_1 + \eta}{r_1(r_1 - r_2)}; \quad C = \frac{-(\lambda r_2^2 + \gamma r_2 + \eta)}{r_2(r_1 - r_2)}$$

Выражение (9) примет вид

$$\bar{E}_a^* = \frac{1}{H_a + km_n H_H} + \frac{(\lambda r_1^2 + \gamma r_1 + \eta) p}{r_1(r_1 - r_2)(p - r_1)} - \frac{(\lambda r_2^2 + \gamma r_2 + \eta) p}{r_2(r_1 - r_2)(p - r_2)}$$

Проведя обратное преобразование Лапласа—Карсона, получим

$$\frac{1}{E_a^*(t)} = \frac{1}{H_a + km_n H_H} + \frac{\lambda r_1^2 - \gamma r_1 - \eta}{r_1(r_1 - r_2)} e^{r_1 t} - \frac{\lambda r_2^2 + \gamma r_2 + \eta}{r_2(r_1 - r_2)} e^{r_2 t} \quad (10)$$

Сейчас можно записать закон деформирования модифицированной древесины с учетом реологических свойств натуральной древесины и наполнителя при постоянном сжимающем напряжении вдоль волокон

$$\varepsilon_a^*(t) = \frac{\sigma_a^*}{E_a^*(t)} = \sigma_a^* \left[\frac{1}{H_a + km_n H_H} + \frac{\lambda r_1^2 + \gamma r_1 + \eta}{r_1(r_1 - r_2)} e^{r_1 t} - \frac{\lambda r_2^2 + \gamma r_2 + \eta}{r_2(r_1 - r_2)} e^{r_2 t} \right] \quad (11)$$

Изображение модуля упругости модифицированной древесины в радиальном направлении получим, если в уравнение (2) подставим вместо E_r и E_H их изображения согласно (6).

$$\bar{E}_r^* = \frac{n_r E_r p + H_r}{n_r p + 1} + \frac{b_1 \frac{(n_H E_H p + H_H)(n_r E_r p + H_r)}{(n_H p + 1)(n_r p + 1)}}{c_1 \frac{n_r E_r p + H_r}{n_r p + 1} + d_1 \frac{n_H E_H p + H_H}{n_H p + 1}} \quad (12)$$

После преобразований выражение, обратное \bar{E}_r^* , можно записать в виде

$$\frac{1}{E_r^*} = \frac{\lambda_1 p^3 + \varepsilon_1 p^2 + \mu_1 p + \eta_1}{a_1 p^3 + \beta_1 p^2 + \gamma_1 p + \delta_1} = \frac{Q_1(p)}{Q_2(p)} \quad (13)$$

где

$$a_1 = n_r^2 n_H E_r (c_1 E_r + f_1 E_H); \quad f_1 = b_1 + d_1;$$

$$\begin{aligned}
\beta_1 &= n_r (2c_1 n_H E_r H_r + c_1 n_r E_r^2 + f_1 n_r E_r H_H + f_1 n_H E_H E_r + f_1 n_H E_H H_r); \\
\gamma_1 &= c_1 n_H H_r^2 + 2c_1 n_r E_r H_r + f_1 n_r H_r H_H + f_1 n_r E_r H_H + f_1 n_H E_H H_r; \\
\delta_1 &= H_r (c_1 H_r + f_1 H_H); \quad \lambda_1 = n_r^2 n_H (c_1 E_r + d_1 E_H); \\
\alpha_1 &= n_r (c_1 n_H E_r + c_1 n_r E_r + c_1 n_H H_r + d_1 n_r H_H + 2d_1 n_H E_H); \\
\mu_1 &= c_1 n_r H_r + c_1 n_r E_r + c_1 n_H H_r + 2d_1 n_r H_H + d_1 n_r n_H E_H; \\
\eta_1 &= c_1 H_r + d_1 H_H.
\end{aligned}$$

Разложим выражение (13) на элементарные дроби

$$\frac{1}{E_r^*} = A_1 + \frac{B_1 p}{p - r_1} + \frac{C_1 r}{p - r_2} + \frac{D_1 p}{p - r_3} \quad (14)$$

где

$$\begin{aligned}
A_1 &= \frac{Q_1(0)}{Q_2(0)}; \quad B_1 = \frac{Q_1(r_1)}{r_1 Q_2'(r_1)}; \\
C_1 &= \frac{Q_1(r_2)}{r_2 Q_2'(r_2)}; \quad D_1 = \frac{Q_1(r_3)}{r_3 Q_2'(r_3)}.
\end{aligned}$$

r_1, r_2, r_3 — корни уравнения $Q_2(p) = 0$.

Применив к уравнению (14) обратное преобразование Лапласа—Карсона, получим выражение податливости модифицированной древесины при сжатии в радиальном направлении

$$\frac{1}{E_r^*(t)} = A_1 + B_1 e^{r_1 t} + C_1 e^{r_2 t} + D_1 e^{r_3 t} \quad (15)$$

Закон деформирования модифицированной древесины с учетом реологических свойств натуральной древесины и наполнителя при постоянном сжимающем напряжении в радиальном направлении имеет вид

$$\epsilon_r^*(t) = \frac{\sigma_r}{E_r^*(t)} = \sigma_r (A_1 + B_1 e^{r_1 t} + C_1 e^{r_2 t} + D_1 e^{r_3 t}). \quad (16)$$

Аналогично можно получить выражение податливости и закон деформирования модифицированной древесины при сжатии в тангенциальном направлении.

Из выведенных зависимостей следуют выражения длительных модулей упругости модифицированной древесины в трех главных направлениях через характеристики исходных компонентов.

Из уравнения (10) получим, что при $t \rightarrow \infty$

$$\frac{1}{E_a^*(t)} = \frac{1}{E_a^*(\infty)} = \frac{1}{H_a^*} = \frac{1}{H_a + km_{\Pi}H_H} \quad (17)$$

Два других слагаемых уравнения (10) при $t \rightarrow \infty$ стремятся к нулю, так как r_1 и r_2 , как показывают расчеты, являются отрицательными числами.

Значит, длительный модуль упругости модифицированной древесины при сжатии вдоль волокон

$$H_a^* = H_a + km_{\Pi}H_H \quad (18)$$

Из уравнения (15) при $t \rightarrow \infty$ получим

$$\begin{aligned} \frac{1}{E_r^*(t)} &= \frac{1}{E_r^*(\infty)} = \frac{1}{H_r^*} = A_1 = \frac{Q_1(0)}{Q_2(0)} = \frac{\eta_1}{\delta_1} = \\ &= \frac{c_1H_r + d_1H_H}{H_r(c_1H_r + f_1H_H)} = \frac{c_1H_r + d_1H_H}{H_r(c_1H_r + b_1H_H + d_1H_H)} \end{aligned} \quad (19)$$

Отсюда длительный модуль упругости модифицированной древесины при сжатии в радиальном направлении равен

$$H_r^* = \frac{H_r(c_1H_r + b_1H_H + d_1H_H)}{c_1H_r + d_1H_H} = H_r + \frac{b_1H_rH_H}{c_1H_r + d_1H_H} \quad (20)$$

Выражение для длительного модуля упругости модифицированной древесины в тангенциальном направлении можно получить, проделав выкладки, аналогичные сделанным для радиального направления. При этом он окажется равным

$$H_t^* = H_t + \frac{b_2H_tH_H}{c_2H_t + d_2H_H} \quad (21)$$

При $t > 0$ уравнения (10) и (15) дают выражения мгновенных модулей упругости модифицированной древесины соответственно в продольном и радиальном направлениях.

Для определения времени релаксации модифицированной древесины при сжатии вдоль волокон поступаем следующим образом. Из уравнения (4) находим деформацию при $\sigma = \text{const}$:

$$\varepsilon^*(t) = \sigma \left[\frac{1}{H_a^*} + \left(\frac{1}{E_a^*} - \frac{1}{H_a^*} \right) \exp \left(- \frac{H_a^* t}{E_a^* \eta_a^*} \right) \right] \quad (22)$$

В некоторый момент времени $t_1 = \eta_a^* E_a^* / H_a^*$ деформация равна

$$\varepsilon^*(t_1) = \frac{\sigma}{E_a^*} + 0,632 \left(\frac{\sigma}{H_a^*} - \frac{\sigma}{E_a^*} \right) \quad (23)$$

Приравняв эту деформацию к деформации за время t_1 , вычисленной по формуле (11), получим равенство, представляющее собой трансцендентное уравнение

$$\frac{1}{E_a^*} + 0,632 \left(\frac{1}{H_a^*} - \frac{1}{E_a^*} \right) = A + B e^{r_1 t_1} + C e^{r_2 t_1} \quad (24)$$

В нем содержится одно неизвестное t_1 , которое можно найти путем графического отделения корней уравнения (24). После этого определяется время релаксации

$$n_a^* = \frac{H_a^* t_1}{E_a^*} \quad (25)$$

По такой же методике можно вычислить времена релаксации модифицированной древесины при сжатии ее в радиальном и тангенциальном направлениях.

Таким образом, пользуясь приведенными зависимостями, можно планировать получение модифицированной древесины с заранее заданными реологическими характеристиками.

ЛИТЕРАТУРА

1. Макаревич С.С., Любецкий Д.И. Определение модуля упругости модифицированной древесины при сжатии. — В сб.: Модификация древесины синтетическими полимерами. Минск, 1973, с. 128—136.
2. Макаревич С.С., Хвесько Г.М. Анизотропия модуля упругости при сжатии модифицированной древесины. — В сб.: Механическая технология древесины: Минск: Вышэйшая школа, 1977, вып. 7, с. 116—119.
3. Хвесько Г.М. К вопросу об оценке количества наполнителя в модифицированной древесине. — В сб.: Механическая технология древесины. Минск: Вышэйшая школа, вып. 12; с. 84—87.
4. Уголев Б.Н. Деформативность древесины и напряжения при сушке. — М.: Лесная пром-сть, 1971. — 174 с.
5. Тарнопольский Ю.М., Скудра А.М. Конструкционная прочность и деформативность стеклопластиков. — Рига: Зинатне, 1966. — 260 с.

УДК 674.04

Г.М.ШУТОВ, канд.техн.наук,
В.С.БОЛТОВСКИЙ, канд.хим.наук,
М.Э.ЭРДМАН, ст.науч.сотр.,
Д.И.ЛЮБЕЦКИЙ, канд.техн.наук (БТИ)

К ВОПРОСУ О ВЛИЯНИИ ДЕЙСТВИЯ РАЗЛИЧНЫХ АГРЕССИВНЫХ СРЕД И ТЕМПЕРАТУРНО-ВЛАЖНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ НА СВОЙСТВА МОДИФИЦИРОВАННОЙ ДРЕВЕСИНЫ

Эффективной защитой древесины от воздействия различных разрушающих факторов является способ модифицирования ее синтетическими полимерами [1—3]. Известно, что синтетические полимерные соединения заметно