ЛИТЕРАТУРА

1. Макаревич С.С., Любецкий Д.И. Определение модуля упругости модифицированной древесины при сжатии. – В сб.: Модификация древесины синтетическими полимерами. Минск: Вышэйшая школа, 1973, с. 128-137.

УДК 674.048

С.С.Макаревич, канд. техн. наук (БТИ им. С.М.Кирова)

ТЕМПЕРАТУРНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ, ВОЗНИКАЮЩИЕ В ДРЕВЕСИНЕ В ПРОЦЕССЕ МОДИФИКАЦИИ ЕЕ ТЕРМОХИМИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

При модификации древесины термохимическим методом после пропитки ее полимером производится термообработка. Температура постепенно доводится до 120^0С. При этой температуре происходит отверждение полимера, введенного в древесину. В дальнейшем полимер и древесинное вещество стенок клеток работают совместно. Так как коэффициенты линейного расширения у полимеров значительно больше, чем у древесины, то при падении температуры будут возникать напряжения в полимерном слое и древесине. Так, для древесины берёзы коэффициенты линейного расширения равны [1]: в продольном направлении $\alpha_a = 2{,}5\cdot10^{-6}$, в радиальном – $\alpha_r = 27{,}2\cdot10^{-6}$, в тангенциальном $\alpha_t = 30\cdot10^{-6}$. Для смолы ПН-1 коэффициент линейного расширения равен $\alpha_n = (70\text{–}100)\cdot10^{-6}$ [2].

Для определения температурных напряжений, возникающих в модифицированной древесине, примем модель, представляющую собой трубки из древесинного вещества, покрытые внутри полимерным слоем.

Напряжения в продольном направлении. Статическая сторона задачи запишется уравнением

$$\sigma_a F_a + \sigma_n F_n = 0, \qquad (1)$$

где σ_a, σ_n – напряжения в древесине и полимере; F_a, F_n – площади поперечного сечения натуральной древесины и полимера.

Учитывая, что при модификации термохимическим методом размеры древесины меняются незначительно, можно принять

$$F_a = F; \quad F_n = km_n F, \qquad (2)$$

где F – площадь поперечного сечения модифицированной древесины; m_n – пористость древесины; k – коэффициент объемного заполнения пустот древесины полимером [3].

Подставляя значения F_a и F_n в уравнение (1) и сокращая на F, получим

$$\sigma_a + \sigma_n k m_n = 0. \quad (3)$$

Уравнение совместности деформаций будет иметь вид

$$\varepsilon_a = \varepsilon_n, \quad (4)$$

где ε_a – продольная деформация древесины; ε_n – деформация полимера.

Деформации с учетом возникающих напряжений и изменения температуры определяются следующим образом:

$$\left.\begin{aligned} \varepsilon_a &= \frac{\sigma_a}{E_a} + \alpha_a (T - T_0); \\ \varepsilon_n &= \frac{\sigma_n}{E_a} + \alpha_n (T - T_0), \end{aligned}\right| \quad (5)$$

где E_a, E_n – модули упругости древесины вдоль волокон и полимера; T_0 – начальная температура; T – конечная температура.

Решая совместно уравнения (3)–(5), найдем напряжения в древесине и полимере:

$$\sigma_a = \frac{E_a E_n k m_n (\alpha_n - \alpha_a)(T - T_0)}{E_a + E_n k m_n}; \quad (6)$$

$$\sigma_n = \frac{E_a E_n (\alpha_n - \alpha_a)(T - T_0)}{E_a + E_n k m_n}. \quad (7)$$

Напряжения в поперечном направлении. Согласно принятой модели, при определении температурных напряжений в поперечном направлении модифицированную древесину можно считать состоящей из множества составных толстостенных цилиндров разного диаметра. Внутренний радиус древесных сосудов (трубок) обозначим R, наружный радиус обозначим R_1. Внутренние стенки сосуда выстилает полимер толщиной δ_1, а поэтому внутренний радиус полимерной трубки $R_2 = R - \delta_1$.

При изменении температуры на границе (полимер – древесина) возникает давление p, направленное по радиусу в каждом сосуде (трубке). Вследствие этого от давлений p границу R_1 можно считать неподвижной.

В общем случае при расчете толстостенных цилиндров [4] перемещение по радиусу определяется уравнением

$$u = C_1 \rho + \frac{C_2}{\rho}, \tag{8}$$

а тангенциальное и радиальное по отношению к сосуду напряжения следующими уравнениями:

$$\sigma_\theta = \frac{E_\theta}{1 - \mu_{\theta\rho}\mu_{\rho\theta}}\left[C_1(1 + \mu_{\rho\theta}) + \frac{C_2}{\rho^2}(1 - \mu_{\rho\theta})\right]; \tag{9}$$

$$\sigma_\rho = \frac{E_\rho}{1 - \mu_{\theta\rho}\mu_{\rho\theta}}\left[C_1(1 + \mu_{\theta\rho}) - \frac{C_2}{\rho^2}(1 - \mu_{\theta\rho})\right]; \tag{10}$$

где C_1, C_2 – постоянные, определяемые из граничных условий; μ – коэффициент Пуассона; E – модуль упругости; ρ – переменный радиус.

Будем считать, что температура возрастает, а коэффициент линейного расширения полимера α_n больше, чем коэффициент линейного расширения древесины поперек волокон α_ρ. В этом случае граничными условиями для древесного сосуда будут: при $\rho = R$ $\sigma_\rho = -p$, при $\rho = R_1$ $u = 0$. Подставляя эти условия в уравнения (8) и (10), найдем

$$C_{1д} = -\frac{pR^2(1 - \mu_{\theta\rho}\mu_{\rho\theta})}{E_\rho\left[R^2 + R_1^2 - \mu_{\theta\rho}(R_1^2 - R^2)\right]}; \tag{11}$$

$$C_{2д} = \frac{pR^2R_1^2(1 - \mu_{\theta\rho}\mu_{\rho\theta})}{E_\rho\left[R^2 + R_1^2 - \mu_{\theta\rho}(R^2 - R^2)\right]}. \tag{12}$$

Здесь E_ρ, E_θ, $\mu_{\theta\rho}$ и $\mu_{\rho\theta}$ можно определить через упругие постоянные древесины в радиальном и тангенциальном направлениях.

Для полимерной трубки граничные условия запишутся следующим образом: при $\rho = R$ $\sigma_\rho = -p$, при $\rho = R_2$ $\sigma_\rho = 0$. Из уравнения (10), учитывая, что для полимера $E_\theta = E_\rho = E_n$ и $\mu_{\theta\rho} = \mu_{\rho\theta} = \mu_n$, при данных граничных условиях получим:

$$C_{1n} = -\frac{pR^2(1 - \mu_n)}{E_n(R^2 - R_2^2)}; \tag{13}$$

$$C_{2n} = -\frac{pR^2R_2^2(1 + \mu_n)}{E_n(R^2 - R_2^2)}. \tag{14}$$

Подставляя значения $C_{1д}$ и $C_{2д}$ в уравнение (8) вместо C_1 и C_2, получим формулу для определения перемещений в древесной стенке $u_д$, возникающих от давления p. Заменяя C_1 и C_2 в формуле (8) на C_{1n} и C_{2n}, найдем перемещение в полимерном слое u_n.

На границе полимерного и древесного слоев, т. е. при $\rho = R$, разность перемещений от давления p будет равна разности перемещений слоев от изменения температуры

$$u_д - u_n = (\alpha_n - \alpha_\rho)(T - T_0), \tag{15}$$

где α_ρ – коэффициент линейного расширения древесины в направлении ρ. Он может быть выражен через α_r и α_t. Из уравнения (15) можно определить давление между слоями, возникающее в модифицированной древесине при изменении температуры

$$p = \frac{(\alpha_n - \alpha_\rho)(T - T_0)}{\dfrac{(1-\mu_n)R^2 + (1+\mu_n)R_2^2}{E_n(R^2 - R_2^2)} + \dfrac{(1-\mu_{\theta\rho}\mu_{\rho\theta})(R_1^2 - R^2)}{E_\rho[R^2 + R_1^2 - \mu_{\theta\rho}(R_1^2 - R^2)]}}. \tag{16}$$

Подставляя выражения (16), (11) и (12) в (9) и (10), получим напряжения в древесине, а подставляя (16), (13) и (14) в (9) и (10), получим напряжения в полимерном слое. Если считать, что полимер заполняет пустоты пропорционально их объему, то толщину полимерной трубки δ_1 можно выразить через коэффициент k, т. е.

$$\delta_1 = R(1 - \sqrt{1 - k}). \tag{17}$$

Тогда внутренний радиус полимерного слоя будет равен

$$R_2 = R - \delta_1 = R\sqrt{1 - k}. \tag{18}$$

Таким образом, заменяя в приведенных формулах R_2 выражением (18), получим формулы для определения напряжений в модифицированной древесине с любым объемным заполнением пустот полимером.

При пропитке березы смолой ПН-1 будем иметь следующие данные [1], [3]: $E_a = 19{,}6 \cdot 10^3$ МПа, $E_r = 1{,}134 \cdot 10^3$ МПа, $E_t = 0{,}676 \cdot 10^3$ МПа, $\mu_{tr} = 0{,}38$, $\mu_{rt} = 0{,}78$, $E_n = 2{,}6 \cdot 10^3$ МПа, $\mu_n = 0{,}35$, $R_1 = 9{,}5$ мкм, $R = 6{,}5$ мкм, $k = 0{,}85$, $T_0 = 120^0$C, $T = 20^0$C.

При этих данных напряжения окажутся следующими: $\sigma_a = -10{,}4$ МПа, $\sigma_\rho = 10{,}8$ МПа, $\sigma_n = 20$ МПа. Учитывая, что для березы предел прочности при растяжении поперек волокон [1] в радиальном направлении $\sigma_{в(r)}$ = 11 МПа, в тангенциальном направлении $\sigma_{в(t)}$ = 6,5 МПа, температурные напряжения могут оказаться опасными. При быстром охлаждении после полимеризации в модифицированной древесине появятся трещины. При медленном охлаждении напряжения будут уменьшаться вследствие релаксации, трещины наблюдаться не будут, но некоторые остаточные напряжения сохранятся.

ЛИТЕРАТУРА

1. Уголев Б.Н. Древесиноведение с основами лесного товароведения. – М.: Лесная промышленность, 1975. – 384 с. 2. Тарнопольский Ю.М., Скудра А.М. Конструкционная прочность и деформативность стеклопластиков. – Рига: Зинатне, 1966. – 260 с. 3. Макаревич С.С. Любецкий Д.И. Определение модуля упругости модифицированной древесины при сжатии. – В кн.: Модификация древесины синтетическими полимерами. Минск, 1973, с. 128–137. 4. Безухов Н.И. Основы теории упругости, пластичности и ползучести. – М.: Высшая школа, 1968. – 512 с.

УДК 674.048

Г.М.Хвесько, канд. техн. наук (БТИ им. С.М.Кирова)

К ВОПРОСУ ОБ ОЦЕНКЕ КОЛИЧЕСТВА НАПОЛНИТЕЛЯ В МОДИФИЦИРОВАННОЙ ДРЕВЕСИНЕ

Физико-механические свойства модифицированной древесины в значительной мере зависят от количества введенного в древесину наполнителя.

Содержание наполнителя в древесине после окончания процесса модификации в настоящее время оценивается различными показателями. Например, в работе [1] для этого используется процентное содержание полимера, определяемое по формуле

$$S_п = \frac{\rho_{о м} - \rho_о}{\rho_с} 100, \qquad (1)$$

где $\rho_{о м}$, $\rho_о$ – плотность модифицированной и натуральной древесины в абсолютно сухом состоянии.

За оценочный показатель содержания наполнителя в древесине в работе [2] принимается степень наполнения ($V_н$), выражающая отношение веса наполнителя в древесине к весу наполненной древесины: