

## ПОГЛОЩЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКА БИОПОЛИМЕРНЫМИ СИСТЕМАМИ

© 2012 г. В.В. ПОСТНИКОВ, Н.С. КАМАЛОВА, В.В. САУШКИН

Воронежская государственная лесотехническая академия  
E-mail: vvpost@icmail.ru

Типичным представителем биополимерных систем является натуральная древесина. В модифицированном (уплотненном) виде этот биокомпозит имеет столь высокие прочностные характеристики, что его с успехом используют в промышленности в качестве заменителя целого ряда конструкционных материалов [1]. В упрощенном виде древесину можно моделировать как пористую структуру, стенки которой состоят из частично кристаллической целлюлозы, как бы «растворенной» в аморфном лигнине. В обычных условиях лигнин находится в стеклообразном состоянии, поэтому для успешного (без разрушений) уплотнения древесного образца необходимо предварительно «размягчить» лигнин, то есть каким-либо способом перевести его в вязкотекучее состояние. Чаще всего эта задача решается химическими способами (обработкой аммиаком в присутствии воды, карбоксидными кислотами и т.д.). Однако такие методы ведут к частичному разрушению фибрилл целлюлозы, что, в свою очередь, негативно влияет на физические характеристики уплотненной древесины. Исследования последних лет показали возможность размягчения лигнина обработкой образцов ультразвуком [2].

При такой обработке возможны два механизма поглощения ультразвука. Во-первых, этот процесс может происходить за счет возникновения механического трения на границе ультразвукового датчика (наконечника) и поверхности образца. Если обозначить через  $F_N$  среднюю силу нормального давления ультразвукового наконечника на стенку образца ( $F_N = p_{\max} S \cos(2\pi ft)$ , где  $p_{\max}$  – амплитуда давления ультразвука,  $S$  – площадь контакта,  $f$  – частота ультразвука), то мощность поглощения ультразвука можно оценить по формуле [3]:

$$q_1 = \frac{d}{dt} (\mu p_{\max} S \delta \cos 2\pi ft). \quad (1)$$

Здесь  $\delta$  – величина проскальзывания наконечника по поверхности образца,  $\mu$  – коэффициент трения.

После дифференцирования и усреднения выражение (1) можно привести к виду:

$$q_1 = 2\pi \mu f p_{\max} S \delta / 2 = \mu P_y \delta / \xi_0, \quad (2)$$

где  $P_y$  – мощность ультразвука,  $\xi_0$  – амплитуда колебаний на границе ультразвукового датчика (наконечника). Можно предположить, что  $\delta / \xi_0 = \sin \varphi \approx \varphi$  – углу отклонения наконечника от вертикали к поверхности образца, тогда (2) преобразуется к виду:

$$q_1 = \mu P_y \varphi. \quad (3)$$

Из-за диссипативности силы трения вся эта мощность, скорее всего, затрачивается на нагревание приконтактной области образца.

Вторым механизмом поглощения является возникающее в результате ультразвукового воздействия вязкое трение в средней части клеточной стенки, которая, как

известно [1], состоит, в основном, из лигнина. Мощность этого процесса можно оценить соотношением [3]:

$$q_2 = \langle \varepsilon \partial F_{\text{вяз}} / \partial t \rangle = \pi f \eta S 2 \pi f \xi_0 \varepsilon / 2l = \pi f \eta P_y \varepsilon / p_{\text{max}} l. \quad (4)$$

Здесь  $F_{\text{вяз}} \approx \eta S \frac{V}{l}$  – сила вязкого трения ( $\eta$  – коэффициент вязкости лигнина,

$V/l$  – градиент скорости молекул лигнина вдоль толщины стенки,  $S$  – площадь контакта образца и наконечника),  $\varepsilon$  – глубина проникновения ультразвука в лигнин.

Поскольку  $V \approx V_{\text{max}}/2 = 2\pi f \xi_0/2$ , где  $\xi_0$  – амплитуда смещения молекул вследствие воздействия ультразвука, а мощность ультразвука можно оценить, как  $P_y = 2\pi f p_{\text{max}}/2$ , выражение (4) можно привести к виду:

$$q_2 = \pi f \eta S 2 \pi f \xi_0 \varepsilon / 2l = \pi f \eta P_y \varepsilon / p_{\text{max}} l. \quad (5)$$

Из соотношений (5) и (3) следует, что слои стеклообразного лигнина с внешней стороны стенки будут поглощать мощность в единицу времени, определяемую выражением:

$$Q_1 = q_1 + q_2 = q_1(1 + A_{\mu\eta}), \quad (6)$$

(где  $A_{\mu\eta} = q_2/q_1$ ), а слои лигнина внутренней стороны стенки будут поглощать мощность:

$$Q_2 = q_2 = A_{\mu\eta} q_1. \quad (7)$$

Для того, чтобы лигнин начал «плавиться», его необходимо нагреть до температуры плавления, то есть при этом:

$$q_2 \Delta t \geq C_{\text{л}} \rho_{\text{л}} h_{\text{л}} \Delta T S. \quad (8)$$

Здесь  $C_{\text{л}}$  – удельная теплоемкость лигнина,  $\rho_{\text{л}}$  – его плотность,  $h_{\text{л}}$  – толщина слоя лигнина  $\Delta T = T - T_{\text{к}}$  – разность температуры плавления лигнина и комнатной температуры,  $\Delta t$  – время обработки, а  $S$  – площадь контакта датчика с поверхностью образца. С учетом (3) и (7) для минимального времени обработки образца ультразвуком можно получить оценочное выражение:

$$\Delta t = \frac{C_{\text{л}} \rho_{\text{л}} h_{\text{л}} \Delta T}{A_{\mu\eta} \mu \phi I_y}. \quad (9)$$

Здесь  $I_y$  – мощность потока ультразвука, рекомендованная при обработке.

Как следует из приведенных соотношений, внутри древесного образца при обработке ультразвуком имеет место существенная неоднородность распределения тепловой мощности, что подтверждается экспериментально – при увеличении мощности ультразвука выше некоторой пороговой наблюдалось обугливание поверхности образца.

Кроме того, полученные формулы позволяют разрабатывать методики оценки глубины проникновения ультразвука в биополимерные системы с наполнителями биологического происхождения, а также рассчитывать степень ультразвукового воздействия через долю потребляемой образцами мощности на состояние наполнителя.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шамаев В.А. Химико-механическое модифицирование древесины. Воронеж: ВГЛТА. – 2003. – 260 с.
2. Постников В.В., Камалова Н.С., Кальченко С.В. Ультразвуковая пластификация лигнина в модифицированной древесине / Известия РАН. Серия физическая. – 2010, т. 74, № 9, с. 1375-1376.
3. Физические основы ультразвуковой технологии / Сборник статей под ред. Розенберга Л.Д. – М: Наука, 1970. – 688 с.