

## МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ КРИТЕРІЮ КІРПІЧОВА ЯК ОСНОВНОГО КРИТЕРІЮ ТРІЩИНОУТВОРЕННЯ У ПРОЦЕСІ КОНВЕКТИВНОГО СУШІННЯ ДЕРЕВИНИ

Розкрито причини появи тріщин у процесі сушіння деревини. Наведено методику дослідження критерію тріщиноутворення у процесі сушіння.

*Doc. I.M. Ozarkiv; eng. Z.P. Kopynets; doc. Yo.L. Acberher – NUFWT of Ukraine*

### Methods of Kirpichov's Criterion Research as Basic of Cracks Forming in Convective Wood Drying

Causes of cracks appearance in wood drying have been considered. Methods of cracks forming research in wood drying have been represented.

Дослідження зміни структурно-механічних властивостей деревини, як об'єкта сушіння та структуроутворення у процесі сушіння показали, що поява мікротріщин належить до області пружних деформацій. При цьому, якщо залежність між напруженням  $P$  і відносним видовженням близька до лінійної, то можна записати, що для області пружних деформацій ( $0 < \varepsilon < \varepsilon_s$ , де  $\varepsilon_s$  – відносне видовження) закон Гука буде мати вигляд (рис. 1)

$$P = E \cdot \varepsilon_s, \quad (1)$$

де:  $E$  – модуль пружності ( $E = \tan \psi$ ,  $\psi$  – кут нахилу, утворений дотичною до кривої і лінією, що характеризує область пружних деформацій);  $\varepsilon_s$  – відносна пружна деформація.

Водночас, для області пружно-пластичних деформацій ( $\varepsilon > \varepsilon_s$ )

$$P = P_0 + E_1 \cdot \varepsilon, \quad (2)$$

де модуль  $E_1 = \tan \psi_1$ .

Утворення тріщин і руйнування структури у процесі сушіння відбувається під дією дотичних напружень, а напрям тріщин, їх розміри та швидкість утворення залежать від співвідношення нормальних і дотичних напружень.

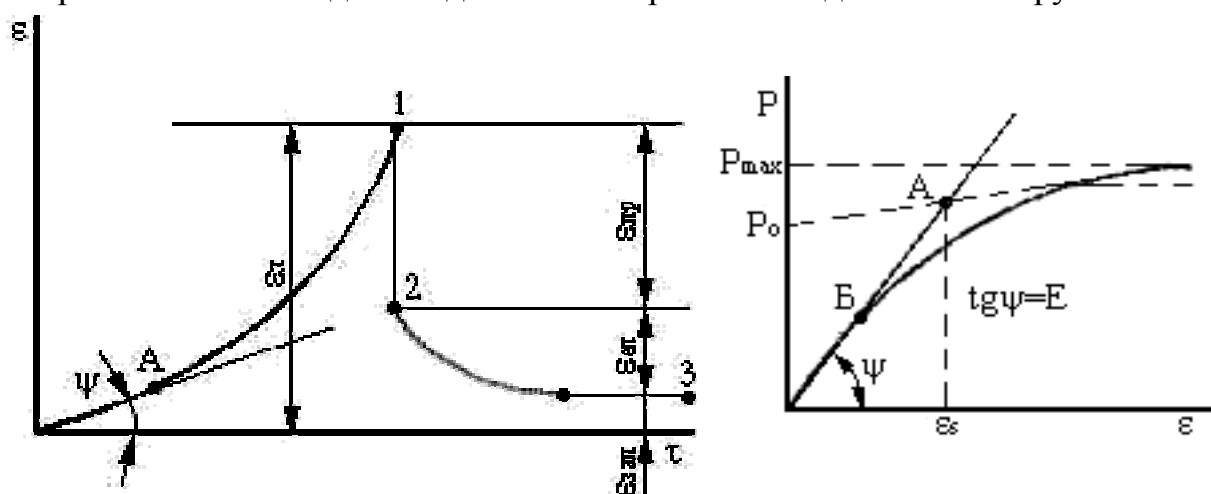


Рис. 1. Крива деформацій  $\varepsilon$  при навантаженні та миттєвому розвантаженні:  
 $\varepsilon_n$  – повна деформація;  $\varepsilon_{пр}$  – пружна деформація;  $\varepsilon_{ел}$  – еластична деформація;  
 $\varepsilon_{зал}$  – незворотна залишкова деформація

Якщо поява мікротріщин належить до області пружних деформацій, то значні локальні тріщини будуть утворюватися у пружно-еластичній (пластичній) області за рахунок еластичних деформацій, а руйнування структури, яке пов'язане з утворенням суцільних (наскрізних) тріщин, буде проходити в еластичній (пластичній) області.

Як показують дослідження ходу деформацій різних вологих колоїдних капілярно-пористих тіл, ще задовго до появи тріщин у них розвиваються залишкові пластичні деформації.

Руйнівні напруження, як відомо [1], виникають у матеріалі внаслідок нерівномірного (по всьому поперечному перерізі) всідання, яке зумовлене утворенням у матеріалі недопустимих градієнтів вологості та температури. Причиною, що викликає деформації всідання, є релаксація внутрішніх напружень у капілярно-пористій системі, яка виникає під дією капілярних сил. Це означає, що сили поверхневого натягу на увігнутих менісках рідини (води) у капілярах тіла будуть створювати для рідини розтягуючі напруження; водночас у матеріалі (об'єкті сушіння) виникає дуже складне поле напружень. Згідно з О.В. Ликовим [2], капілярний тиск рідкої фази в твердому тілі є функцією його вологовмісту (внаслідок чого поле капілярних контракцій в ізотермічних умовах буде подібне до поля вологовмісту, що є основною причиною виникнення об'ємно-напруженого стану вологого матеріалу у процесі сушіння). Тому саме як характеристику тріщиноутворення в будь-який момент часу приймають відносну різницю відповідних середнього  $\bar{u}$  і локального  $u$  вологовмісту об'єкта сушіння [1], тобто

$$K = \frac{\bar{u} - u}{\bar{u}_0}, \quad (3)$$

де  $\bar{u}_0$  – середній початковий вологовміст, кг/кг. сух. матеріалу.

Як відомо [1], навіть при відносно високому середньому вологовмісті  $\bar{u}$  у поверхневому шарі відбувається всихання. Це означає, що виникають напруження, які саме й приводять до утворення поверхневих тріщин. На цьому етапі процесу обезводнення матеріалу напруження приблизно пропорційні величині вільного всихання поверхневих шарів (остання, по-своєму, буде визначатися перепадом вологовмістів границі насичення  $u_{г.н}$  – і поверхневих шарів  $u_{пов}$  матеріалу). Через що, на нашу думку, критерієм тріщиноутворення можна взяти відносний перепад  $(u_{г.н} - u_{пов})$ , віднесений до максимального вологовмісту деревини, тобто

$$K = \frac{u_{г.н} - u_{пов}}{u_{max}}. \quad (4)$$

Як критерій тріщиноутворення на поверхні висушуваного матеріалу можна взяти критерій Кірпічова [1] для перенесення вологи  $Ki'_m$ , тобто

$$Ki'_m = \frac{100 \cdot q'_m \cdot R}{a'_m \cdot \rho_0 \cdot W_{max}} = - \frac{R \cdot (\Delta W)_{пов}}{W_{max}} = \frac{\frac{dW}{d\tau} \cdot R^2}{a'_m \cdot W_{max}}, \quad (5)$$

де:  $q'_m$  – інтенсивність випаровування (густина потоку вологи),  $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ ;  
 $(\Delta W)_{\text{пов}}$  – поверхневий градієнт вологості біля поверхні тіла,  $(\Delta W)_{\text{пов}} = \frac{dW}{dx}$ ;  
 $W_{\text{max}}$  – максимальна вологість деревини, %;  $\frac{dW}{dt}$  – швидкість сушіння, %/с;  
 $a'_m$  – коефіцієнт вологопровідності деревини,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $\rho_6$  – базова густина,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Таким чином, визначивши критерій  $Ki'_m$  для різних режимів сушіння, що викликають появу тріщин, можна встановити максимально допустимий критерій тріщиноутворення  $Ki'_{m, \text{max}}$ .

Для визначення  $Ki'_{m, \text{max}}$  доцільно брати взірці із початковою вологістю, вищою за границю насичення клітинних стінок, тобто  $u_i > u_{\text{гн}}$  ( $W_i > W_{\text{гн}}$ ). Це пояснюється тим, що найбільш небезпечним щодо появи тріщин на поверхні є перший період сушіння, оскільки в цьому періоді у поверхневих шарах виникають розтягуючі напруження.

Для визначення коефіцієнта вологопровідності потрібно використовувати відповідні формули [3], залежно від температури мокрого термометра, режиму сушіння та породи деревини.

Швидкість сушіння приймають за експериментальними кривими швидкості сушіння. Тобто  $\frac{dW}{dt} = N$  приймається для режимів сушіння, в яких є перший період сушіння (період постійної швидкості сушіння). У випадку, коли перший період сушіння відсутній, то  $\frac{dW}{dt}$  варто приймати для початку процесу сушіння.

Максимальну вологість деревини будь-якої породи можемо визначати таким чином [4]:

$$W_{\text{max}} = \frac{(1,53 - \rho_6) \cdot \rho_v}{1,53 \cdot \rho_6} \cdot 100 \%, \quad (6)$$

де:  $\rho_v$  – густина води,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $\rho_{\text{др}}$  ( $\rho_{\text{др}} = 1530 \text{ г}/\text{см}^3$ ) – густина деревної речовини,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Зокрема, значення максимальної вологості деревини при водопоглинанні для основних порід деревини становлять [5]: сосни –  $W_{\text{max}} = 185 \%$ , смереки –  $W_{\text{max}} = 212 \%$ , граба –  $W_{\text{max}} = 93 \%$ , дуба –  $W_{\text{max}} = 116 \%$ , берези –  $W_{\text{max}} = 135 \%$ , тополі –  $W_{\text{max}} = 212 \%$ .

Ступінь безпечності режиму із позиції забезпечення збереження цілісності деревини при сушінні оцінюємо таким чином. Із протоколів досліджень повинні відбиратися досліди, при яких у процесі сушіння були виявлені поверхневі тріщини. Далі для них попередньо визначаємо критерій Кірпічова. Після чого із протоколів досліджень вибираємо результати дослідів, які за даної температури мокрого термометра мали більш м'який режим сушіння. Зауважимо, що більш м'яким режимом вважається такий режим, в якого значення  $\Delta t = t_c - t_m$ , швидкість руху агента сушіння та товщина матеріалу є менши-

ми порівняно із іншим матеріалом. Підвищення жорсткості режиму сушіння може здійснюватися як за рахунок підвищення психрометричної різниці  $\Delta t$ , так і за підвищення швидкості циркуляції сушильного агента.

Тоді, розраховують для різних безпечних режимів сушіння за постійної температури мокрого термометра ( $t_m = \text{const}$ ) критерій  $Ki'_m$ ; за максимально допустимий критерій Кірпічова  $Ki'_{m, \max}$  приймається той критерій, який за своїм значенням найближчий до значення  $Ki'_m$ , що отриманий у першій серії досліджень.

Із формули (5) видно, що, коли  $t_m = \text{const}$ , то коефіцієнт вологопровідності для будь-якої породи деревини є постійним [3]

$$a'_m = 23,5 \cdot 10^{-8} \cdot \left( \frac{T_{\text{п.м}}}{273} \right)^{23} \cdot \left( \frac{\rho_6}{400} \right)^{-3,9} \text{ см}^2/\text{с}, \quad (7)$$

а максимально допустимий критерій Кірпічова буде залежати від швидкості сушіння  $\frac{dW}{d\tau}$  та товщини матеріалу.

Тому, для різних температур мокрого термометра і товщини пиломатеріалів можуть бути визначені значення максимально допустимої психрометричної різниці

$$\Delta t = (t_c - t_m) = \frac{1}{\alpha} \cdot 10 \cdot \left( \frac{dW}{d\tau} \right)_{\max} \cdot \rho_6 \cdot r \cdot R, \quad (8)$$

де  $\left( \frac{dW}{d\tau} \right)_{\max}$  – максимально допустима швидкість періоду падаючої швидкості сушіння, %/с;  $r$  – питома теплота пароутворення (приймається за таблицями або розраховується за нижче наведеною формулою [3]);  $R$  – визначальний розмір ( $R = \frac{S_1}{2}$ ,  $S_1$  – товщина матеріалу) кДж/кг.

$$r = 2490 \cdot (1 - 0,001 \cdot t_m). \quad (9)$$

$\alpha$  – коефіцієнт теплообміну, Вт/(м<sup>2</sup>·°C).

У випадку наявності першого періоду сушіння коефіцієнт теплообміну приймається для цього періоду, а у випадку відсутності цього періоду – приймається для даної початкової вологості. Власне, через те, що коефіцієнт  $\alpha$  залежить не тільки від параметрів сушильного агента ( $t_c$ ,  $t_m$ ,  $\phi$ ), але й від швидкості циркуляції (режиму руху) агента сушіння, то максимально допустима психрометрична різниця  $\Delta t$  повинна визначатися для різних значень  $Re$ .

Таким чином, критерій Кірпічова  $Ki'_{m, \max}$  буде визначатися за величиною змоченого термометра, тобто

$$Ki'_{m, \max} = \frac{N \cdot R^2}{a'_m \cdot W_{\max}} = f(t_m). \quad (10)$$

Аналіз формули (10) показує, що за постійної температури  $t_m$  і постійного коефіцієнта вологопровідності параметрами, що визначатимуть безпечність режиму сушіння із точки зору утворення поверхневих тріщин, на першому етапі другого періоду (періоду падаючої швидкості сушіння) буде максимально допустима швидкість сушіння  $\left(\frac{dW}{d\tau}\right)_{\max}$ , порода й товщина матеріалу, що висушується. Таким чином, знаючи величину  $a'_m$  (за температури мокрого термометра), швидкість сушіння на першому етапі другого періоду сушіння  $\left(\frac{dW}{d\tau}\right)$  і товщину матеріалу, можна завжди визначити величину  $Ki'_m$ .

Крім цього, якщо критерій  $Ki'_m$  у процесі сушіння буде вищим за значення максимально допустимого критерію  $Ki'_{m, \max}$ , то можна буде констатувати, що використовуваний режим сушіння є небезпечним щодо виникнення поверхневих тріщин у початковій стадії падаючої швидкості сушіння. Якщо  $Ki'_m < Ki'_{m, \max}$ , то режим сушіння є безпечним.

Зауважимо, що в Московському державному університеті лісу критерієм безпечності вибрано мінімально допустимий ступінь насичення агента сушіння [6, 7]. Тому, буде мати певне зацікавлення встановлення залежності мінімально допустимого ступеня насичення агента сушіння від його температури мокрого термометра та товщини матеріалу на першому етапі (стадії) періоду падаючої швидкості сушіння.

Таким чином, критерій  $Ki'_{m, \max}$  є критерієм оцінки утворення поверхневих тріщин на першій стадії періоду падаючої швидкості сушіння. Тому давати оцінку про раціональність режиму за його числовими значеннями повністю неможливо, оскільки сушіння деревини за підвищеної температури знижує міцність деревини на її сколювання та розколювання (міцність зменшується тим більше, чим буде вищою температура її сушіння та тривалість її дії на деревину у процесі обезводнення деревини).

## Література

1. Шостак В.В., Ацбергер Й.Л., Копинець З.П. Вплив режиму сушіння на тріщиноутворення деревини// Наук. вісник: Зб. наук.-техн. праць. – Львів: НЛТУУ. – 2005, вип. 15.4. – С. 109-114.
2. Лыков А.В. Теория сушки. – М.: Энергия, 1968. – 470 с.
3. Озарків І.М., Басалига Є.В., Лелюк Д.І. Визначення потенціалу вологопровідності при конвективному сушінні деревини// Наук. вісник: Зб. наук.-техн. праць. – Львів: УкрДЛТУ. – 2000, вип. 10.2. – С. 147-150.
4. Вінтонів І.С., Сопушинський І.М., Тайшінгер А. Деревинознавство: Навч. посібник. – Львів: УкрДЛТУ, 2005. – 252 с.
5. Боровиков А.М., Уголев Б.Н. Справочник по древесине: Справочник. – М.: Лесн. пром-сть, 1989. – 296 с.
6. Серговский П.С. О рациональных режимах сушки древесины в воздушных камерах периодического действия// Деревообраб. пром-сть, 1969, № 2. – С. 1-4.
7. Шубин Г.С. Сушка и тепловая обработка древесины. – М.: Лесн. пром-сть, 1990. – 336 с.