

УДК 691.3

Д.А. ПЛУГИН

Украинская государственная академия железнодорожного транспорта, г. Харьков

МЕХАНИЗМ УСУШКИ И НАБУХАНИЯ ДРЕВЕСИНЫ

Выполнены теоретические и экспериментальные исследования, в результате которых усовершенствованы представления о механизме трещинообразования древесины хвойных пород, в частности, сосны при ее интенсивной усушке, получены соответствующие математические выражения. В основу рассмотрения положены коллоидно-химические представления о деформациях и напряжениях на уровне клеточного строения древесины (микроуровень).

Схема и математическая модель усушки и набухания древесины. Древесина быстро разрушается из-за трещинообразования в открытых условиях ее хранения и эксплуатации. Продление срока службы древесины может стать мощным фактором экономики строительной и других отраслей.

На основании анализа литературных данных и опыта эксплуатации нами был сделан вывод о недостаточности существующих теоретических положений для разработки реальных мер по предотвращению трещинообразования древесины в указанных условиях.

Согласно классификации коллоидных систем, растворы высокомолекулярных соединений (ВМС) или полимеров, к которым относятся и основная составляющая древесины – целлюлоза, хотя и не являются коллоидными в точном смысле этого слова, имеют сходство с ними по ряду свойств и могут рассматриваться (исследоваться), исходя из одних и тех же законов [1].

Как известно, главными составляющими сосновой древесины, определяющими ее строительно-технические свойства, являются целлюлозные волокна и лигнин, образующие, соответственно, целлюлозные стенки трахеид и лигниновые прослойки между ними.

Высокую прочность древесины сосны в продольном направлении волокон (115 МПа) и при изгибе (79 МПа) [2] определяют продольно ориентированные тонкие высокопрочные волокна целлюлозы, слагающие стенки трахеид. Лигнин выполняет функции склеивающего вещества, обеспечивает прочность древесины при растяжении поперек волокон и при скалывании (6-12 МПа).

Одноименные отрицательные поверхностные заряды волокон целлюлозы приводят к их отталкиванию и набуханию древесины, возникновению напряжений в прослойках лигнина и, в конечном итоге, к трещинообразованию.

Величину усушки древесины, обусловленную, как известно, из-

менением содержания воды в стенках трахеид, в тангенциальном направлении можно определить по формуле

$$U_c = \frac{\Delta \delta_B^{\text{Ц}}}{d^{\text{Ц}}} \cdot (1 - \Pi_{\text{УС}}^{\text{ДР}}) \cdot 100\% \quad (1)$$

В свою очередь величину $\Delta \delta_B^{\text{Ц}}$ можно определить по изменению влажности (например, ее уменьшение, вызванное испарением $W_{\text{исп}}$, от максимальной гигроскопической $W_{\text{Ф-Х}}$, и удельной поверхности целлюлозы. Примем для этого в качестве модели волокна целлюлозы цилиндр диаметром $d^{\text{Ц}}$ длиной $L^{\text{Ц}}$ с соотношением $L_{\text{Ц}} \gg D^{\text{Ц}}$ (рис.1, а).

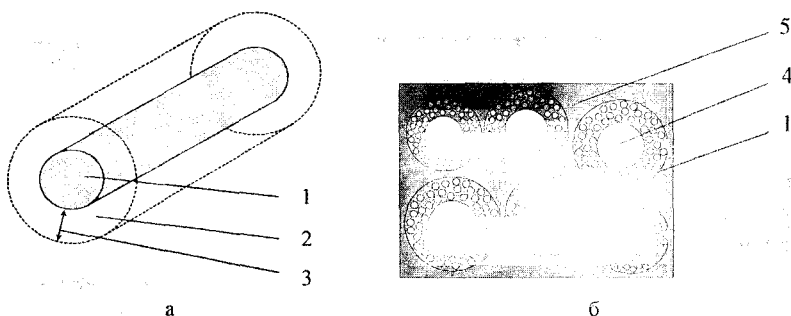


Рис.1 – Влияние толщины слоя воды, связанного волокнами целлюлозы, на деформации усадки и набухания стенок трахеид; а – слой физико-химически связанной воды на поверхности волокна целлюлозы; б – трахеиды в древесине: 1 – волокно целлюлозы; 2 – слой физико-химически связанной воды; 3 – толщина слоя воды на поверхности волокна целлюлозы $d^{\text{Ц}}$, 4 – люмен, 5 – лигнин.

При этом толщина слоя воды на волокне целлюлозы равна

$$\delta_B^{\text{Ц}} = \frac{W_{\text{Ф-Х}} \cdot d^{\text{Ц}} \cdot \rho^{\text{Ц}}}{4 \cdot \gamma^{\text{Ц}}}, \quad (2)$$

где $d^{\text{Ц}}$ – диаметр волокна целлюлозы, м; $\gamma^{\text{Ц}}$ – содержание целлюлозы в древесине по массе.

Расчет по формуле (2) показывает, что предельная толщина прослойки воды между волокнами целлюлозы $(\delta_B^{\text{Ц}})_{\text{max}}$ при усадке и набухании древесины в пределах колебаний гигроскопической влажности (0-30%) составляет 0,6-2,2 нм.

Величину усушки древесины можно представить выражением

$$U_c = \frac{W_{yc} \cdot d^{II} \cdot \rho^{II}}{4 \cdot \gamma^{II} d^{II}} (1 - \Pi_{yc}^{DP}) \cdot 100\% = \frac{W_{yc} \cdot \rho^{II}}{4 \cdot \gamma^{II}} (1 - \Pi_{yc}^{DP}) \cdot 100\% \quad (3)$$

По данным наших исследований, пустотность сосновой древесины равна $\Pi_{уст}^{dp} = 0,68$, $\gamma^{II} \approx 0,8$, $\rho^{dp} = \rho^y = 1,59$ г/см³. Средняя плотность древесины согласно [2] равна $\rho_{cp}^{dp} = 0,5$ г/см³. Подставляя эти данные в (3), получим зависимость между U_c и W_{yc} , графическое изображение которой представлено на рис.2.



Рис.2 – Зависимость толщины слоя воды на волокнах целлюлозы δ'_e от уменьшения влажности древесины от испарения $W_{исп}$

График на рис.2 соответствует графику, представленному в [2], что свидетельствует о корректности предложенной схемы и математической модели удаления (испарения) воды при сушке древесины, а также ее деформаций усушки.

Исходя из этой схемы и математической модели, рассмотрим механизм возникновения трещин в деревянных конструкциях (в шпалах и брусках в том числе) при их сушке в производственных и эксплуатационных условиях.

Механизм трещинообразования деревянных шпал и брусков при сушке древесины. Трещинообразование в древесине является процессом нарушения устойчивости дисперсной капиллярно-волокнистой структуры, который осуществляется под влиянием электростатической, молекулярной и структурной составляющих расклинивающего давления

$$\Pi = \Pi_{эс} - \Pi_{мол} - \Pi_{стр},$$

где $P_{ЭС}$ – электростатическая составляющая расклинивающего давления, н/м²; $P_{МОЛ}$ – молекулярная (всегда притягивающая) составляющая расклинивающего давления, н/м²; $P_{СТР}$ – структурная составляющая расклинивающего давления, н/м².

Традиционное рассмотрение электростатической составляющей расклинивающего давления по теории ДЛФО (Дерягин - Ландау - Фервей - Овербек), которое описывает первую составляющую отталкиванием между диффузными слоями двойного электрического слоя ДЭС [1], дает величины напряжений в прослойках лигнина, намного меньшие, чем прочность лигнина и прочность древесины при растяжении и скалывании. Основной причиной этого является отсутствие диффузных частей ДЭС в тонкой водной прослойке между волокнами древесины из-за малой толщины этой прослойки и адсорбционного ориентирования ассоциатов воды под влиянием поверхности целлюлозных волокон.

С учетом этого рассмотрена схема двойных электрических слоев ДЭС между сильно гидрофильными поверхностями целлюлозных волокон (рис.3).

В соответствии с [1, 3] расклинивающее давление отталкивания между слоями целлюлозных волокон принимает вид:

$$P_{ЭС} = \frac{\epsilon \epsilon_0 \zeta^2}{4\pi(\delta_B^D)^2}, \quad (4)$$

где ζ – электрокинетический потенциал волокон целлюлозы; δ_B^D – расстояние между поверхностями волокон целлюлозы, м; ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость воды в прослойке между волокнами древесины; ϵ_0 – электрическая постоянная (диэлектрическая проницаемость вакуума), равная $8,85 \cdot 10^{-12}$.

Структурная составляющая $P_{СТР}$ обусловлена удалением влаги из древесины при ее высушивании, уменьшением толщины гигроскопической воды между целлюлозными волокнами, возникновению менисков в поверхностных к люменам слоях (рис.4), стягивающих целлюлозные волокна стенок люменов.

Два смежных вдоль фибриллы ряда волокон целлюлозы, стягиваемых прослойкой гигроскопической воды, можно представить плоским щелевым капилляром (рис.5,а), подобным модели тонкого щелевого капилляра (рис.5,б).

Стягивающую силу в щелевом капилляре можно представить уравнением [4]

$$f = \pm \frac{2\sigma \cdot s \cdot \cos \theta}{d}, \quad (5)$$

где d – расстояние между пластинами щелевого капилляра; θ – краевой угол смачивания; s – площадь пластин капилляра.

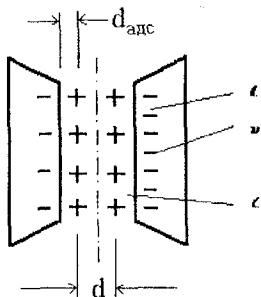


Рис.3 – Схема двойного электрического слоя ДЭС при отсутствии гигроскопической влаги в древесине

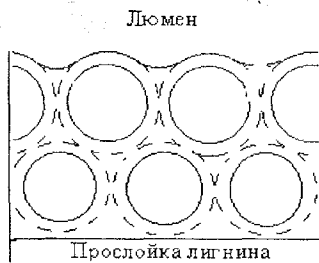
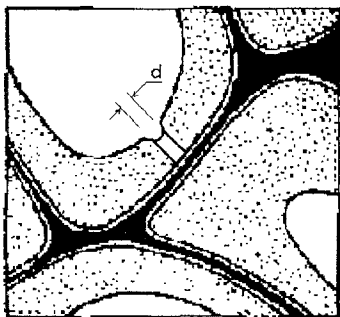


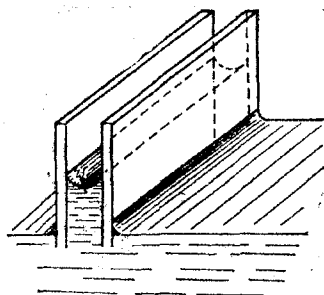
Рис.4 – Возникновение цилиндрических менисков в поверхностных слоях целлюлозных волокон стенки люмена

В результате последующих преобразований напряжение растяжения прослойки лигнина, обусловленное возникновением менисков между волокнами целлюлозы, составит

$$\sigma_{МЕН}^Л = \frac{\sigma d_{СТ}}{(d_{АДС} + \delta_{В.ИСП}^Ц) \cdot d^{ЛЮМ}} \quad (6)$$



а



б

Рис.5 – Схема щелевого капилляра: а - между смежными целлюлозными волокнами стенки трахеиды; б – в модели стягивающих капиллярных сил [4].

Общее напряжение в прослойках лигнина определится суммой этого напряжения и напряжения от электростатического отталкивания (4) между волокнами целлюлозы в стенках трахеид

$$\sigma^{\text{Л}} = \frac{\sigma d_{CT}}{\left(d_{АДС} + \frac{(W_{\text{МАХ}}^{\text{ГИР}} - W_{\text{ИСП}}) d_{\text{Ц}}^{\text{Ц}} \rho_{\text{Ц}}}{100 \cdot 4 \cdot \gamma_{\text{Ц}}} \right) \cdot d^{\text{ЛЮМ}}} \cdot \frac{\varepsilon \varepsilon_0 \zeta^2}{4\pi \left(\frac{W_{\Phi-\text{Ч}} \cdot d_{\text{Ц}}^{\text{Ц}} \cdot \rho_{\text{Ц}}}{4 \cdot \gamma_{\text{Ц}}} \right)^2} \cdot \frac{d^{\text{СТ}}}{d^{\text{ЛЮМ}}} \quad (7)$$

После дополнительных преобразований и подстановки $d_{\text{АДС}} = 6,2 \cdot 10^{-10}$ м (0,62 нм), а также $\sigma = 0,072$ н/м, $d_{\text{СТ}} = 5 \cdot 10^{-10}$ м, $\delta_{\text{АДС}}^{\text{В}} = 6,2 \cdot 10^{-10}$ м, $d^{\text{ЛЮМ}} = 17 \cdot 10^{-10}$ м, $\varepsilon = 40$, $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$, $d^{\text{СТ}} = 5 \cdot 10^{-10}$ м, $W_{\text{МАХ}}^{\text{ГИР}} = 30\%$ выражение (7) примет упрощенный вид

$$\sigma^{\text{ЛИГ}} = \frac{284}{(8,3 + 30 - W_{\text{ИСП}}) \cdot 0,745} \cdot \frac{183}{(30 - W_{\text{ИСП}})^2} \quad (8)$$

На рис.6 представлены зависимости напряжения в прослойках лигнина от влажности

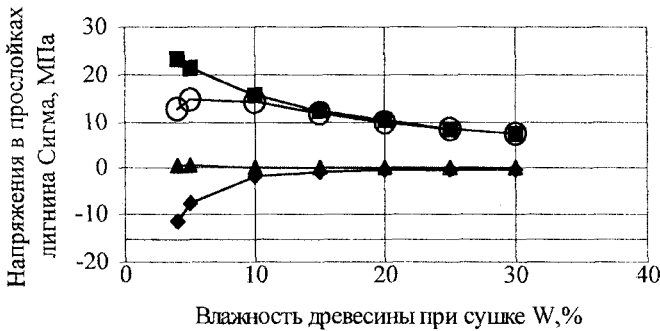


Рис.6 – Зависимость напряжения в прослойке лигнина от влажности древесины при сушке: —■— — стягивающее от возникающих при сушке менисков; —◆— — электростатического отталкивания; —▲— — молекулярного притяжения; —○— — результирующая

По данным рис.6, при испарении происходит уменьшение влажности от 30 до 8,3%, при этом толщина слоя воды (с учетом адсорбционного) на поверхности волокон целлюлозы уменьшается от 2,82 до

0,62 нм. С уменьшением влажности напряжения от всех составляющих возрастают по амплитуде вплоть до полного испарения, кроме адсорбционной влажности. При влажности около 5% результирующее напряжение начинает уменьшаться в связи с более интенсивным увеличением напряжения $\sigma_{ЭС}$. Молекулярная составляющая $\sigma_{МОЛ}$ остается незначительной во всем интервале влажности.

Реальным колебаниям гигроскопической влажности в брусках и шпалах в период максимальной усушки от 13 до 30% соответствуют толщины слоев воды на целлюлозных волокнах от 1,7 до 2,9 нм. При размере ассоциата из 5 молекул воды, равном 0,71 нм, это соответствует 1-3 ассоциированным слоям воды сверх неиспаряемого адсорбированного или 4-8 монослоев воды. Такие близко расположенные к поверхности целлюлозы слои воды, безусловно, находятся под ее сильным гидрофильным и электростатическим воздействием.

Таким образом, основной движущей силой возникновения трещин на поверхности брусков или шпал является сила стягивания целлюлозных волокон в стенках трахеид, обусловленная возникновением менисков между целлюлозными волокнами внутри клеток (люменов) при высыхании древесины. Эта сила разрушает склеивающие их прослойки из лигнина. Однако максимально возможная ширина раскрытия этих трещин (от усушки) не может превысить величины около 7 мм, что значительно ниже наблюдаемых величин (до 2,5 см, что может быть обусловлено проявлением иного механизма, связанного с набуханием после усушки древесины).

1. Воюцкий С.С. Курс коллоидной химии. – М.: Химия, 1976. – 512 с.

2. Горчаков Г.И., Баженов Ю.М. Строительные материалы. – М.: Стройиздат, 1986. – 688 с.

3. Плугин А.Н. Электрорегерогенные взаимодействия при твердении цементных вяжущих: Дисс. ... д-ра хим. наук. – К.: ИКХХВ, 1989. – 394 с.

4. Фролов Ю.Г. Курс коллоидной химии. – М.: Химия, 1982. – 400 с.

5. Walter Liese Tertiary Wall and Warty Layer in Wood Cells // Journal of polymer science. – P.C. – No2. – 1963. – P.213-219.

Получено 06.09.2002

УДК 69.003 : 338.242

Ю.Е.ТИМОФЕЕВ

Київський національний університет будівництва і архітектури

ФУНКЦИОНАЛЬНИЙ АЛГОРИТМ ПОБУДОВИ УПРАВЛІННЯ ПОЛІХОЛДИНГОВОЇ ГРУПИ

Розглядаються особливості побудови і функціонування алгоритму побудови