

3. ТЕХНОЛОГІЯ ТА УСТАТКУВАННЯ ЛІСОВИРОБНИЧОГО КОМПЛЕКСУ

УДК 674.047

*Проф. П.В. Білей, д-р техн. наук; доц. Я.Ф. Кулешник,
канд. техн. наук; ст. викл. І.А. Соколовський, канд. техн. наук –
НЛТУ України, м. Львів; ст. викл. А.В. Полоз, канд. техн. наук –
Коломийський політехнічний коледж*

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТЕПЛОВОЛОГООБРОБЛЕНЬ У ПРОЦЕСІ СУШІННЯ ПИЛОМАТЕРІАЛІВ

Розглянуто теоретичні основи визначення кінетики і тривалості зволоження деревини в процесі проведення тепловологооброблень.

*Prof. P.V. Biley, assist. prof. Ya.F. Kyleshnyk, senior teacher I.A. Sokolovskiy –
NUFWT of Ukraine, L'viv; senior teacher A.V. Poloz –
Kolomiyskiy polytechnic college*

Theoretical bases heat-humidity processing during drying of saw-timbers

Theoretical bases of determination kinetic and duration moistening of wood are considered during of heat-humidity processing.

Періодичне проведення проміжних тепловологооброблень дає змогу знімати накопичені внутрішні напруження за рахунок збільшення пластичності деревини та зберегти цілісність матеріалу в процесі сушіння. В одних роботах [1] проміжні тепловологооброблення для твердих листяних порід (бук, дуб) рекомендується проводити при переході на кожен наступний ступінь режиму. Таких проміжних тепловологооброблень може бути чотири. В інших роботах задається не кількість проміжних і кондиціонувальних тепловологооброблень, а їх загальна тривалість [2, 3]. Технологічні режими західноєвропейських фірм взагалі не передбачають проведення проміжних тепловологооброблень, через застосування дуже м'яких режимів сушіння, ними передбачається тільки кондиціонувальне тепловологооброблення. Однак, з точки зору теорії розвитку внутрішніх напружень, що підтверджено також і експериментальними дослідженнями [1], доцільно в процесі сушіння проводити хоча би одне проміжне тепловологооброблення, а саме, при середній вологості деревини $\bar{W} = 25^{\pm 1} \%$, тобто в момент зміни знаку напружень. Дані рекомендації стосуються процесу сушіння пиломатеріалів і заготовок із деревини твердих листяних порід. Для інших порід це значення перехідної вологості не визначалось, але воно знаходиться в діапазоні вологості деревини 20-30 % [2]. Таким чином, у цій роботі розглянемо закономірності проведення одного проміжного тепловологооброблення при середній вологості $\bar{W} = 25^{\pm 1} \%$ та кондиціонувального тепловологооброблення в кінці процесу сушіння.

Зволоження деревини в процесі проведення тепловологооброблень є складним процесом сорбції вологи в поверхневих шарах, переміщення вологи у вигляді пари і рідини всередину матеріалу, яке супроводжується набу-

ханням (збільшення лінійних розмірів і об'єму) та виділенням теплоти. Сорбція вологи на зовнішній поверхні сухої деревини протікає дуже швидко. Приблизно за 1 мкс при відносній вологості повітря $\varphi \leq 0,2$ на поверхні утворюється мономолекулярний шар. За умови $0,2 < \varphi < 0,7$ утворюється суцільна плівка мономолекулярної води, що є умовою полімолекулярної конденсації на поверхні. Коли $0,7 < \varphi < 1,0$, проявляє себе третій вид сорбції – капілярна конденсація. Якщо в процесі сорбції $\varphi = const$, то кількість молекулярних шарів води на зовнішній поверхні збережеться постійним, незважаючи на те, що конденсація на ній (поверхні) вологи продовжується. Швидкість адсорбції пари (конденсації) визначається швидкістю дифузії води із зовнішньої поверхні всередину матеріалу. Сорбція на внутрішній поверхні відбувається за типами моно- і полімолекулярної адсорбції.

Оскільки між процесами тепло- і масообміну визнається аналогія, то за граничними умовами I роду прийнято вважати, що вологообмінний критерій $Bi' \rightarrow \infty$. Фізично ця умова означає, що процес сорбції водяної пари лімітується не вологообміном, а внутрішнім вологоперенесенням – вологопровідністю (дифузією). Вологість на поверхні деревини під час проведення тепловологооброблень залишається постійною протягом всього процесу сорбції, вона дорівнює рівноважній вологості (W_p) відповідно з параметрами середовища (t_c, φ).

Основні чинники, які впливають на процес зволоження: параметри середовища (t_c, φ), розміри поперечного перетину ($S_1 \times S_2$), вологопровідність деревини (a'), глибина зволоження (x/R). Ці параметри пов'язані з тривалістю процесу зволоження (τ) системою критеріальних рівнянь:

$$1 - E_w = f\left(F'_0, \frac{x}{R}\right), \quad (1)$$

$$1 - E_w = (W_p - W_x)W_p, \quad (2)$$

$$F'_0 = \frac{a'\tau}{R^2}, \quad (3)$$

де E_w – безрозмірна вологість в точці сортименту, на віддалі x від поверхні матеріалу товщиною $S_1 = 2R$.

$$E_w = \frac{W_p - W_x}{W_p - W_0}, \quad (4)$$

де: W_p – рівноважна вологість, %; W_x – вологість в точці x в момент часу τ , %; W_0 – початкова вологість деревини перед зволоженням, %.

Сорбція поверхнею деревини водяної пари при високих значеннях вологості повітря $\varphi > 0,7$ супроводжується полімолекулярною адсорбцією (яка компенсує кількість води, що дифундує всередину матеріалу) і капілярною конденсацією. Інтенсивність капілярної конденсації на початку процесу зволоження є нижчою, ніж адсорбція на зовнішній поверхні матеріалу, але вищою, ніж адсорбція на внутрішній поверхнях. Тому радіус менісків в мікрозаглибленнях поверхні матеріалу впродовж процесу сорбції є меншим, ніж при рівноважній вологості поверхні деревини. Оскільки швидкість дифузії всередині матеріалу зменшується, то зменшується і різниця радіусів менісків,

що веде до зменшення капілярної конденсації пари. Таким чином, капілярна конденсація пари на поверхні залежить від дифузії вологи всередину матеріалу.

Умови вологообміну на поверхні деревини в процесі проведення тепловологооброблення визначаються масообмінним критерієм Біо. Якщо $\beta' \rightarrow \infty$, то можна очікувати, що і $Bi' \rightarrow \infty$, тоді вологообмін вважають безмежно інтенсивним. При цьому, вже при значенні критерію Біо $Bi' \geq 70$ вологообмін зараховують до інтенсивного тому, що процес зволоження лімітується не зовнішнім, а внутрішнім вологообміном.

Для визначення швидкості адсорбції водяної пари всередині деревини Б.С. Чудінов запропонував такий розв'язок. Продиференціювавши рівняння (2) за $(1 - E_w)$ та W , отримаємо приріст вологості (волога переміщається в бік меншого вологовмісту) при адсорбції

$$dW = -W_p d(1 - W). \quad (5)$$

Прийнявши в рівнянні (3) величини Fo' і τ як змінні, отримаємо

$$dFo' = \frac{a'}{R} d\tau. \quad (6)$$

Для визначення швидкості адсорбції в різних точках деревини розділимо рівняння (5) на (6)

$$\frac{dW}{d\tau} = -W_p \frac{a'}{R^2} \frac{d(1 - E_w)}{dFo'}. \quad (7)$$

З рівняння (7) можна зробити такі висновки: 1) швидкість адсорбції вологи деревиною прямопропорційна коефіцієнту дифузії води в деревині, її рівноважній вологості і оберненопропорційна квадрату визначального розміру; 2) швидкість адсорбції змінюється протягом всього процесу зволоження по-різному для поверхневих і внутрішніх шарів деревини. На початку процес адсорбції є більш інтенсивним у поверхневих шарах, а потім, коли вологість поверхні досягає рівноважного значення $W_{нов} \rightarrow W_p$, у внутрішніх.

Для необмеженої пластини рівняння (1) буде мати вигляд:

$$1 - E_w = \frac{4}{\pi} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{2n-1} \cos \left[\frac{\pi}{2} (2n-1) \frac{x}{R} \right] \times \exp \left[-\frac{\pi^2}{4} (2n-1)^2 F_0' \right]. \quad (8)$$

При початковій вологості деревини перед зволоженням ($W_0 > 0$) рівняння (2) та (5) потрібно записати так:

$$1 - E_w = (W_p - W_x) / (W_p - W_0), \quad (8)$$

$$dW = -(W_p - W_0) \cdot d(1 - E_w). \quad (10)$$

Швидкість сорбції вологи деревини визначається вологопровідністю. В рівняннях (6) та (7) припускається, що протягом всього процесу сорбції $a' = const$. Якщо таке припущення існує для даного ступеня режиму сушіння, де витримуються ізотермічні умови при $\Delta t \leq 2,5$ °C, то в процесі проведення тепловологооброблення температура середовища зростає і відбувається нестационарний теплообмін. Тривалість нестационарного теплообміну дорівнює тривалості процесу тепловологооброблень, відповідно $a' \neq const$. З іншого боку, величина коефіцієнта вологопровідності в процесі сорбції залежить не тільки

від температури, але і від стадії процесу і глибини проникнення зони випаровування. Крім цього, ці рівняння виведені з припущення, що на початку сорбції вологість розподілена рівномірно. Викладене вище дає підстави стверджувати, що виведені рівняння не будуть точно відображати процес зволоження.

Експериментальними дослідженнями було доведено, що оптимальною середньою вологістю матеріалу (деревини різних порід і товщини) для призначення проміжного тепловологооброблення є вологість $\bar{W} = 24 \dots 26 \%$. При косинусоподібному розподілі вологовмісту за товщиною матеріалу вологість поверхневих шарів становить $W_{нов} \approx W_p = 13 \dots 18 \%$, а вологість внутрішніх шарів $W_u = 30 \dots 36 \%$. Якщо у цей момент провести тепловологооброблення, то поверхневі шари будуть зволожуватись, а внутрішні будуть продовжувати висихати завдяки градієнту вологовмісту. Таким чином, встановиться деяка протитечія вологи: підвищення вологості поверхневих шарів як за рахунок сорбції і дифузії в них вологи, так і за рахунок переміщення вологи з більш вологих центральних шарів. При визначенні тривалості процесу тепловологооброблення можна очікувати, що вологість по всьому об'єму буде вирівнюватись і врешті, набуде значення W_p . Такі явища спостерігаються тільки при кінцевому та кондиціонуальному тепловологообробленнях. На сьогодні теоретичний розв'язок процесу зволоження деревини під час проведення тепловологооброблення є ще далеко не точним і на практиці рекомендується використовувати емпіричні залежності, які наведені в КТМ [4]. Для дослідження процесів проміжного та кондиціонуального тепловологооброблень використано лабораторну експериментальну сушильну установку.

Висновок. В низькотемпературному процесі сушіння вологість всередині матеріалу переміщається по товщині матеріалу, в основному, за рахунок градієнта вологості. Величина вологообміну всередині матеріалу за рахунок градієнта температури і тиску є незначною. Тому температуру і тиск можна виключити із числа чинників, які впливають на інтенсивність зміни вологості поверхневих і внутрішніх шарів деревини в процесі проведення тепловологооброблення. Вирівнювання вологості матеріалу за товщиною веде до вирівнювання деформацій, здебільшого, всихання, а це по-своєму веде до зменшення внутрішніх напружень. Отже, основним завданням проміжних тепловологооброблень є зменшення величини внутрішніх напружень за рахунок вирівнювання вологості матеріалу за товщиною. Крім цього, за рахунок спільної дії на деревину тепла і вологи, вона стає пластичнішою, що дає змогу зменшити залишкові деформації, які негативно позначаються на подальшому процесі сушіння та якості висушеного матеріалу.

Література

1. Билей П.В. Сушка древесины твердых лиственных пород. – М.: Экология, 1992. – 224 с.
2. Серговский П.С., Расев А.И. Гидротермическая обработка и консервирование древесины. – М.: Лесн. пром-сть, 1987. – 360 с.
3. Руководящие технические материалы по технологии камерной сушки древесины. – Архангельск: ЦНИИМОД, 1985. – 143 с.
4. Керівні технічні матеріали з технології камерного сушіння пиломатеріалів/ За ред. проф. Білея П.В. – Львів: РВЦ УкрДІТУ. – 2003. – 72 с.