

## STRUKTURĀLI NEBALANSĒTU DAUDZSLĀŅU LOKŠŅVEIDA KOKSNES MATERIĀLU FORMAS VEIDOŠANAS PAMATPRINCIPI BASIC PRINCIPLES FOR THE SHAPE FORMATION OF STRUCTURAL UNBALANCED MULTILAYER PLATE WOOD-BASED MATERIALS

G. Vērdiņš  
LLU Spēkratu institūts  
Motor Vehicle Institute, LLU

**Abstract.** The article presents a detailed overview of suitability of unbalanced multilayer composite deformation theory for structural unbalanced multilayer plate wood-based material (MPWM) shape formation calculations and projections. Theoretical motivation of deformation estimation in structural unbalanced MPWM of several kinds of structure under influence of temperature or moisture, under simultaneous influence of temperature and moisture is given. Deflection of structural unbalanced multilayer plate wood-based materials after glueing together, cooling in homogeneous field of temperature is modelled, analytically calculated and experimentally determined on different press plate temperatures. The experiments are carried out with materials of varied layer thickness location and orientation. The obtained results prove, that this theory of structural unbalanced MPWM stress state estimation and model enable to calculate and prognosticate the deformations of such materials under the influence of change of different factors. This method allows to form the shape of materials changing the temperature, layer thickness, location, orientation and other parameters.

**Key words:** structural unbalanced wood-based multilayer materials, mathematical model, form shaping, temperature, deformation, warping, curvature.

### 1. Ievads

Čaulu un cita veida liektu un/vai vērptu lokšņveida detaļu izmantošanai celtniecībā, dažādu formu un modeļu izgatavošanā, mēbeļu ražošanā un daudzās citās nozarēs, salīdzinot ar plakanām, ir virkne priekšrocību, taču to lietošanu, sevišķi individuālajā un sīksēriju ražošanā, ierobežo izgatavošanas tehnoloģijas sarežģītība un palielinātās izmaksas. Parasti liektas detaļas veido speciālās formās vai palīgierīcēs, kuru izgatavošana ir samērā dārga un sarežģīta. Šādas detaļas daudz lētāk būtu izgatavot, veidojot strukturāli nebalansētus koksnes materiālus, kuri pēc salīmēšanas parastajās saplākšņu ražošanas presēs ar plakanām plātnēm kondicionēšanas procesā iegūst tādu formu, kāda nepieciešama. Taču, lai šo procesu varētu vadīt un kvalitatīvi realizēt, nepieciešamas zināšanas par strukturāli nebalansētu anizotropu koksnes materiālu deformēšanās likumsakarībām, jābūt aprēķinu metodikai, izejas datiem un izgatavošanas tehnoloģijai.

Anizotropu nesimetrisku materiālu deformatīvo īpašību aprēķinos izmanto Kossera momentu spriegumu teorijas idejas. Anizotropu lokšņveida materiālu deformēšanās teorijas pamatus izstrādājis S. Leņņickis (С. Лехницкий, 1949). Dažāda tipa plātņu lieces un lineāro deformāciju

aprēķinu metodes dotas E. Reissnera un I. Stavskas darbos (E. Reissner, I. Stavsky, 1961). Ortotropu un monoklīnu daudzslāņu materiālu deformatīvās īpašības un to izmaiņas laikā analizētas K. Rocēna un K. Šteinerja publikācijā (K. Штейнерс, К. Роценс, 1973). Strukturāli balansētu daudzslāņu kompozītu materiālu ar monoklīnu uzbūves struktūru deformēšanās likumsakarības, zaudējot balansētību apkārtējās vides iedarbības un citu izmaiņu rezultātā, aprakstījuši K. Rocēns, K. Šteiners (K. Штейнерс, К. Роценс, 1976) un G. Vērdiņš (K. Штейнерс, К. Роценс, Г. Вердиньш, 1977). Nebalansētu slāņainu kompozītu deformēšanās teorija un koksnes materiālu īpašību regulēšana ar tehnoloģiskiem paņēmieniem dota K. Rocēna (K. Роценс, 1979) monogrāfijā. Nesimetrisku slāņainu dispersu koksnes materiālu deformatīvās īpašības mitruma ietekmē aprakstītas J. Brauna un K. Rocēna publikācijā (J. Brauns, K. Rocens, 1994). Strukturāli nebalansētu daudzslāņu koksnes materiālu uzvedība nevienmērīga mitruma lauka un citu faktoru ietekmē aprakstīta K. Rocēna, J. Brauna, G. Vērdiņa darbā (K. Роценс, Я. Браунс, Г. Вердиньш, 1997). Slāņainu koksnes paneļu deformācijas mitruma ietekmē pētījuši D. Ksu un O. Suhslands (D. Xu, O. Suchsland, 1996).

## 2. Teorētiskais pamatojums

Vispārīgā gadījumā anizotropos materiālos dažādu faktoru izmaiņu rezultātā rodas telpisks spriegumstāvoklis un to lineārās, leņķiskās deformācijas, liekumus, vērpumus izsaka sakarības:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_j \\ k_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{jk} & b_{jl} \\ c_{lk} & d_{ll} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \sigma_k \\ M_l \end{bmatrix}; \quad (1)$$

( $j, l, k, i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ ),

kur:  $\varepsilon_j$  - vidējo plakņu deformācijas;

$k_l$  - lieces un vērpes deformācijas;

$\sigma_k$  - spriegumi;

$M_l$  - momenti;

$a_{jk}, b_{jl}, c_{lk}, d_{ll}$  - deformatīvās konstantes.

Lai nebalansētu slāņainu kompozītu deformēšanās teoriju varētu izmantot praktisku uzdevumu risināšanā, piemēram, jaunu materiālu projektēšanā un izgatavošanā, slāņainu materiālu formas veidošanā un izgatavošanas tehnoloģijas izstrādē, jāveic papildus pētījumi, jo strukturāli nebalansēti daudzslāņu lokšņveida koksnes materiāli (LKM) ļoti jutīgi reaģē uz mitruma, temperatūras, ģeometrisko izmēru, slāņu materiālu īpašību, izvietojuma un citu faktoru izmaiņām. Vērtējot strukturāli nebalansētu LKM spriegumstāvokli un deformēšanās procesu mitruma un temperatūras izmaiņu, kā arī tehnoloģisko faktoru ietekmes rezultātā, papildus jāievērtē koksnes materiālu īpatnības. Bez vispārzināmām koksnes materiālu fizikāli mehānisko un deformatīvo īpašību izmaiņām atkarībā no mitruma un temperatūras, deformēšanās procesu ietekmē arī uzbriešanas spiediens, set-efekts jeb deformāciju "pārdzimšanas" efekts, koksnes struktūras un blīvuma izmaiņas presēšanas laikā, līmes rukums un īpašību izmaiņas LKM atdzišanas, kondicionēšanas un ekspluatācijas laikā. Šādu materiālu slāņiem izmantojami dažādu koksnes sugu lobītie un drāztie finieri, dēļi, skaidas, šķiedras, metāli, plastmasas, līmes, lakas, krāsas. Citu slāņu materiālu īpatnības arī atstāj zināmu ietekmi uz LKM deformēšanos. Piemēram, plastisku metālu uzkalde, polimēru materiālu viskozi elastīgās īpašības, skaidu un šķiedru plātņu deformēšanās laikā maina visa materiāla spriegumstāvokli un ģeometriskos parametrus.

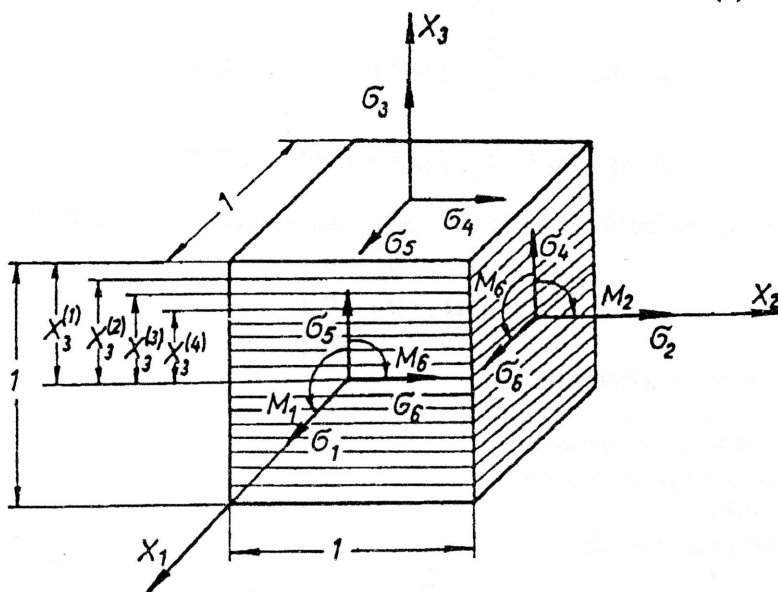
Modelējot strukturāli nebalansētu daudzslāņu materiāla pašdeformēšanos dažādu faktoru ietekmē pieņem, ka tam ir:

- viena vidusplakne, kas paralēla slāņu klāšanas plaknei, attiecībā pret kuru elementāro slāņu deformatīvās īpašības nav simetriskas, pie kam katrā punktā ir viena elastīgās simetrijas plakne, kas paralēla vidusplaknei;
- slāņu klāšanas plaknē katra slāņa galveno elastības rādītāju virzieni orientēti brīvi un visi elementārslāņi deformējas pēc vispārējā Huka likuma;

- starp slāņiem ir pilnīga saķere un tie savstarpēji deformējas bez slīdes un ir spēkā Kirhofa hipotēze par nedeformējamām normālēm.

Analizējot uz koksnes bāzes veidotu daudzslāņu lokšņveida materiālu formas veidošanās procesu, aplūkosim LKM, kuru struktūra ir nebalansēta attiecībā pret slāņu klāšanas ģeometrisko vidus plakni jeb Dekarta koordinātu sistēmas plakni  $x_1, x_2$  (1. att.).

Anizotropam lokšņveida materiālam, kura īpašības  $x_3$  ass virzienā slāņu robežās nemainās, vispārīgā gadījumā spriegumu un momentu radītās deformācijas apraksta sekojošas izteiksmes, kurās nepieciešamo deformatīvo konstanšu skaits ir mazāks, nekā formulā (1):



1. att. Nebalansēta daudzslāņu lokšņveida materiāla elementārkubs.

Fig. 1. A unit cube of unbalanced multilayer plate materials.

$$e_1^0 = a_{11}\sigma_1 + a_{12}\sigma_2 + a_{13}\sigma_3 + a_{16}\sigma_6 + b_{11}M_1 + b_{12}M_2 + b_{16}M_6; \quad (2)$$

$$e_2^0 = a_{21}\sigma_1 + a_{22}\sigma_2 + a_{23}\sigma_3 + a_{26}\sigma_6 + b_{21}M_1 + b_{22}M_2 + b_{26}M_6; \quad (3)$$

$$e_3^0 = a_{31}\sigma_1 + a_{32}\sigma_2 + a_{33}\sigma_3 + a_{36}\sigma_6 + b_{31}M_1 + b_{32}M_2 + b_{36}M_6; \quad (4)$$

$$e_4^0 = a_{44}\sigma_4 + a_{45}\sigma_5; \quad (5)$$

$$e_5^0 = a_{54}\sigma_4 + a_{55}\sigma_5; \quad (6)$$

$$e_6^0 = a_{61}\sigma_1 + a_{62}\sigma_2 + a_{63}\sigma_3 + a_{66}\sigma_6 + b_{61}M_1 + b_{62}M_2 + b_{66}M_6; \quad (7)$$

$$k_1 = c_{11}\sigma_1 + c_{12}\sigma_2 + c_{13}\sigma_3 + c_{16}\sigma_6 + d_{11}M_1 + d_{12}M_2 + d_{16}M_6; \quad (8)$$

$$k_2 = c_{21}\sigma_1 + c_{22}\sigma_2 + c_{23}\sigma_3 + c_{26}\sigma_6 + d_{21}M_1 + d_{22}M_2 + d_{26}M_6; \quad (9)$$

$$k_6 = c_{61}\sigma_1 + c_{62}\sigma_2 + c_{63}\sigma_3 + c_{66}\sigma_6 + d_{61}M_1 + d_{62}M_2 + d_{66}M_6. \quad (10)$$

kur:  $e_j^0$  - vidējo virsmu deformācijas,

$k_i$  - liekumi un vērpumi, kas rodas mitruma, temperatūras un citu faktoru izmaiņu rezultātā un ir atkarīgi no spriegumu  $\sigma_k$  un momentu  $M_i$  lieluma;

$a, b, c, d$  - padevīguma matricas komponentes.

Daudzslāņu lokšņveida koksnes materiālu formas veidošanās procesa neatņemama sastāvdaļa ir līmēšana, kā rezultātā lielākā vai mazākā mērā mainās slāņu fizikāli mehāniskās īpašības, veidojas līmes slāņi, mainās temperatūra, mitrums un to sadalījums, rodas iekšējie spriegumi un deformācijas. Atkarībā no līmes cietēšanas temperatūras izšķir līmēšanu bez preses plātņu papildus sildīšanas (aukstā līmēšana) un līmēšanu paaugstinātā temperatūrā (karstā līmēšana). Pēc salīmēšanas, ārējo spēku noņemšanas un izņemšanas no preses LKM deformējas. Deformācijas izraisa spriegumi, kas rodas slāņu mijiedarbības rezultātā, ja mainās slāņu

temperatūra, mitrums un ar tiem saistītās fizikāli mehāniskās īpašības. LKM liekumus  $k_1$ ,  $k_2$  un savērpumu  $k_6$  temperatūras un/vai mitruma izmaiņu rezultātā aprēķina attiecīgi pēc izteiksmēm (8; 9; 10), kur:  $c_{ik}$ ;  $d_{ij}$  - matricas, kas ietver slāņu fizikāli mehāniskās īpašības, elastības konstantes, ģeometriskos izmērus;  $M_1$ ;  $M_2$ ;  $M_6$  - lieces un vērpes momenti, kas rodas materiālā slāņu mitruma un temperatūras izmaiņu rezultātā (1. att.);

$$c_{ik} = [(BA^T B - D)^{-1} B A^T]_{ik};$$

$$d_{ij} = -(BA^T B - D)^{-1}_{ij}; \quad (k, l, j = 1, 2, 6),$$

$$A = (a_{ij}) = \sum_{i=1}^n [x_3^{(i)} - x_3^{(i-1)}] Q_{ij}^{(i)};$$

$$B = (b_{ij}) = 2^{-1} \sum_{i=1}^n [(x_3^{(i)})^2 - (x_3^{(i-1)})^2] Q_{ij}^{(i)};$$

$$D = (d_{ij}) = 3^{-1} \sum_{i=1}^n [(x_3^{(i)})^3 - (x_3^{(i-1)})^3] Q_{ij}^{(i)};$$

$x_3^{(i)}$ ,  $x_3^{(i-1)}$  -  $i$ -tā slāņa virsmu bezizmēra koordinātes  $x_3$  ass virzienā; ( $i, j = 1, 2, 6$ );

$$Q_{ij}^{(i)} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 \\ a_{21} & a_{22} & 0 \\ 0 & 0 & a_{66} \end{bmatrix}^{(i)} \quad (11)$$

kur:  $Q_{ij}^{(i)}$  -  $i$ -tā slāņa stinguma matrica;

$$a_{11} = 1/E_1; \quad a_{22} = 1/E_2; \quad a_{12} = a_{21} = -\mu_{21}/E_1; \quad a_{66} = 1/G_{12};$$

$E_1$  - elastības modulis  $x_1$  ass virzienā;

$E_2$  - elastības modulis  $x_2$  ass virzienā;

$\mu_{21}$  - Puasona koeficients;

$G_{12}$  - bīdes modulis  $x_1, x_2$  plaknē;

$$M_i = [m_{ij}] = 2^{-1} \sum_{i=1}^n [(x_3^{(i)})^2 - (x_3^{(i-1)})^2] \sigma_k; \quad (12)$$

$$\sigma_k = [\sigma_k] = \sum_{i=1}^n [x_3^{(i)} - x_3^{(i-1)}] \sigma_k^{(i)}; \quad (13)$$

$$\sigma_k^{(i)} = \sigma_k^*(T), \text{ ja mainās } T, \text{ bet } W = \text{const}; \quad (14)$$

$$\sigma_k^{(i)} = \sigma_k^*(W), \text{ ja mainās } W, \text{ bet } T = \text{const}; \quad (15)$$

$$\sigma_k^{(i)} = \sigma_k^*(T) + \sigma_k^*(W), \text{ ja mainās } W \text{ un } T; \quad (16)$$

kur:  $i, j = 1, 2$ ;  $\sigma_k^*(T)$  - termiskais spriegums  $i$ -tajā slānī;

$\sigma_k^*(W)$  - uzbriešanas vai sarukuma spriegums  $i$ -tajā slānī.

Vispirms aplūkosim daudzslāņu lokšņveida koksnes materiālu izlieci temperatūras izmaiņu ietekmē. LKM struktūra ir nebalansēta attiecībā pret slāņu klāšanas ģeometrisko vidus plakni jeb Dekarta koordinātu sistēmas plakni  $x_1, x_2$ . Slāņu materiāli ir ar ne zemāku par ortotropo simetriju pakāpi, orientēti simetriju asu virzienā (2. att.). LKM salīmēts ar karsto paņēmienu viendabīgā temperatūras laukā un pēc izņemšanas no preses to kondicionē, dzesējot viendabīgā temperatūras laukā. Šāda tipa daudzslāņu materiālā dotajā gadījumā tangenciālie spriegumi praktiski nerodas. Izlieces kvantitatīvu vērtējumu izsaka ar liekumiem  $k_1$ ,  $k_2$  un aprēķina, izmantojot sekojošas sakarības:

$$[k_k(T)] = [c_{ik}(T) \ d_{ij}(T)] \cdot \begin{bmatrix} \sigma_k(T) \\ M_i(T) \end{bmatrix}; \quad (17)$$

kur:  $c_{ik}$ ;  $d_{ij}$  - matricas, kas ietver slāņu deformatīvās īpašības, relatīvo biezumu un izvietojumu ( $i, k, j = 1, 2$ );

$\sigma_k$  - spriegumi, kas rodas materiālā slāņu temperatūras izmaiņu rezultātā;

$M_i$  - lieces momenti, kas rodas materiālā slāņu temperatūras izmaiņu rezultātā.



Piemēram konkrētāk izteiksim tikai vienu liekumu  $k_2$  :

$$k_2 = c_{21}\sigma_1 + c_{22}\sigma_2 + d_{21}M_1 + d_{22}M_2 ;$$

$$c_{2k} = [A^{-1}B(BA^{-1}B - D)^{-1}]_{2k};$$

$$d_{2k} = -(BA^{-1}B - D)^{-1}_{2k}; (k=1,2)$$

$$A = (a_{2j}) = \sum_{i=1}^n [x_3^{(i)} - x_3^{(i-1)}] Q_{2j}^{(i)} ; (j=1,2)$$

$$B = (b_{2j}) = 2^{-1} \sum_{i=1}^n [(x_3^{(i)})^2 - (x_3^{(i-1)})^2] Q_{2j}^{(i)} ;$$

$$D = (d_{2j}) = 3^{-1} \sum_{i=1}^n [(x_3^{(i)})^3 - (x_3^{(i-1)})^3] Q_{2j}^{(i)} ;$$

$x_3^{(i)}, x_3^{(i-1)}$  -  $i$ -tā slāņa virsmu bezizmēra koordinātes  $x_3$  ass virzienā.

$$Q_{2j}^{(i)} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}^{(i)} \quad (18)$$

kur:  $a_{11} = 1/E_1$ ;  $a_{12} = a_{21} = -\mu_{21}/E_1$ ;  $a_{22} = 1/E_2$ ;

$E_1$  - elastības modulis  $x_1$  ass virzienā;

$E_2$  - elastības modulis  $x_2$  ass virzienā;

$\mu_{21}$  - Puasona koeficients ;

$$M_i = [m_i] = 2^{-1} \sum_{i=1}^n [(x_3^{(i)})^2 - (x_3^{(i-1)})^2] \sigma_k ; \quad (19)$$

$$\sigma_k = [\sigma_k] = \sum_{i=1}^n [x_3^{(i)} - x_3^{(i-1)}] \sigma_k^{(i)} ; \quad (20)$$

$$\sigma_k^{(i)} = \sigma_k^{*(i)}(T) ; \quad (21)$$

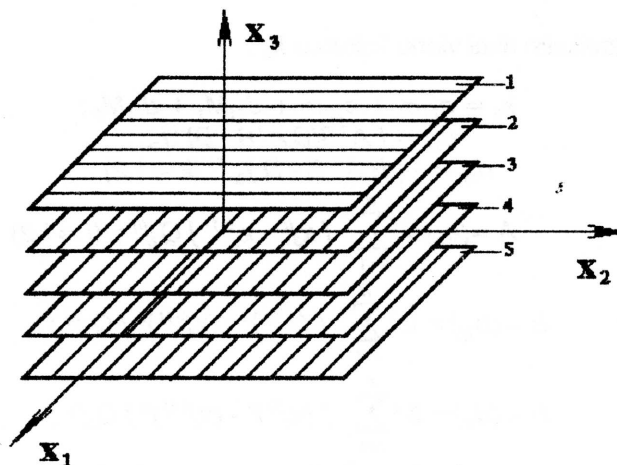
kur  $k, j, i = 1,2$ ;  $\sigma_k^{*(i)}(T)$  - termiskais spriegums  $i$ -tajā slānī.

### 3. Metodes un rezultāti

Lai novērtētu piedāvātā modeļa piemērotību strukturāli nebalansētu LKM formas veidošanas aprēķiniem, pētīta temperatūras ietekme uz dažāda tipa daudzslāņu materiālu izlieces lielumu un izlieces regulēšanas iespējas, izmantojot augstāk aprakstītā materiāla modeli un aprēķinu metodiku. Praktiski realizēt šādus eksperimentus ir ļoti sarežģīti, jo, mainoties temperatūrai, mainās arī LKM slāņu temperatūra, mitrums un to sadalījums materiālā. Pieņem, ka temperatūra un mitrums iedarbojas viens no otra neatkarīgi. Pēc B. Ugoļeva (Б. Н. Уголев, 1975.) datiem ir jāievērtē arī abu šo faktoru vienlaicīgas iedarbības efekts. Līmēšanas procesā mainās līmes slāņu mitrums un stingums. Presēšanas procesā mainās koksnes blīvums un struktūra.

Analizēsim gadījumu, kad līmēšanas process notiek pie preses plātņu temperatūras 140 °C un LKM liekumu novērtē tajā brīdī, kad materiāls visā tilpumā atdzisis līdz 20 °C temperatūrai. LKM sagatave sastāv no 5 lobīta 1.5 mm bieža bērza finiera slāņiem. Līmes slāņi ir izvietoti simetriski un to biezums ir 0.1 mm. Finiera slāņu orientācija attiecībā pret Dekarta koordinātu sistēmas asi  $x_1$  ir sekojoša: 1.- 90°, 2.,3.,4.,5. - 0° (2. att.) jeb, izejot no koksnes šķiedru virziena, - t-a-a-a-a.

Aprēķinos izmanto bērza koksnes deformatīvo īpašību vērtības normālos apstākļos, t.i., pie temperatūras 20 °C un relatīvā gaisa mitrums 65 % (koksnes mitrums -12 %) -  $E_1 = E_a = 16.4$  GPa;  $E_2 = E_t = 0.5$  GPa;  $\mu_{21} = \mu_{1a} = -0.45$ . Uzreiz pēc izņemšanas no preses salīmētie LKM ir plakani un to masa apmēram 1 min. laikā samazinās par aptuveni 0.5 %. Šai laikā no materiāla virsmas



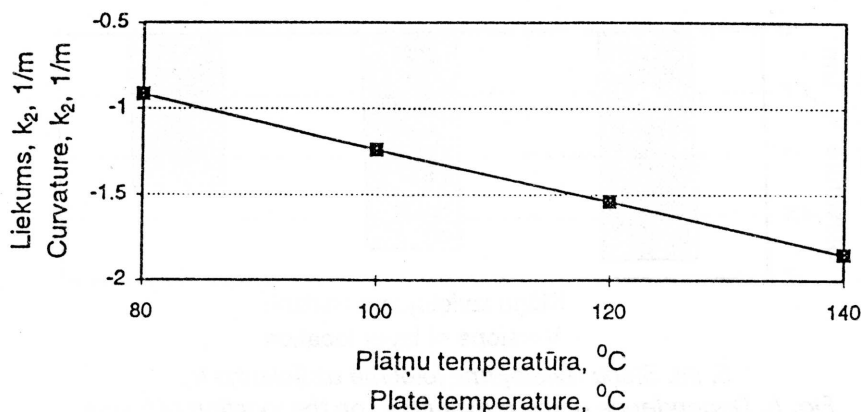
2. att. Slāņu izvietojums pēc shēmas t-a-a-a.  
Fig. 2. Location of layers, scheme t-a-a-a.

izdalās mitrums, analogi kā žāvējot lokšņveida koksnes materiālus ar elpināšanas paņēmieni. LKM ārējo slāņu mitrums šajā laikā samazinās par aptuveni 1.5 % un tie cenšas sarukt. Rezultātā ārējos slāņos rodas rukuma spriegumi, jo to rukumu kavē blakus esošie slāņi, kuru mitrums tik īsā laika sprīdī neizmainās.

Termisko spriegumu materiālā izraisa temperatūras izmaiņu rezultātā radušās slāņu termiskās deformācijas, slāņu mitruma izmaiņas, līmes slāņu rukums, temperatūras un mitruma vienlaicīgas izmaiņas. Lai novērtētu katra iepriekšminētā faktora ietekmi uz LKM liekumu, aprēķini veikti ar dažādiem nosacījumiem. 1. variantā pieņem, ka termiskais spriegums rodas tikai tāpēc, ka slāņainā materiālā nevar brīvi realizēties termiskās deformācijas. Šādā gadījumā aprēķinātais pētāma materiāla liekums  $k_2$  pēc atdzišanas vienāds ar  $-0.925 \text{ m}^{-1}$ . 2. variantā pieņem, ka termiskais spriegums summējas no nerealizēto termisko deformāciju un rukuma deformāciju radītiem spriegumiem. Tad aprēķinātais liekums  $k_2$  pēc atdzišanas ir  $-1.85 \text{ m}^{-1}$ . 3. variantā bez abiem iepriekš minētajiem faktoriem ievērtē arī spriegumus, ko izsauc līmes slāņu rukums. Tādā gadījumā aprēķinātais liekums  $k_2 = -1.904 \text{ m}^{-1}$ . 4. variantā ievērtē nerealizēto termisko deformāciju un līmes slāņu rukuma radītos spriegumus. Rezultātā aprēķināts, ka liekums  $k_2 = -1.186 \text{ m}^{-1}$ . 5. variantā ievērtē nerealizēto termisko deformāciju, finiera slāņu rukuma, līmes slāņu rukuma un vienlaicīgas koksnes temperatūras un mitruma izmaiņu radītos spriegumus. Šādā gadījumā aprēķinātais liekums  $k_2 = -1.982 \text{ m}^{-1}$ .

Termisko deformāciju izsauktos spriegumus strukturāli nebalansēta LKM slāņos nosaka kā  $i$ -tā slāņa termiskās deformācijas reizinājumu (bērza koksnei termiskās izplešanās koeficients tangenciālā virzienā -  $30 \cdot 10^{-6}/1^\circ\text{C}$ , bet aksiālajā -  $2.5 \cdot 10^{-6}/1^\circ\text{C}$ ) (B. Ugoļevs, 1975) ar  $i$ -tā slāņa stinguma matricu. Iegūtie rezultāti atbilst V. Kokocinska (W. Kokocinski, 1997) eksperimentāli noteikto termisko spriegumu vērtībām. Slāņu rukuma spriegumu aprēķina tāpat kā spriegumus koksnes ārējos slāņos žāvēšanas procesā, izmantojot B. Ugoļeva u.c. metodiku (Б. Уголев, Ю. Лапшин, Е. Кротов, 1980). Turpat ir doti dati un formula mitruma un temperatūras mijiedarbības novērtēšanai. Līmes slāņu rukuma laikā radušos spriegumus pētījuši A. Freidins, K. Vuba (А. Фрейдin, К. Вуба, 1980).

Modelējot materiāla deformēšanos temperatūras izmaiņu rezultātā, variē ar materiāla temperatūras izmaiņām, slāņu materiāla biezumu, slāņu skaitu, orientāciju un izvietojumu. Pirmajā piemērā aprēķināsim, kā mainās augstāk aprakstītā LKM liekums  $k_2$  pēc atdzišanas līdz  $20^\circ\text{C}$  temperatūrai, ja to izgatavojot preses plātņu temperatūra ir  $140; 120; 100; 80^\circ\text{C}$ . Aprēķini veikti, izmantojot augstāk pieminētā 2. varianta pieņēmumus. Rezultāti par plātņu temperatūras ietekmi uz LKM liekumu parādīti 3. attēlā.

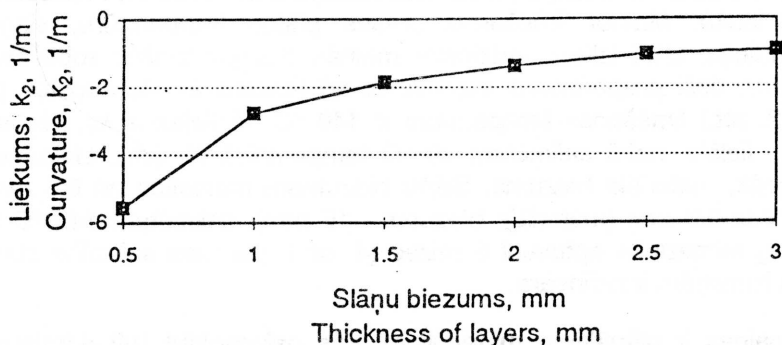


3. att. Liekuma  $k_2$  atkarība no plātņu temperatūras.

Fig. 3. Dependence of the curvature  $k_2$  on the plate temperature.

3. attēlā redzam, ka augstāk aprakstītā LKM liekums  $k_2$  pēc loksnes atdzišanas līdz istabas temperatūrai (20 °C) ir negatīvs (pēc materiālu pretestības teorijas pieņēmuma) un pieaug tieši proporcionāli preses plātņu temperatūras pieaugumam.

Lai novērtētu slāņu biezuma izmaiņu ietekmi uz karsti līmētu LKM liekumu, nosaka liekumus 5-slāņu materiāliem ar iepriekš aprakstītiem nosacījumiem, ja slāņu biezums ir 0.5; 1.0; 1.5; 2.0; 2.5; 3.0 mm, bet preses plātņu temperatūra ir 140 °C. Aprēķinu rezultāti parādīti 4. attēlā.



4. att. Liekuma  $k_2$  atkarība no slāņu biezuma.

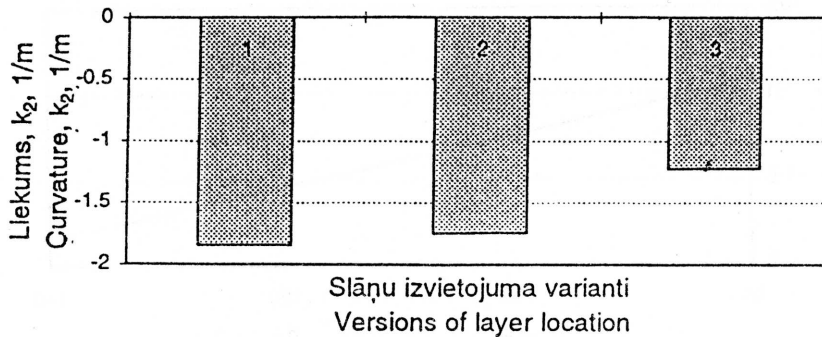
Fig. 4. Dependence of the curvature  $k_2$  on the thickness of layers.

Kā redzams 4. attēlā, pieaugot slāņu biezumam no 0.5 mm līdz 3.0 mm, 5 slāņu LKM liekums  $k_2$  samazinās aptuveni 5 reizes un šī sakarība nav lineāra.

Slāņu izvietojuma ietekme uz LKM liekumu aprēķināta trīs veidu materiāliem, kurus raksturo šādi slāņu izvietojuma varianti: 1. - t-a-a-a-a; 2. - a-t-a-a-a; 3. - t-t-a-a-a. Preses plākšņu temperatūra ir 140 °C. Pārējie nosacījumi saglabāti kā pirmajā piemērā. Rezultāti parādīti 5. attēlā.

Rezultāti liecina, ka slāņu izvietojums būtiski ietekmē strukturāli nebalansētu LKM izlieci temperatūras izmaiņu rezultātā.

Aprēķinu rezultātu ticamības pārbaudei eksperimentāli pētīta no lobītu bērza finieru slāņiem salīmētu strukturāli nebalansētu saplākšņu formas maiņa, atdziestot viendabīgā temperatūras laukā. Finieru mitrums pirms līmes uzklāšanas -  $6 \pm 1$  %. Līmēšanai izmantota ūdensizturīgā fenolformaldehīda līme SFŽ-3014 ar sausnes saturu 52 %. Finieru biezums -  $1.5 \pm 0.1$  mm, slāņu skaits - 5, slāņu izvietojums - t-a-a-a-a atbilst 2. attēlā parādītajam. Līmi uzklāj abpusēji katram otrajam slānim, tā rezultātā finiera slāņu mitrums paketē pieaug līdz  $9 \pm 1$  %. Mitruma izmaiņu noteikšanai izmantota svēršanas metode. Preses plātņu temperatūra -  $140 \pm 5$  °C, presēšanas spiediens - 2 MPa, izturēšanas laiks - 7 min. Finiera slāņi presēšanas rezultātā nedaudz



5. att. Slāņu izvietojuma ietekme uz liekumu  $k_2$ .  
Fig. 5. Dependence of the curvature  $k_2$  on the location of layers.

deformējas un pēc salīmēšanas materiāla biezums ir  $7.0 \pm 0.2$  mm. Atdziestot gaisā  $20$  °C temperatūrā, izgatavotā saplākšņa liekums  $k_2$  stabilizējas pēc 25 min, sasniedzot vērtību  $-1.97 \pm 0.06$   $m^{-1}$  (liekuma rādītājs  $R=1/k=-0.51 \pm 0.016$  m). Eksperimenta rezultātu ticamības varbūtība – 0.95. Liekuma  $k_1$  un vērpusa  $k_6$  praktiski nav.

#### 4. Rezultātu analīze

Pētījumu rezultāti liecina, ka termiskā sprieguma lieluma, slāņu skaita, izvietojuma vai orientācijas izmaiņas būtiski ietekmē strukturāli nebalansētu daudzslāņu LKM izlieci arī atdziestot viendabīgā ārējā temperatūras laukā. Mainot līmēšanas preses plātņu temperatūru, slāņu biezumu, izvietojumu vai orientāciju, LKM izliece atdziestot mainās diezgan plašās robežās. Samazinot līmēšanas temperatūru, tieši proporcionāli samazinās arī liekums  $k_2$ . Ja augstāk pieminētā 5-slāņainā materiāla (2. att.) līmēšanas temperatūra ir  $140$  °C, tā liekums  $k_2$  pēc atdzišanas ir aptuveni divas reizes lielāks nekā salīmētam  $80$  °C temperatūrā (3. att.). Liekumu ļoti būtiski ietekmē slāņu, precīzāk, materiāla biezums. Slāņu biezumam mainoties no  $0.5$  mm (materiāla biezums ir  $2.5$  mm) līdz  $3.0$  mm (materiāla biezums –  $15$  mm), salīmētam  $140$  °C temperatūrā materiālam liekums  $k_2$  samazinās aptuveni 5 reizes (4. att.), pie kam sakarība starp materiāla biezuma un liekuma izmaiņām ir nelineāra.

Lielākas liekuma izmaiņas ir plānākiem materiāliem, kas galvenokārt izskaidrojams ar plātņu lieces pretestības palielināšanos proporcionāli to biezumam kvadrātā. Slāņu izvietojums strukturāli nebalansētā bērza saplākšņī arī ietekmē tā liekumu. 5. att. uzdotas liekuma  $k_2$  vērtības 3 materiālu veidiem. Maksimālā izliece ir materiālam, kuram ir tikai viens pret  $x$ , asi tangenciāli orientēts slānis un tas ir maksimāli novirzīts no materiāla vidusplaknes. Salīdzinot strukturāli nebalansētu 5-slāņu saplākšņa liekumu  $k_2$ , kas noteikts eksperimentāli ( $k_2=1.97 \pm 0.06$   $m^{-1}$ ) un aprēķināts, izmantojot augstāk aprakstītās matemātiskās sakarības pie dažādiem nosacījumiem, var secināt, ka, aprēķinot termiskos spriegumus slāņos, jāievērtē nerealizēto termisko deformāciju, koksnes slāņu rukuma, līmes slāņu rukuma, kā arī vienlaicīgu koksnes temperatūras un mitruma izmaiņu radītos spriegumus. Tādā gadījumā aprēķinātā liekuma  $k_2=-1.982$   $m^{-1}$  vērtība atbilst eksperimentāli noteiktam liekumam.

Ja, aprēķinot termisko spriegumu, ievērtē tikai koksnes slāņu temperatūras izmaiņu radītos spriegumus, iegūst par 113 % samazinātu liekuma vērtību. Aprēķinot LKM liekumu pēc 2. varianta, pieņemot, ka jāievērtē tikai koksnes slāņu temperatūras izmaiņu un ārējo slāņu rukuma radītie spriegumi, iegūstam, ka liekums  $k_2=-1.85$   $m^{-1}$ . Šādi aprēķinātā liekuma vērtība ir par 6.5 % mazāka par eksperimentāli noteikto. Ja ievērtē nerealizēto termisko deformāciju, koksnes slāņu un līmes slāņu rukuma radītos spriegumus, aprēķinātais liekums  $k_2=-1.904$   $m^{-1}$ , kas mazāks par eksperimentālo tikai par 3.5 %. Ievērtējot tikai nerealizēto termisko deformāciju un līmes slāņu rukuma radītos spriegumus, iegūst par 66 % samazinātu liekuma vērtību. Iegūtie rezultāti liecina, ka aplūkotajā gadījumā visbūtiskāk strukturāli nebalansēta LKM liekumu ietekmē tā temperatūras un mitruma izmaiņas, kā arī materiāla biezums un slāņu savstarpējais izvietojums.

Dažādi citi piedāvātās metodes realizācijas piemēri un algoritms nepieciešamā rezultāta sasniegšanai aprakstīti LV Patentā Nr 12104, kas izdots G. Vērdiņam u.c. (G. Vērdiņš, K. Rocēns, J. Brauns, 1998). Iegūtie rezultāti liecina, ka piedāvātais materiāla modelis un aprēķinu metodika var tikt lietoti šāda tipa materiālu deformāciju prognozēšanai.

## 5. Secinājumi

1. Nebalansētu slāņainu kompozītu materiālu deformēšanās teorija ir lietojama strukturāli nebalansētu daudzslāņu lokšņveida koksnes materiālu deformāciju aprēķiniem.
2. Strukturāli nebalansētu daudzslāņu lokšņveida koksnes materiālu formas projektēšana un veidošana ir sarežģīts uzdevums, jo šāda tipa materiālu deformācijas ir atkarīgas no ļoti daudziem faktoriem un šo faktoru mijiedarbības.
3. Iegūtie rezultāti liecina, ka strukturāli nebalansētu LKM spriegumstāvokļa prognozēšanai izmantotais teorētiskais pamatojums un modelis dod iespēju aprēķināt šādu materiālu deformācijas dažādu faktoru izmaiņu rezultātā, kā arī veidot to formu, variējot ar slāņu izvietojumu, orientāciju, ģeometriskiem izmēriem, fizikāli mehāniskām īpašībām un citiem parametriem.
4. Lai praksē varētu lietot strukturāli nebalansētu LKM formas veidošanas iespējas un saīsinātu projektēšanas procesu, jāizpēta šādu materiālu deformēšanās likumsakarības, jānosaka galveno formu noteicošo faktoru ietekmi, jāizstrādā aprēķinu metodika un skaitļošanas programmas, jāizveido nepieciešamo datu bāze un jāizstrādā izgatavošanas tehnoloģija.

## Literatūra

1. Brauns J. and Rocens K. (1994). Hygromechanics of composite with unsymmetric structure. *Mechanics of Composite Materials*. Vol. 30, N 6. 831-838.
2. Kokocinski W. (1997). Effect of temperature on thermal stresses across the grain of wood. Preliminary study. *Drevarsky vyskum*, 42(4). 3-13.
3. Reissner E., Stavsky I. (1961). Bending and stretching of certain types of heterogeneous anisotropic elastic plates. *Trans. ASME. Ser.E*, vol. 28, N 3. 402-408.
4. Vērdiņš G., Rocēns K., Brauns J. (1998). Liektu daudzslāņu lokšņveida sagatavju/detaļu uz koksnes bāzes izgatavošanas paņēmieni. LV Patents Nr 12104.
5. Xu D. and Suchsland O. (1996). A modified elastic approach to the theoretical determination of the hygroscopic warping of laminated wood panels. *Wood and Fiber Science*, 28(2). 194-204.
6. Лехницкий С. Г. (1947). Анизотропные пластинки. М.-Л., Гостехиздат. 355.
7. Роценс К. А., Штейнерс К. Н. (1976). Оценка податливости и жесткости несбалансированных моноклинных композиций. Рига, *Механика полимеров*, № 6, 1030-1035.
8. Роценс К. А., Штейнерс К. Н., Вердиньш Г. С. (1977). Определение коробления моноклинной слоистой композиции в зависимости от нарушения сбалансированности структуры. *Механика композитных материалов*. Рига, РПИ, вып.1. 154-158.
9. Роценс К. А. (1979). Технологическое регулирование свойств древесины. Рига, Зинатне. 224.
10. Роценс К. А., Браунс Я. А., Вердиньш Г. С. (1997). Закономерность деформирования древесины с искусственно измененной структурой. М. 2-й международный симпозиум "Строение, свойства и качество древесины", Труды. 215-219.
11. Штейнерс К. Н., Роценс К. А. (1973). Основные компоненты матрицы податливости слоистой композиции с моноклинной симметрией. Получение, свойства и применение модифицированной древесины. Рига, Зинатне. 103-110.
12. Уголев Б. Н. (1975). Древесиноведение с основами лесного товароведения. М., Лесная промышленность. 384.



13. Уголев Б. Н., Лапшин Ю. Г., Кротов Е. В. (1980). Контроль напряжений при сушке древесины. М., Лесная промышленность. 208.
14. Фрейдин А. С., Вуба К. Т. (1980). Прогнозирование свойств клееных соединений древесины. М., Лесная промышленность. 224.