

## Spriegumi koksne ierobežotu mitruma deformāciju gadījumā Stresses of limited deformation in moistured wood

Gunārs Vērdiņš

LLU Spēkratu institūts, e-pasts: spek@cs.llu.lv  
Motor Vehicle Institute, LLU, e-mail: spek@cs.llu.lv

Ivars Akerfelds, Igors Tihomirovs

LLU Kokapstrādes katedra, e-pasts: ivars.akerfelds@ktc.lv  
Department of Wood Processing, LLU, e-mail: ivars.akerfelds@ktc.lv

**Abstract.** The article presents the method to determine the stress in wood-based materials, what appears in limited swelling deformation across fibres. The method is based on the assumption, that the stress of limited swelling deformation is equal to the stress of pressing till the initial size with the speed equal to wood swelling speed ( $\leq 1 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ ). The results of experiments were utilized to test the suitability of hypothesis. The  $\sigma$ - $\epsilon$  curves of birch (*Betula verrucosa*) were obtained (under different moisture content conditions). The method is suitable to determine stresses during full and partial limited deformations in moistured wood. The data obtained during the experiments are practically useful (for example, to notice stresses in sawn timber or in composite materials during variable moisture content conditions).

**Key words:** stress in wood, limited deformation, moisture, time.

### Ievads

Koksne, kā jebkurš higroskopisks materiāls, mitruma izmaiņu rezultātā uzbriest vai sarūk, un, ja šīs deformācijas materiāla īpašību anizotropijas, mitruma nevienmērīgā sadalījuma vai konstruktīvu saišu pretdarbības rezultātā ir ierobežotas, spriegumi koksne un koksnes materiālos veidojas bez ārēju spēku iedarbības. Šo spriegumu noteikšana ir sarežģīts uzdevums, jo tieši tos izmērīt nevar. Problēmas risināšana ievērojami sarežģījas, ja ievērtē apstākli, ka koksne ir materiāls ar reonomām īpašībām un pilnībā vēl nav izziņāts mitruma izmaiņu radīto deformāciju veidošanās mehānisms. Turklāt atšķirīgi ir spriegumu veidošanās procesi mitruma pieauguma un samazināšanās rezultātā. Atšķirības galvenokārt saistītas ar atskaites sistēmas izvēli un nozīmīgākā sprieguma veidu. Mitrināšanas procesos parasti par atskaites punktu pieņem absolūti sausu koksni jeb koksnes minimālo mitrumu un nosaka spiedes spriegumus. Žāvēšanas procesos par atskaites sākuma punktu pieņem koksnes šķiedru piesātinājuma punktu un nosaka stiepes spriegumus. Daudzos gadījumos koksnes materiālos vienlaicīgi darbojas gan spiedes, gan stiepes spriegumi. Lai vienkāršotu analīzi, katru procesu analizē atsevišķi.

Spriegumus, kas koksne rodas, ierobežojot mitrināšanas procesā izveidojušās uzbriešanas deformācijas, var pētīt eksperimentāli ar uzbriešanas spiediena noteikšanas paņēmieni. Diemžēl, iegūtie rezultāti būtiski atšķiras atkarībā no noteikšanas metodikas (mitrināšanas veida, sākuma mitruma, pieļautās deformācijas lieluma, parauga izmēriem, mērīšanas bāzes izvēles un citiem faktoriem) [1., 2., 3.,

4.]. Tāpēc esošos datus nevar viennozīmīgi izmantot, lai prognozētu spriegumu veidošanos ierobežotu uzbriešanas deformāciju gadījumā un lai modelētu spriegumstāvokli masīvas koksnes, zāģmateriālu, slāņainu, šķiedrveida un dispersu kompozītmateriālu tilpumā vai atsevišķā slānī tehnoloģisku faktoru un ekspluatācijas apstākļu iedarbības rezultātā. Šādu uzdevumu risināšanā izmanto dažādas materiālu uzvedības modelēšanas metodes. Visplašāk koksnes materiālu spriegumstāvokļa analīzē pielieto fenomenoloģisko pieeju un mehāniskos modeļus.

Koksnes strukturālo stāvokli un deformācijas procesu aprakstošie parametri laikā mainās, un to aprakstīšanai iesaka izmantot kinētiskos vienādojumus [5.]. Šo vienādojumu atrisināšana pat vienasīga sloģojuma gadījumā ir sarežģīts uzdevums, kuru var veikt, pieļaujot virkni ierobežojumu un tuvinājumu. Lai varētu šos vienādojumus izmantot, jānosaka ievērojams skaits materiālu raksturojošo parametru, tai skaitā arī reoloģisko koeficientu. Piemēram, lai noteiktu deformācijas anizotropos materiālos ar reonomām īpašībām, kas aprakstāmi ar Maksvela-Tomsona vienādojumiem un uzvedas kā lineāri ķermeņi, ja ievērtē tikai lineāros locekļus un viskoelastību, nepieciešams zināt 126 neatkarīgus koeficientus, no kuriem 42 ir relaksācijas laika koeficienti [6.]. Turklāt liels koeficientu skaits ar katra precizitātes rādītājiem arī ienes papildus kļūdas, kā rezultātā aprēķinātā lieluma dispersija ir tik liela, ka precīzās aprēķinu metodes pielietošana ne vienmēr attaisnojas. Pēc vadošo [5., 7., 8., 9., 18.] koksnes pētnieku atzinumiem koksnes uzvedību nevar aprakstīt ar polimēru mehānikā izmantojamiem modeļiem un vienādojumiem, jo koksnes elastīgo, viskoelastīgo un

paliekošo deformāciju veidošanās mehānisms būtiski atšķiras. Koksnes materiāliem sakarības starp spriegumiem un deformācijām mainās laikā un ir atkarīgas arī no mitrināšanas režīma, mitruma izmaiņu ātruma, sprieguma lieluma, fizikāli mehāniskām īpašībām, sākuma mitruma, priekšvēstures, temperatūras un citiem faktoriem. Sakarības starp spriegumiem un deformācijām izsaka, izmantojot reoloģijas metodes [5., 7., 8., 10., 11., 12.]. Pētīt spriegumstāvokli koksne šķērsām šķiedrām, piedāvā modeļus, kuru pielietošana iespējama tikai pēc plašas koksnes reoloģisko īpašību eksperimentālo pētījumu veikšanas, un pašreiz praktiski nevienai koku sugai šāda aprēķiniem nepieciešamā datu komplekta nav.

Tā kā koksnes materiālu apstrādes, veidošanas un izmantošanas optimālie risinājumi vēl nav atrasti, metode šādu spriegumu noteikšanai ir ļoti vajadzīga un nākas meklēt vienkāršotus risinājuma paņēmienus. Viens no iespējamiem spriegumu novērtēšanas paņēmieniem ir eksperimentālo pētījumu un teorētisko rezultātu izmantošana, ievērtējot attiecīgā materiāla īpatnības, laika un ārējo faktoru ietekmi.

## Teorētiskais pamatojums

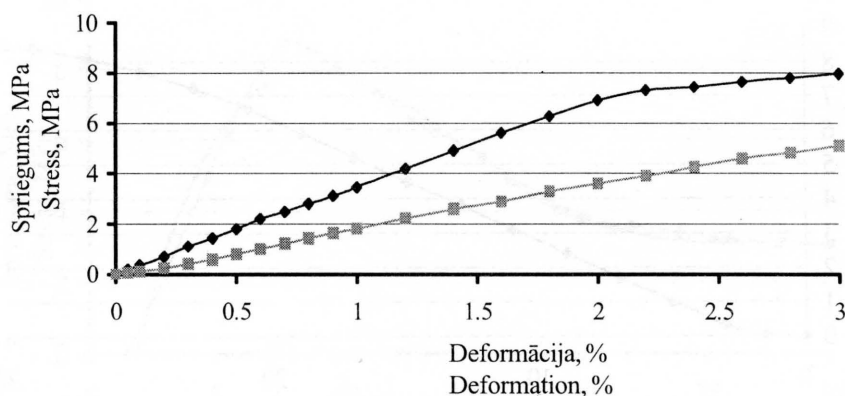
Spriegums, kas rodas koksne un uz tās bāzes veidotos materiālos, mitruma deformāciju ierobežošanas gadījumos viennozīmīgi nekorelē ne ar materiāla blīvumu, ne ar mitrumu, ne ar uzbriešanas deformācijām, ne ar elastības moduli. Sprieguma veidošanās process visvairāk līdzinās materiāla slogošanai spiedē, taču šajos procesos ir arī vairākas atšķirības: spiedes pārbaudēs mitrums ir nemainīgs, slogošanu veic ar ievērojami lielāku ātrumu nekā notiek sprieguma veidošanās ierobežotu mitruma deformāciju veidošanās gadījumā, atšķiras paraugu izmēri, deformācijas, slogojot spiedē (50% un vairāk), var ievērojami pārsniegt uzbriešanas deformācijas. Turklāt spiedes pārbaudēs iedarbojas ārēja slodze, kas darbojas pēc uzdotas programmas un kuras lielums nav atkarīgs no materiāla īpašībām, turpretī spriegums, kas rodas ierobežotu mitruma deformāciju rezultātā, ir atkarīgs no koksnes struktūras, mehāniskajām un reoloģiskajām īpašībām. Lai maksimāli ievērtētu šīs atšķirības un tuvinātos apstākļiem, kādos rodas spriegumi ierobežotu mitruma deformāciju gadījumā, modelējot pieņem, ka koksne ir materiāls ar reonomām īpašībām; mitruma deformācijas sāk izpausties, ja koksnes mitruma saturs ir  $>1.5\%$ ; uzbriešanas deformācijas nepārsniedz  $10\%$  un rodas no mitrināšanas gaisā ar noteiktu relatīvo mitrumu; spriegums rodas tikai no uzbriešanas deformācijas ierobežošanas; ir vienasīgs un viendabīgs spriegumstāvoklis; temperatūra ir nemainīga un normāla; spriegumstāvoklis ir analogs spiedes slogojumam; noslogotas koksnes deformēšanās ir vienāda ar brīvo uzbriešanu; deformācijas ir ierobežotas tikai šķērsām šķiedrām tangenciālā virzienā; mitruma

sadalījums koksne ir vienmērīgs. Metodikas pamatā ir pieņēmums, ka spriegums, kas rodas materiālā uzbriešanas deformāciju ierobežošanas gadījumā, ir vienāds ar spriegumu, kas rodas, deformējot to spiedē līdz sākuma izmēriem ar ātrumu, kas vienāds ar koksnes uzbriešanas ātrumu. Šāds deformēšanas ātrums ( $\leq 1.10^{-6} \text{ s}^{-1}$ ), pēc literatūras datiem [15.], atbilst ilglai cīgai slogošanai un nodrošina arī paliekošo deformāciju izveidošanos.

Mitruma deformāciju ierobežošanas dēļ radušos spriegumu lielums ir atkarīgs no koksnes struktūras, sākuma mitruma, mitrināšanas veida, ierobežotās deformācijas lieluma, materiāla pirmsapstrādes tehnoloģijas un īpašībām. Tāpēc katrai koku sugai sakarības starp spriegumiem un deformācijām var būtiski atšķirties. Spriegumstāvokli konkrētas koku sugas materiālā var noteikt eksperimentāli, slogojot spiedē paraugus ar fiksētu mitruma saturu ar ātrumu, kas vienāds ar uzbriešanas deformācijas ātrumu. Iegūtās  $\sigma$ – $\epsilon$  līknes var aprakstīt ar matemātiskām sakarībām un no tām analītiski noteikt spriegumus, kas nepieciešami uzbriešanas deformāciju pilnīgai vai daļējai ierobežošanai. No iegūtajām  $\sigma$ – $\epsilon$  līknēm, izmantojot jau aprobētu metodiku [13.], spriegumus koksne ierobežotu mitruma deformāciju gadījumā var noteikt arī grafoanalītiski.

## Pētījumu metodika

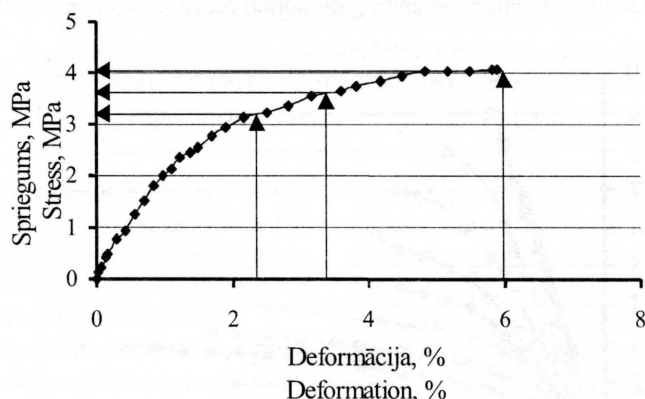
Lai pārbaudītu izvirzītās hipotēzes piemērotību spriegumu noteikšanai ierobežotu mitruma deformāciju gadījumā, veic materiāla deformēšanās procesa eksperimentālus pētījumus. Pētāmais objekts ir bērza koksne (*Betula verrucosa*). Paraugus ar spiedes pārbaudēm atbilstošiem izmēriem  $20 \times 20 \times 60 \text{ mm}$  (attiecīgi radiālā, aksiālā un tangenciālā virzienā) izžāvē līdz absolūti sausam stāvoklim, izmēra gabarītus, nosver, parauga vidusdaļā ar bāzes garumu  $30 \text{ mm}$  piestiprina mērplāksnītes un uz tām atzīmē mērījumu atskaites līniju. Pēc tam paraugus ievieto eksikatorā virs sāļu šķīdumiem un mitrina līdz nepieciešamā mitruma satura sasniegšanai, kondicionē līdz mitrums parauga tilpumā izlīdzinās, nosaka izmērus un uzbriešanas deformācijas lielumu. Parauga vidusdaļā ar bāzes garumu  $30 \text{ mm}$  piestiprina deformāciju mērierīci, paraugu pārklāj ar polietilēna plēvi un tad slogo to spiedē ar deformēšanas ātrumu, kas salīdzināms ar materiāla brīvas uzbriešanas deformācijas ātrumu  $1.10^{-6} \text{ s}^{-1}$ , kamēr uzbriešanas deformācija ir pilnīgi kompensēta. Pieraksta spēka un deformāciju izmaiņas. No iegūtajiem datiem aprēķina  $\sigma$ – $\epsilon$  līknes parametrus. Analógiski iegūst līknes paraugiem ar dažādu mitruma saturu visā saistītā mitruma izmaiņu diapazonā, kā arī  $\sigma$ – $\epsilon$  līknes, mērot deformācijas visā parauga garumā. Šķērsspēku ietekme parādās, salīdzinot pie vienāda mitruma satura iegūtās  $\sigma$ – $\epsilon$  līknes, kas uzņemtas parauga vidusdaļā un visā parauga garumā. No iegūtajiem rezultātiem izveido  $\sigma$ – $\epsilon$



1. att. Spriegumu un deformāciju izmaiņas bērza paraugā ( $W=10\%$ ),

slogojot tangenciālā virzienā, ja deformācijas mēra parauga vidusdaļā ( $-\diamond-$ ) un visā garumā ( $-\square-$ ).

Fig. 1. Changes of stresses and deformations in birch ( $W=10\%$ ), putting a load on tangential direction, if deformations are measured in the middle of a specimen ( $-\diamond-$ ), or all over the length ( $-\square-$ ).



2. att. Spriegumu noteikšanas shēmas bērza koksnei tangenciālā virzienā,

ja deformāciju mēra parauga vidusdaļā un galīgais mitrums ir 19%:

pilnīgas ( $\epsilon=5.9\%$ ) vai daļējas ( $\epsilon=2.4\%$ ) uzbriešanas deformāciju ierobežošanas gadījumos, kā arī pie nosacījuma, ka sākuma mitrums ir 9% ( $\epsilon=3.5\%$ ).

Fig. 2. Stress determination schemes for birch wood on tangential direction, if deformation is measured in the middle of a specimen till the moisture content is 19%: in cases of full ( $\epsilon=5.9\%$ ) or partial ( $\epsilon=2.4\%$ ) limited swelling deformations, or if the initial moisture content is 9% ( $\epsilon=3.5\%$ ).

līkņu saimi. Šīs līknes izmanto spriegumu noteikšanai ar grafoanalītisko paņēmieni.

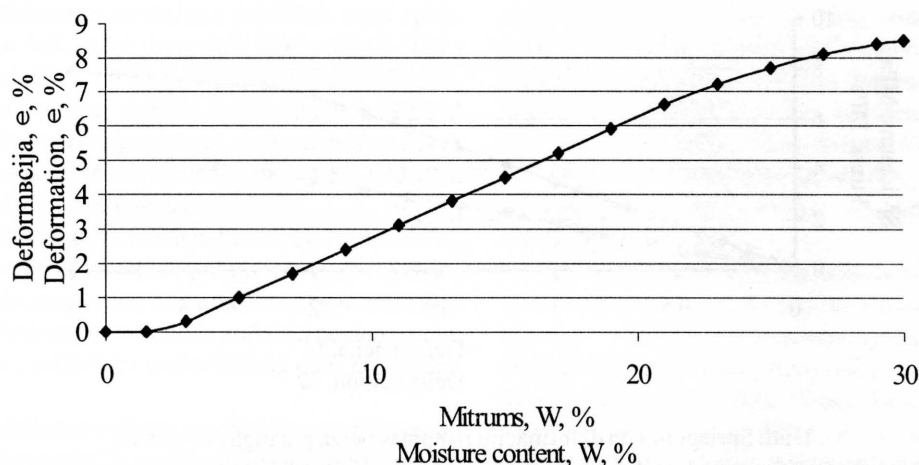
Lai spriegumu vērtības varētu noteikt analītiski, katrai  $\sigma$ - $\epsilon$  līknei piemeklē to aprakstošu vienādojumu. Spriegumu nosaka no aprakstošā vienādojuma, aprēķinot funkcijas vērtības pieaugumu starp augšējo un apakšējo robežām. Augšējā un apakšējā robežas ir attiecīgās relatīvo uzbriešanas deformāciju vērtības materiālam ar galīgo un sākuma mitruma saturu. Relatīvo deformāciju vērtības nosaka no eksperimentāli iegūtām pētāmā materiāla uzbriešanas līknēm.

Darbā piedāvātais paņēmieni eksperimentāli pārbaudīts, nosakot spriegumus, kuras blīvums  $\rho_{12}=620\pm 22 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , gadskārtu rādīss  $\sim 0.12 \text{ m}$ . Paraugi slogoti spiedē tangenciālā virzienā. Eksperimentāli

uzņemtas  $\sigma$ - $\epsilon$  līknes, piemēram, bērza paraugam ar mitruma saturu 10%, mērot deformācijas parauga vidusdaļā un visā garumā, parādītas 1. attēlā. Sakarību starp spriegumu  $\sigma$  un deformāciju  $\epsilon$  parauga vidusdaļā (līkne  $-\diamond-$ ) apraksta otrās pakāpes polinoms:  $\sigma = -0.5442 \epsilon^2 + 4.6093 \epsilon - 0.424$ .

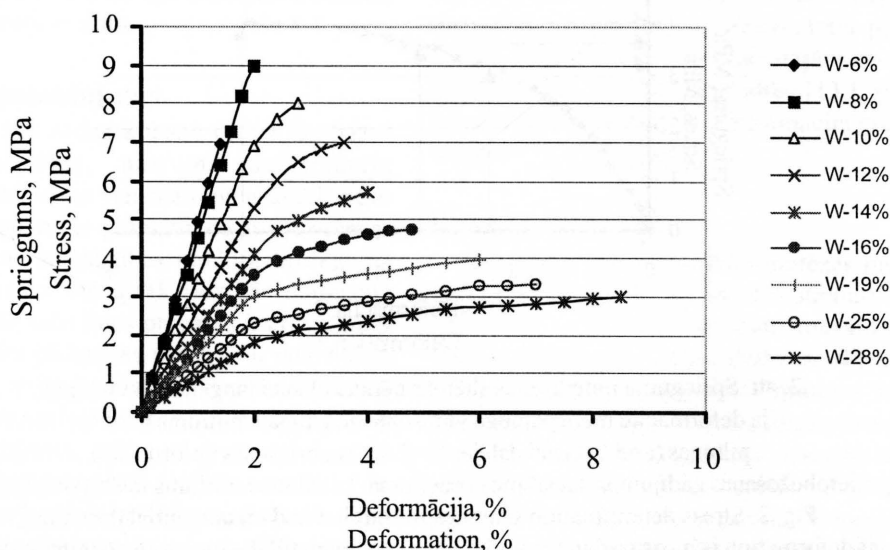
Ja uzbriešanas deformāciju izraisīšanai ir nepieciešams tikpat liels spriegums kā to novēršanai, tad no iegūtām līknēm var noteikt, kāds spriegums rodas bērza koksņē tangenciālā virzienā, ja uzbriešanas deformācija ir kavēta vai nu pilnīgi, vai daļēji.

2. attēlā parādīti spriegumu noteikšanas piemēri gadījumos, kad bērza koksnei galīgais mitruma saturs ir 19%. No attēla redzam, ka deformācijas pilnīgas ierobežošanas gadījumā ( $\epsilon=5.9\%$ ) spriegums



3. att. Brīvās uzbrišanas deformācijas  $\epsilon$ , % bērnam tangenciālā virzienā atkarībā no saistītā mitruma satura  $W$ , %.

Fig. 3. Free swelling deformations  $\epsilon$ , % for birch on tangential direction depending on bound moisture content  $W$ , %.



4. att. Līkņu  $\sigma$ - $\epsilon$  raksturs un parametri paraugu vidusdaļā atkarībā no koksnes mitruma  $W$ :

Fig. 4. The character and parameters of curves  $\sigma$ - $\epsilon$  in the middle of specimens depending on wood moisture content  $W$ :

1 -  $W=6\%$  ( $\sigma=4.991\epsilon-0.0661$ ); 2 -  $W=8\%$  ( $\sigma=4.5833\epsilon-0.0767$ );

3 -  $W=10\%$  ( $\sigma=-0.5442\epsilon^2+4.6093\epsilon-0.424$ ); 4 -  $W=12\%$  ( $\sigma=-0.4301\epsilon^2+3.6542\epsilon+0.4354$ );

5 -  $W=14\%$  ( $\sigma=-0.3248\epsilon^2+2.798\epsilon-0.2954$ ); 6 -  $W=16\%$  ( $\sigma=-0.5442\epsilon^2+4.6093\epsilon-0.424$ );

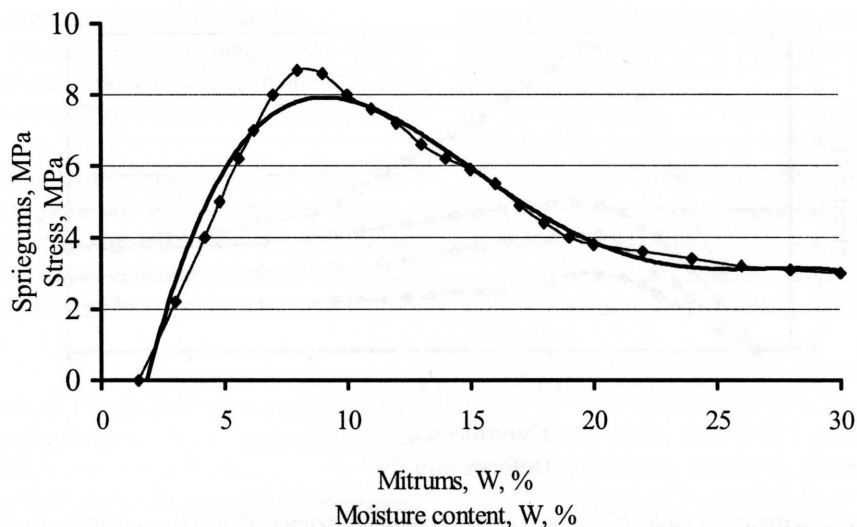
7 -  $W=19\%$  ( $\sigma=0.036\epsilon^3-0.486\epsilon^2+2.29\epsilon+0.1005$ ); 8 -  $W=25\%$  ( $\sigma=0.0202\epsilon^3-0.3126\epsilon^2+1.7083\epsilon-0.199$ ); 9 -  $W=28\%$  ( $\sigma=0.0103\epsilon^3-0.1859\epsilon^2+1.2106\epsilon-0.1096$ ).

tangenciālā virzienā ir 4 MPa. Ja pie tā paša mitruma satura uzbrišanas deformācija ir ierobežota daļēji, piemēram,  $\epsilon=2.4\%$ , tad spriegums nepārsniedz 3.25 MPa. Ja materiāls ir brīvi uzbriedis līdz mitrumam  $W=9\%$  ( $\epsilon=2.4\%$ ) un tad uzbrišana tiek pilnīgi ierobežota, spriegums koksne, sasniedzot 19% mitrumu ( $\epsilon=5.9-2.4=3.5\%$ ), būs vienāds ar 3.6 MPa. Visos šajos gadījumos deformācijas atskaite sākas no ordinātas sākuma punkta ( $\epsilon_0=0$ ).

Zinot sakarības starp spriegumiem un deformācijām, kā arī ierobežotās deformācijas lielumu, koksnei ar dažādu mitruma saturu analītiski iespējams aprēķināt gan pilnā, gan daļējā sprieguma vērtības. Šādos gadījumos spriegumu nosaka no lielākā mitruma izteiksmes kā funkcijas pieaugumu uzdoto deformāciju robežās:

$$\sigma = \sigma(\epsilon_2) - \sigma(\epsilon_1);$$

kur deformācijas  $\epsilon_1$  un  $\epsilon_2$  ir koksnes brīvas uzbrišanas



5. att. Sprieguma maksimālās vērtības bērza koksņē tangenciālā virzienā atkarībā no saistītā mitruma daudzuma, ja uzbriešanas deformācijas ir pilnīgi ierobežotas:

-♦- eksperimentāli iegūtie dati; — aprakstošā līkne.

Fig. 5. Maximum stress values in birch wood depending on bound moisture content in cases of full limited swelling deformation:

-♦- experimental data; — descriptive curve.

deformācijas un tās ir atkarīgas no koksnes mitruma attiecīgā perioda sākumā ( $W_1$ ) un beigās ( $W_2$ ). Pēc aprakstītās shēmas izveidoto  $\sigma$ - $\epsilon$  līkņu saimi, mērot deformācijas parauga vidusdaļā, pie dažādām bērza koksnes mitruma vērtībām atspoguļo 4. attēls.

Bērza koksnes brīvās uzbriešanas deformācijas tangenciālā virzienā atkarībā no saistītā mitruma satura noteiktas kā vidējais aritmētiskais no literatūrā publicētiem datiem [7., 16., 17.] un ir uzdotas 3. attēlā.

Savienojot 4. att. parādīto līkņu maksimālās vērtības, iegūst 5. attēlā doto līkni, kuras ordinātas parāda eksperimentāli noteiktās maksimālās spriegumu vērtības parauga vidusdaļā bērzam tangenciālā virzienā atkarībā no mitruma pilnīgas uzbriešanas deformāciju ierobežošanas gadījumā. Eksperimentāli iegūtās sakarības aprakstīšanai piemēklēts arī piemērotākās teorētiskās līknes vienādojums. Sprieguma atkarību no saistītā mitruma  $W$ , ja deformācijas ir pilnīgi ierobežotas, apraksta 4. pakāpes polinoms:

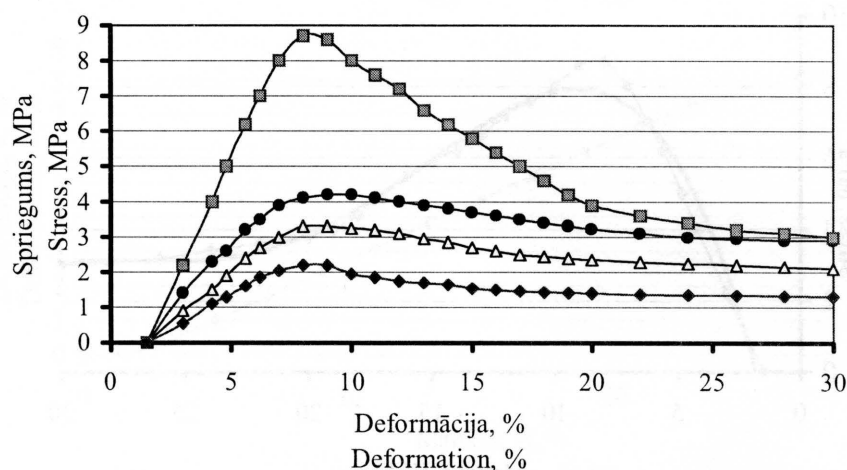
$$\sigma = -0.0001 W^4 + 0.0122 W^3 - 0.3524 W^2 + 3.8223 W - 5.8557.$$

## Rezultātu analīze

Iegūtie rezultāti liecina, ka piedāvātā metode dod iespēju noteikt spriegumus koksņē šķērsām šķiedrām gadījumos, kad mitruma izraisītās deformācijas ir pilnīgi vai daļēji ierobežotas. Noteiktās spriegumu vērtības ir visumā augstākas par tām, kas sastopamas literatūrā uzbriešanas spiediena, proporcionalitātes robežas, žāvēšanas spriegumu un spiedes spriegumu noteikšanas gadījumos [1., 8., 11., 14.]. Aptuvenu priekšstatu par šo atšķirību cēloņiem dod 6. attēls, kur parādītas sprieguma izmaiņas atkarībā no saistītā mitruma radīto

deformāciju ierobežošanas. Spriegumi noteikti gan pēc dotajā darbā piedāvātās metodikas, kad deformācijas mēra parauga vidusdaļā, gan pēc analogas metodikas, kad deformācijas mēra visā parauga garumā, gan ja uzbriešanas spiedienu nosaka, mitrinot paraugus gaisā ar augstu mitruma saturu, gan ja uzbriešanas spiedienu nosaka, mitrinot paraugus ūdenī. No attēla datiem redzams, ka līkņu raksturs praktiski neatšķiras. Atšķirīgas ir noteikto spriegumu skaitliskās vērtības. Nosakot spriegumus parauga vidusdaļā, iegūtas visaugstākās vērtības, kas aptuveni divreiz pārsniedz analogi noteiktās spriegumu vērtības, mērot deformācijas visā parauga garumā. Atšķirība izskaidrojama ar to, ka, nosakot spriegumu visā parauga garumā (analogi kā nosakot uzbriešanas spiedienu pēc vispārpieņemtās metodikas), parauga tilpumā veidojas nevienmērīgs spriegumstāvoklis, jo kontaktspriegumu un St. Venana atklātā principa ietekmes dēļ deformācijas parauga galos ir ievērojami lielākas nekā vidusdaļā un analogi kā citiem anizotropiem materiāliem [15.], pie šādiem paraugu izmēriem iegūst aptuveni divas reizes zemākas spriegumu vērtības. Uzbriešanas spiediens bez tam veidojas apstākļos, kad parauga tilpumā ir nevienmērīgs mitruma sadalījums, kas arī samazina noteiktā sprieguma lielumu. Zināma ietekme ir arī apstāklim, ka mainīgs mitrums iedarbojas uz reonomu materiālu noslogotā stāvoklī, kas pēc literatūras [7.] datiem, ir vērā ņemams faktors.

Iegūto līkņu forma ļauj secināt, ka bērza parauga vidusdaļā radušos spriegumu vērtības tangenciālā virzienā nosacīti lineāri palielinās līdz deformācijas vērtība sasniedz 2%. Turpmāka deformācijas



6. att. Spriegumu izmaiņu kinētika bērza koksnei tangenciālā virzienā atkarībā no saistītā mitruma satura:

□ – nosakot eksperimentāli no  $\sigma$ – $\epsilon$  diagrammām, ja deformācijas mēra parauga vidusdaļā; ● – nosakot eksperimentāli no  $\sigma$ – $\epsilon$  diagrammām, ja deformācijas mēra visā parauga garumā; Δ – uzbriešanas spiediens, mitrinot gaisā ar relatīvā mitruma saturu 98%; ◆ – uzbriešanas spiediens, mitrinot ūdenī [1.].

Fig. 6. Kinetics of stress changes in birch wood depending on bound moisture content:

□ – determined experimentally from  $\sigma$ – $\epsilon$  diagrams, if deformation is measured in the middle of a specimen;  
● – determined experimentally from  $\sigma$ – $\epsilon$  diagrams, if deformation is measured all over the length;  
Δ – swelling pressure in conditions of high percentage of humidity (98%);  
◆ – swelling pressure during soaking in water [1.].

pieauguma gadījumos izpaužas līknes formas maiņa, kas liecina par intensīvāku sprieguma relaksācijas procesu norisi. Šāda veida diagrammas raksturīgas reonomiem higroskopiskiem materiāliem, kuriem ilgākā slodzes iedarbības laikā ir ierobežots paliekošo deformāciju lielums. Spriegumu veidošanās kinētika un spriegumu vērtības ir atkarīgas no koksnes mitrināšanas veida, deformāciju mērīšanas vietas un noteikšanas metodikas.

Ierobežotu mitruma deformāciju radīto spriegumu veidošanās procesu iespējams sadalīt 3 atšķirīgās stadijās:

**1. veida pārmaiņas** raksturīgas ar to, ka:

- spriegums palielinās samērā vienmērīgi un sprieguma pieaugums samērojams ar materiāla mitruma pieaugumu;

- relaksācijas process norit lēni;
- sakarības starp spriegumiem un deformācijām ir nosacīti lineāras;

**pārejas periods** raksturīgs ar to, ka:

- deformāciju pieaugums sāk apsteigt spriegumu pieaugumu;

- sprieguma vērtības stabilizējas, sasniedzot maksimumu;

- mitruma pieauguma radīto spriegumu pieaugumu kompensē spriegumu relaksācija;

- nosakot spriegumu, jāievērtē paliekošo deformāciju klātbūtne;

**2. veida pārmaiņas** raksturīgas ar to, ka:

- sprieguma vērtība samazinās, neskatoties uz mitruma pieaugumu;

- intensīvi norit spriegumu relaksācijas process;
- spriegumu noteikšanā jāievērtē koksnes kā reonoma materiāla īpatnības;
- paliekošo deformāciju lielums ir ierobežots.

Iegūtie rezultāti liecina, ka piedāvātās metodes izmantošana dod iespēju prognozēt spriegumu veidošanās kinētiku un koksņē radušos spriegumu vērtības. Jāatzīm, ka pirms aprēķinu veikšanas jānovērtē katra konkrēta materiāla reālais spriegumstāvoklis, mitrināšanas apstākļi, mitruma deformācijas veidošanās ātrums un ierobežotās deformācijas lielums. Metodes pielietošana katrai koku sugai prasa eksperimentālo datu bankas izveidošanu. Laika faktora ievērtēšanai kā minimums jābūt pētījumiem, slogojot ar standartātrumu ( $\sim 1 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ ) un ar ātrumu  $\leq 1 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ .

Paraugos ar mazu sākuma mitrumu gadījumos, kad ierobežotās deformācijas lielums pārsniedz 2%, mitrināšanas laikā var rasties spriegumi, kas lielāki nekā galējās vērtības. Tas norāda uz agrāk [1.] izteiktās hipotēzes iespējamību, proti, ka parciālais spiediens var pārsniegt totālā uzbriešanas spiediena vērtību. Tas apliecina arī faktu, ka koksņē mitruma deformāciju ierobežošanas gadījumā var rasties tik lieli spriegumi, kas izraisa ne tikai elastīgo, bet arī viskoelastīgo un paliekošo deformāciju veidošanos. Tādēļ šādu materiālu aprēķinos nākas ievērtēt koksnes kā reonoma materiāla īpatnības un izmantot reoloģijas metodes.

## Secinājumi

1. Parādīta iespēja netieši noteikt spriegumus koksņē šķērsām šķiedrām, kas veidojas, ierobežojot

mitruma pieauguma izraisītās deformācijas.

2. Spriegumus bērza koksņē tangenciālā virzienā pieļaujams aprēķināt kā kvazielastīgam materiālam tikai gadījumos, ja ierobežoto deformāciju lielums nepārsniedz 2 %.

3. Noskaidrots, ka deformācijas tangenciālā virzienā slogota parauga galos un vidusdaļā būtiski atšķiras.

4. Piedāvātā metodika dod iespēju prognozēt spriegumu vērtības koksņē šķērsām šķiedrām ierobežotu mitruma deformāciju gadījumos.

## Literatūra

1. Keylwerth, R. (1962) Untersuchungen über freie und behinderte Quellung von Holz. - Holz als Roh- und Werkstoff, Bd.20, S. 252-259, 292-303.

2. Иванов, Ю. М. (1962) Исследование набухания древесины. Строение и физические свойства древесины. Труды института леса и древесины, Том 51. М.-Л., 91-106 с.

3. Perkitny, T., Kingston, R. S. T. (1972) Review of the sufficiency of research on the swelling pressure of wood. Wood Sci. Technol., 6:215-229.

4. Molinski, W. and Raczkowski, J. (1988) Mechanical stresses generated by water adsorption in wood and their determination by tension creep measurements. Wood Sci. Technol., 22: 193-198.

5. Роценс, К. А. (1979) Технологическое регулирование свойств древесины. Рига, Зинатне, 224 стр.

6. Малмеистерс, А., Тамужс, В., Тетерс, Г. (1972) Сопротивление жестких полимерных материалов. Рига, Зинатне, 500 стр.

7. Уголев, Б. Н. (1971) Деформативность древесины и напряжения при сушке. Москва, Лесная промышленность, 176 стр.

8. Hanhijarvi, A., Helnwein, P., Ranta-Maunus, A. (2001) Two-dimensional material model for structural analysis of drying wood as viscoelastic-mechanosorptive-plastic material. In: Proceedings of the 3rd European COST E15 workshop on wood drying, Helsinki, Finland, June 11-13, pp. 1-10.

9. Hunt, D. G. (1986) The mechano-sorptive creep

susceptibility of two softwoods and its relation to some other materials properties. Journal of materials science, vol. 21, pp. 2088-2096.

10. Hanhijarvi, A. (2000) Modelling. Part IV. Deformation properties of Finnish spruce and pine wood in tangential and radial directions in association to high temperature drying. Holz als Roh- und Werkstoff, 58: 211-216.

11. Svensson, S. (1995) Hygro-mechanical behavior of drying wood. Licentiate thesis. Lund. Report TVBK-1010, 58 pp.

12. Perre, P. (1999) How to get a relevant material model for wood drying simulation? Invited conference. Proceedings of the first COST action wood drying workshop. Edinburgh, Scotland, 27 pp.

13. Werdynsh, G. S., Rotsens, K. A. (1987) Humidity effect on the susceptibility to deformations and on the swelling pressure of ammonia-modified wood. (in Polish) Research Advances in Agricultural sciences, Poznan:267-278.

14. Siimes, F. E. (1967) The effect of specific gravity, moisture content, temperature and heating time on the tension and compression strength and elasticity properties perpendicular to the grain of Finnish pine, spruce and birch wood and the significance of these factors on the checking of timber at kiln drying. Helsinki, The State Institute for Technical Research, Finland, 86 pp.

15. Тарнопольский, Ю. М., Кинцис, Т. Я. (1975) Методы статических испытаний армированных пластиков. Москва, Химия, 264 стр.

16. Matejak, M. (1984) Über die Schwindung von Eichen-, Buchen- und Kiefernholz. Holzforschung und Holzverwertung, 36, S. 25-32.

17. Niemz, P. (1993) Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe. DRW-Verlag, 242 pp.

18. Ратениекс, Я., Роценс, К., Гулбис, Я. (1983) Особенности поведения древесины в процессе увеличения ее плотности путем сжатия поперек волокон. В кн: Модификация свойств древесных материалов. Рига, Зинатне, 5-19 стр.