

**Висновки.** На підставі виконаних досліджень робимо такі висновки: а) нахил волокон у деревині бука не має істотного впливу на різні види щільності; б) середні значення лінійного усихання і розбухання у тангентальному напрямку приблизно у два рази більші, ніж у радіальному; в) вплив нахилу волокон на лінійні усихання і розбухання описується лінійною залежністю; г) із збільшенням кута нахилу волокон тангентальне і радіальне усихання вирівнюються.

### Література

1. Вінтонів І.С. Аспекти формування високодекоративної текстури деревини / І.С. Вінтонів, І.М. Сопушинський, М.П. Сопушинська // Науковий вісник УкрДЛТУ : зб. наук.-техн. праць. – Львів : Вид-во УкрДЛТУ. – 2004. – Вип. 14.6. – С. 113-117.
2. Білей П.В. Сушіння деревини : навч. посібн. [для студ. ВНЗ] / П.В. Білей, В.М. Павлюст. – Львів : ТзОВ "Ліга-Прес", 2003. – 240 с.
3. Миклуш С.І. Типи лісу рівнинних букових насаджень України / С.І. Миклуш // Науковий вісник УкрДЛТУ : зб. наук.-техн. праць. – Львів : Вид-во УкрДЛТУ. – 2005. – Вип. 15.1. – С. 9-14.
4. Сопушинський І.М. Вплив лісорослинних умов південно-західного мегасхилу Українських Карпат на властивості деревини бука лісового (*Fagus sylvatica* L.) : дис... канд. с.-г. наук: спец. 06.03.03 – "Лісівництво і лісівництво" / Сопушинський Іван Миколайович; УкрДЛТУ. – Львів, 2001. – 180 с.
5. Сопушинський І.М. Методичні аспекти структуроутворення декоративної деревини / І.М. Сопушинський // Науковий вісник НЛТУ України : зб. наук.-техн. праць. – Львів : РВВ НЛТУ України. – 2011. – Вип. 21.10. – С. 41-46.
6. Normen für Holz: DIN-Taschenbuch 31. – [8<sup>te</sup> Aufl.]. – Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2009. – 604 S.
7. Selection of maple "birdseye" (*Acer pseudoplatanus* L.) in Ukrainian Carpathian mountains / I. Sopushynskyy, I. Vintoniv, A. Teischinger [etc.] // Wood Structure and Properties '06. – Zvolen : Arboga Publishers. – 2007. – P. 139-142.
8. Knigge K. Methodische Untersuchungen über die Möglichkeit der Drehwuchsfeststellung in verschiedenen Alterszonen von Laubhölzern / W. Knigge, H. Schulz // Holz als Roh und Werkstoff. – Heidelberg : Springer-Verlag. – 1959. – Heft 9. – S. 341-351.
9. Von Wuehlisch G. European beech (*Fagus sylvatica* L.): technical guidelines for genetic conservation and use / G. Von Wuehlisch. – Rome : EUFORGEN, 2003. – 6 p.

### **Сопушинский И.Н. Анизотропия усушки и разбухания свилеватой древесины бука лесного (*Fagus sylvatica* L.)**

Исследована анизотропия усушки и разбухания свилеватой древесины бука. Установлены зависимости показателей усушки и разбухания древесины от угла наклона древесного волокна. Определена стандартная, условная, в абсолютно-сухом и мокром состояниях плотность древесины бука с разным наклоном волокон.

**Ключевые слова:** бук, древесина, наклон волокон, плотность, усушка, разбухание.

### **Sopushynskyy I.M. Anisotropy of shrinkage and swelling figured wood of European beech (*Fagus sylvatica* L.)**

Investigated the shrinkage and swelling anisotropy of beech figured wood. Correlations between the slope of wood grain and characteristics of shrinkage and swelling were established. The standard, basic, oven-dry and wet wood densities of beech with different slope of wood fiber were studied.

**Keywords:** beech, wood, twistiness, closeness, withering, intumescing.

УДК 674.047

Проф. П.В. Білей, д-р техн. наук; доц. І.В. Петришак, канд. техн. наук; аспір. А.М. Комбаров; магістр П.П. Білей – НЛТУ України, м. Львів

### ТЕПЛОВА ОБРОБКА І СУШІННЯ ДЕРЕВИНИ В ПРОЦЕСАХ ГНУТТЯ

Описано фізичні явища переходу деревини у стан еластичності в процесі її нагрівання. Наведено методику визначення кількості теплоти, яка витрачається у процесах нагрівання деревини перед гнуттям та під час сушіння, коли одна з поверхонь має вологоізоляцію, а також методику визначення витрат теплової енергії з електрообігрівом заготовок у процесі гнуття.

**Ключові слова:** гнуття, нагрівання, сушіння, масивна деревина, деформації, стиск, розтяг, вологість, тепла енергія.

**Вступ.** У технологічному процесі гнуття деревини складовими частинами є тепла обробка, гнуття і сушіння зігнутих деталей для стабілізації набутої форми. У загальному технологічному процесі виготовлення виробів місце гнуття не є постійним. зазвичай, його використовують безпосередньо після розкрявання. Технологічний процес відбувається таким чином: розкрій на заготовки, тепла обробка заготовок, гнуття, сушіння і механічна обробка гнутих заготовок. Деколи гнуттю піддають вже частково оброблені деталі. Наприклад, задні ніжки гнутого стільця згинають переважно після обробки на круглопалкових копіювальних верстатах, а після гнуття і сушіння тільки шліфують.

Теплова обробка деревини відбувається під дією тепла водяної пари, атмосферного повітря, топкових газів і рідин, тепла контактуючих елементів, інфрачервоного випромінювання та електромагнітних хвиль. Основна мета теплової обробки – зміна фізико-механічних властивостей деревини, що визначається відповідними технологічними та експлуатаційними вимогами. У більшості випадків метою теплової обробки деревини є її розм'якшення. У літературі наведено різні думки про причини розм'якшення деревини в процесі її гідротермічної обробки та особливостей деформації деревини в нагрітому стані. Найбільш просте та поширене пояснення причин підвищеної деформативності нагрітої деревини полягає в тому, що тверді колоїдні речовини, які знаходяться у міжклітинному просторі, за звичайних температур цементують деревинні волокна, а в процесі нагрівання переходять в гелевий стан, внаслідок чого послаблюється зв'язок між волокнами. З погляду сучасної фізико-хімії полімерів, аморфні лінійні полімери (до яких відносять целюлозу) можуть знаходитись у трьох станах: склоподібному, в'язкотекучому та високоеластичному.

Суть переходу деревини в процесі нагрівання зі склоподібного в високоеластичний стан полягає в тому, що вода тут відіграє роль пластифікатора – дисоціює поперечні зв'язки між макромолекулами. Руйнування цих зв'язків приводить до збільшення гнучкості структурних елементів. Таким чином, фізична суть розм'якшення деревини тепловою обробкою полягає в тимчасовому виведенні її з склоподібного в еластичний стан, в якому вона здатна витримувати значні пружні деформації без руйнування.

На еластичність деревини значний вплив мають такі фактори: температура, вологість, порода (особливості макроструктури), вік, термін заготівлі, місцезнаходження зразка у стовбурі та інші фактори. Наприклад, бук віднесено (особливо у молодому віці) до високоеластичних порід деревини. Заболонна та вершинна частина стовбура є більш еластичною, ніж спілодеревна.

Температура має найбільший вплив на еластичність деревини. Це пояснюють, по-перше, тим, що збільшення коливного руху молекул деревинної речовини та води приводять до примусового переходу деревини в стан еластичності. Неабияку роль відіграють теплові дифузійні процеси. Так, якщо збільшити температуру від 0 °С до 54 °С, відносна деформація стискування вздовж волокон може зрости майже у 5 разів. Перехід деревини в стан вимушеної еластичності є наслідком спільної дії на неї тепла і вологи.

Щоб деревина перейшла зі склоподібного в еластичний стан, її потрібно зволожити. З підвищенням вологості деревини до точки насичення деревинних волокон її еластичність зростає. Подальше зростання вологості еластичність не збільшує, а діє скоріше навпаки. Вода, яка наповнює капіляри, практично не стискується, що може призвести до руйнування деревини. Окрім цього, значне зволоження приводить до збільшення тривалості наступного процесу сушіння та збільшення витрат теплової енергії.

Теплове обробка заготовок перед гнуттям здійснюється шляхом їх пропарювання, зазвичай, у пропарювальних барабанах (котлах) невеликої ємності, яка забезпечує роботу гнутаючого пристрою. У таких барабанах створюється невеликий тиск (0,02...0,05 МПа), чому відповідає температура середовища  $t_c = 102...105$  °С. Деревина у такому середовищі нагрівається до  $t_d = 96...98$  °С. Таким чином, пропарювальні барабани забезпечують інтенсивний процес пропарювання із збереженням якісних показників деревини.

Кількість тепла  $dQ$ , яка передається до поверхні матеріалу площею  $dF$  за час  $d\tau$  від середовища, визначають за рівнянням Ньютона:

$$dQ = \alpha (t_c - t_{нов}) dF d\tau, \text{ Дж}, \quad (1)$$

де:  $\alpha$  – коефіцієнт теплообміну, Вт/(м<sup>2</sup> · °С);  $t_c, t_{нов}$  – відповідно, температура середовища та поверхні матеріалу, °С.

З поверхні матеріалу до його середини ця кількість тепла (в пропарювальному барабані створені умови інтенсивного теплообміну між середовищем і поверхнею матеріалу, коли  $Bi \rightarrow \infty$ ) передається, переважно, шляхом теплопровідності, яку визначають за формулою

$$dQ = -\lambda \frac{dt}{dx} dF d\tau, \text{ Дж}, \quad (2)$$

де:  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності деревини, Вт/(м · °С);  $dt/dx$  – градієнт температури в матеріалі, °С/м.

Якщо порівняти ліві та праві частини рівнянь (1) та (2) і провести відповідні скорочення, то отримаємо граничні умови третього роду:

$$\alpha (t_c - t_{нов}) = -\lambda \frac{dt}{dx}. \quad (3)$$

Тривалість теплової обробки деревини можна визначити за формулою

$$\tau_{мо} = \frac{0,23S_l^2}{\alpha} \lg \frac{t_c}{t_c - t_d}, \text{ с}, \quad (4)$$

де:  $S_l$  – товщина матеріалу, см;  $t_c, t_d$  – відповідно, температура середовища в пропарювальному барабані та початкова температура деревини до теплової обробки, °С;  $\alpha$  – коефіцієнт теплообміну поверхні матеріалу з середовищем, Вт/(м<sup>2</sup> · °С).

Коефіцієнт теплообміну можна знайти за кількістю тепла  $Q$ , що передається середовищем до поверхні матеріалу за одиницю часу:

$$\alpha = Q / (t_c - t_{нов}), \text{ Вт/м}^2. \quad (5)$$

Технологією теплової обробки передбачено поступове збільшення температури деревини за відповідним градієнтом  $dt/d\tau$ . Тоді загальну кількість тепла, яку витрачено на кожній ступені теплової обробки деревини, визначають за формулою

$$Q_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n Q_i = \sum_{i=1}^n \rho E \bar{C}_i \frac{\Delta t}{\Delta \tau}, \text{ кВт}, \quad (6)$$

де:  $\rho$  – густина деревини, кг/м<sup>3</sup>;  $E$  – кількість матеріалу, що знаходиться в пропарювальному барабані, м<sup>3</sup>;  $\bar{C}_i$  – середня питома теплоємність деревини для  $i$ -того інтервалу температур ( $dt$ ), кДж/(кг · °С);  $n$  – кількість інтервалів зміни температури середовища.

Нагріта деревина (заготовка) після пропарювання подається на гнутаючий верстат і разом із металевою шиною, яка фіксує форму заготовок після гнуття, завантажується у контейнери і подається у сушильну камеру. Доцільно використовувати сушильні камери безперервної дії. Інтенсивність сушіння пропареної деревини є на 20...40 % більшою, ніж непропареної. Однак у цьому випадку одна з поверхонь закрита шиною, тобто вона є закритою для випаровування вологи.

Якщо вважати, що в сушильну камеру поступають вже нагріті заготовки, то в процесі їх сушіння у сушильних камерах (періодичної або безперервної дії) витрачається відповідна кількість теплоти  $Q_c$ , яку можна визначити за формулою

$$Q_c = C_1 (q_{вум} + q_{оз}) \cdot M_c, \text{ кВт}, \quad (7)$$

де:  $C_1$  – коефіцієнт неврахованих витрат теплоти,  $C_1 = 1,15$ ;  $q_{вум}, q_{оз}$  – відповідно питомі витрати теплоти на випаровування вологи з деревини (сушіння) і втрати теплоти через огороження віднесені до 1 кг вологи, що випаровується у процесі сушіння, кДж/кг, які визначають з формул:

$$q_{вум} = 1000 \cdot \frac{I_2 - I_0}{d_2 - d_0} - 4,19 t_m, \text{ кДж/кг}, \quad (8)$$

де:  $I_2, I_0$  – відповідно, ентальпія повітря на виході зі штабеля (контейнерів) та свіжого повітря, кДж/кг;  $d_2, d_0$  – відповідно, вологовміст повітря на виході зі штабеля та свіжого повітря, г/кг;  $t_m$  – температура змоченого термометра, °С;

$$q_{оз} = \frac{1}{M_c} \sum F_{оз} \cdot K_{оз} \cdot (t_c - t_0), \text{ кДж/кг}, \quad (9)$$

$$M_c = \frac{0,01\rho_y \cdot (W_0 - W_k) \cdot E}{3600 \cdot \tau_c}, \text{ кг/с}, \quad (10)$$

де:  $\rho_y$  – умовна густина деревини,  $\text{кг/м}^3$ ;  $W_0, W_k$  – відповідно початкова і кінцева вологість у процесі сушіння, %;  $\tau_c$  – тривалість сушіння, с;  $F_{oc}$  – площа огородження,  $\text{м}^2$ ;  $K_{oc}$  – коефіцієнт теплопередачі огородження,  $\text{кВт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ;  $t_c$  – температура середовища в камері,  $^\circ\text{C}$ ;  $t_0$  – температура зовнішнього середовища,  $^\circ\text{C}$ .

Якщо випаровування води з поверхонь матеріалу є несиметричним, то температуру його поверхні визначають за формулою

$$t_x = t_c - \frac{r_0}{2\alpha} \left[ (J_1 + J_2) + \frac{x}{R} (J_1 - J_2) \frac{1}{1 + Bi^{-1}} \right], \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (11)$$

де:  $J_1, J_2$  – відповідна інтенсивність з різних поверхонь матеріалу,  $(\text{кг}/\text{м}^2 \cdot \text{с})$ ;  $Bi$  – теплообмінний критерій Біо,  $Bi = \alpha R/\lambda$ ;  $r_0$  – питома теплота пароутворення,  $\text{кДж}/\text{кг}$ ;  $t_c$  – температура середовища в процесі сушіння,  $^\circ\text{C}$ ;  $\alpha$  – коефіцієнт теплообміну,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ .

Якщо одна поверхня має вологоізоляцію, тобто  $J_2 = 0$ , то в цьому випадку температуру відкритої поверхні визначають за формулою

$$t_{(R)} = t_c - \frac{r_0}{\alpha} \left( 1 + \frac{1}{1 + Bi^{-1}} \right), \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (12)$$

На деяких деревообробних і меблевих підприємствах здійснюють процес гнуття сухих заготовок з великими радіусами кривизни на гнтарних верстатах з обігрівом струмами промислової частоти. У таких верстатах загальною потужністю до 30 кВт можна одночасно згинати до 18 заготовок товщиною  $S_l = 20 \dots 50$  мм. Для нагрівання деревини використовуються нагрівальні елементи з напругою  $U = 380$  В і силою струму (залежно від товщини матеріалу)  $I = 0,6 \dots 2$  А. Кількість тепла  $Q$ , яке виділяється струмами промислової частоти, визначають за законом Джоуля-Ленца:

$$Q = 0,24 \cdot I^2 \cdot R \cdot \tau, \text{ Дж}, \quad (13)$$

де:  $I$  – сила струму, А;  $R$  – опір електричного струму, Ом;  $\tau$  – тривалість витримки, с ( $\tau = 30 \dots 90$  хв залежно від товщини матеріалу).

**Висновки.** Дослідженнями встановлено, що зменшення поверхні випаровування у два рази зменшує інтенсивність сушіння матеріалу тільки на 30 %. Таким чином, для нерівномірного обтікання матеріалу потоком повітря, коли вологоізолювана одна поверхня заготовок, швидкість сушіння в різних зонах відрізняється неістотно. Якщо врахувати заповільнення процесу сушіння унаслідок вологоізоляції поверхні та інтенсифікацію процесу сушіння пропарених заготовок, які є приблизно однаковими, то розрахунок тривалості сушіння можна здійснювати табличним методом.

### Література

1. Білей П.В. Теоретичні основи теплової обробки і сушіння деревини / П.В. Білей. – Коломия : Вид-во "Вік", 2005. – 364 с.
2. Білей П.В. Керівні технічні матеріали з технології камерного сушіння пиломатеріалів / П.В. Білей, І.А. Соколовський, В.М. Павлюст, Є.П. Кунинець / за ред. проф. П.В. Білея. – Ужгород : Вид-во "Карпати", 2010. – 140 с.

### Білей П.В., Петришак І.В., Комбаров А.М., Білей П.П. Тепловая обработка и сушка древесины в процессах гнутья

Описаны физические явления перехода древесины в эластическое состояние в процессе ее нагревания. Дана методика определения количества теплоты, которая расходуется в процессах нагревания древесины перед гнутьем и в процессе сушки, когда одна из поверхностей имеет влагоизоляцию, а также методика определения затрат тепловой энергии с электрообогревом заготовок в процессе гнутья.

**Ключевые слова:** гнутье, нагревание, сушка, массивная древесина, деформация, сжатие, растяжение, влажность, тепловая энергия.

### Biley P.V., Petryshak I.V., Kombarov A.M., Biley P.P. Heat treatment and drying of wood in the process of bending

Described in this article are physical processes that accompany the transition of wood to the state of elasticity in heating. Presented here are the methods for determination of heat quantity which is used in the process of wood heating prior to bending and in drying for the case when one of the surfaces is moisture insulated.

**Keywords:** bending, heating, drying, massive wood, deformations, clench, wricked, humidity, thermal energy.

### УДК 637.336 Здобувач І.В. Буділович<sup>1</sup> – НУ харчових технологій, м. Київ

#### ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕМПЕРАТУРНИХ РЕЖИМІВ НА ПРОЦЕС ВИЗРІВАННЯ ТВЕРДИХ СИРІВ ІЗ НИЗЬКОЮ ТЕМПЕРАТУРОЮ ДРУГОГО НАГРІВАННЯ

Досліджено вплив температурних режимів визрівання на основні фізико-хімічні, мікробіологічні та органолептичні показники твердих сирів із низькою температурою другого нагрівання у процесі визрівання. Встановлено оптимальні температурні режими визрівання твердих сирів із низькою температурою другого нагрівання.

**Ключові слова:** твердий сир, температурні режими визрівання, процес визрівання, активна кислотність, молочнокисла мікрофлора, органолептичні показники, ступінь зрілості сиру.

Виробництво твердого сиру включає два основних етапи – виробництво свіжого сиру і його визрівання. Головну роль у визріванні сиру відіграють ферменти, що продукуються мікроорганізмами бактеріальної закваски, під дією яких відбувається перетворення основних компонентів молока (лактози, білків, жирів) у сполуки, що обумовлюють смакові та ароматичні властивості сиру і його консистенцію, харчову і біологічну цінність, зокрема зброджують молочний цукор і цитрати з утворенням молочної кислоти, вуглекислого газу і деяких інших продуктів (діацетилу, ацетоїну, оцтової кислоти й ін.). Тому найглибші біохімічні та фізико-хімічні зміни компонентів молока відбуваються у період визрівання сиру, піл час якого формуються консистенція, рисунок, специфічний смак і запах сиру [1].

Виробництво сирів з якісними органолептичними показниками завдяки скороченому терміну визрівання дає змогу покращити економічні показники підприємства, підвищити оборотність камер визрівання. Тому основне завдання інтенсифікації виробництва твердих сирів є прискорення процесу визрівання.

<sup>1</sup> Наук. керівник: доц. О.А. Савченко, канд. техн. наук