

Latvijas Biozinātņu un tehnoloģiju universitāte

Meža un vides zinātņu fakultāte

Būvniecības un kokapstrādes institūts



Mg.sc.ing. Jānis IEJAVS ^{ID}

promocijas darbs

**PRIEDES (*Pinus sylvestris* L.) KOKSNES ŠŪNVEIDA
MATERIĀLA ĪPAŠĪBAS UN TO UZLABOŠANAS IESPĒJAS**

***PROPERTIES AND THE POSSIBILITIES FOR IMPROVEMENT
OF PINE (*Pinus sylvestris* L.) CELLULAR WOOD MATERIAL
PERFORMANCE***

zinātnes doktora grāda

zinātnes doktors (*Ph.D.*) inženierzinātnēs un tehnoloģijās

iegūšanai

Promocijas darba vadītājs
Asoc.prof., Dr.sc.ing. Uldis Spulle

Promocijas darba autors

Jelgava
2025

ANOTĀCIJA

Iejavs J. (2025) Priedes (*Pinus sylvestris* L.) koksnes šūnveida materiāla īpašības un to uzlabošanas iespējas. Promocijas darbs. Jelgava.152 lpp.

Darbs izstrādāts Latvijas Biozinātņu un tehnoloģiju universitātes Meža un vides zinātņu fakultātes Būvniecības un kokapstrādes institūtā un SIA „Meža un koksnes produktu pētniecības un attīstības institūts”, laika posmā no 2010. līdz 2022. gadam.

Zinātniskā darba mērķis ir noskaidrot Latvijā ražota priedes koksnes šūnveida materiāla (KŠM) īpašības, izstrādāt konstruktīvi uzlabotus KŠM būvniecības paneļu prototipus un novērtēt to īpašības.

Darba mērķa sasniegšanai izvirzīti šādi **darba uzdevumi**:

1. apkopot un analizēt informāciju par KŠM un citu koksnes materiālu izgatavošanas tehnoloģijām, īpašībām, to ietekmējošiem faktoriem;
2. izstrādāt metodiku un noskaidrot KŠM īpašības, tās salīdzināt ar masīvkoksnes un koksnes plātņu materiālu īpašībām;
3. izstrādāt pētījumu metodiku un novērtēt ar aplīmēšanas paņēmieni konstruktīvi uzlabotu KŠM būvniecības paneļu prototipu īpašības, tās salīdzināt ar plaši būvniecībā izmantoto koksnes materiālu un pēc pielietojuma līdzīgu izstrādājumu īpašībām.

Promocijas darba zinātniskā novitāte:

- noteiktas KŠM īpašības, analizēti to ietekmējošie faktori, kā arī iegūtas sakarības materiāla īpašību prognozēšanai;
- salīdzinātas KŠM īpašības ar mēbeļu rūpniecībā un būvniecībā plaši izmantoto koksnes plātņu materiālu un masīvkoksnes īpašībām;
- izstrādāti KŠM būvniecības paneļu prototipi, noteiktas un salīdzinātas to īpašības ar līdzīgu izstrādājumu īpašībām un būvnormatīvos noteiktajām prasībām.

Darbs strukturēts piecās nodaļās:

1. nodaļa. Situācijas analīze;
2. nodaļa. Pētījumu vispārējā metodika;
3. nodaļa. Pētījumi par KŠM īpašībām;
4. nodaļa. Pētījumi par konstruktīvi uzlabota KŠM paneļu prototipu īpašībām;
5. Secinājumi un rekomendācijas.

Darbs noformēts uz 152 lappusēm, ar 66 attēliem, 43 tabulām un 41 sakarību.

Izmantotās literatūras sarakstā ietilpst: 104 literatūras avoti, 49 standarti un normatīvi.

SUMMARY

Iejavs J. (2025) Properties and the possibilities for improvement of pine (*Pinus sylvestris* L.) cellular wood material performance. *Ph.D. thesis*. Jelgava. 152 p.

The Thesis is completed at Institute of Civil Engineering and Woodworking of the Forest and Environmental faculty at Latvia University of Life Sciences and Technologies, "Forest and Wood Products Research and Development Institute" Ltd., in the period from 2010 to 2022.

The Aim of the Doctoral Thesis: to determine the structural properties of pine cellular wood material made in Latvia and to develop the improved prototypes of cellular wood material panel as well evaluate them as structural elements.

The Tasks of the Doctoral Thesis

1. To analyse and summarise information about the properties of structural materials and factors affecting them.
2. To develop methodology and to determine the properties of cellular wood material. To compare them with the properties of solid timber and wood-based panel.
3. To develop methodology of producing prototypes of cellular wood material structural panel and evaluating their structural properties. To compare these properties with the properties of typical structural materials, as well similar products by application and standard requirements.

The Novelty of the Doctoral Thesis

- The properties of cellular wood material and factors influencing CWM properties were determined and analysed. Coherences between CWM properties and effecting factors were found.
- The properties of cellular wood material were compared with the properties of wood and non-wood based structural materials;
- The prototypes of cellular wood material structural panel were developed. The properties of the panels were determined and analysed. Finally, the characteristic of the new panel prototypes was compared with the properties of similar products by application and the requirements of the structural standards.

The Thesis consists of five chapters:

- chapter 1 Literature review;
- chapter 2 General methodology of the research;
- chapter 3 Research of the properties of cellular wood material;
- chapter 4 Research of the properties of improved cellular wood material structural panel;
- chapter 5 General conclusions and recommendations.

The Thesis contains 152 pages, 66 figures, 43 tables and 41 formulas.

The bibliography consists of 104 literature source, 49 standard and normative sources.

SATURS

DARBĀ IEVIETOTO TABULU SARAKSTS	6
DARBĀ IEVIETOTO ATTĒLU SARAKSTS.....	7
DARBĀ IEVIETOTO FORMULU SARAKSTS.....	9
DARBA APROBĀCIJA.....	11
DARBĀ IEVIETOTO SAĪSINĀJUMU SKAIDROJUMS	14
IEVADS.....	16
1. SITUĀCIJAS ANALĪZE	19
1.1. KOKSNES ŠŪNVEIDA MATERIĀLS, TĀ IZGATAVOŠANAS TEHNOLOĢIJA UN POTENCIĀLĀS IZMANTOŠANAS IESPĒJAS	19
1.2. KOKSNES MATERIĀLU FIZIKĀLĀS ĪPAŠĪBAS UN TO IETEKMĒJOŠIE FAKTORI.....	21
1.2.1. <i>Mitrums</i>	21
1.2.2. <i>Blīvums</i>	24
1.2.3. <i>Rukšana un briešana</i>	25
1.2.4. <i>Skaņas izolēšana</i>	28
1.2.5. <i>Ūdens tvaika caurlaidība</i>	33
1.2.6. <i>Siltumvadītspēja un siltuma caurlaidība</i>	35
1.3. KOKSNES MATERIĀLU MEHĀNISKĀS ĪPAŠĪBAS UN TĀS IETEKMĒJOŠIE FAKTORI.....	38
1.4. FIZIKĀLI ĶĪMISKĀS ĪPAŠĪBAS UN TĀS IETEKMĒJOŠIE FAKTORI.....	45
1.5. PĒTĪJUMI PAR KOKSNES ŠŪNVEIDA MATERIĀLA ĪPAŠĪBĀM	51
1.6. NODAĻAS SECINĀJUMI	57
2. PĒTĪJUMU VISPĀRĒJĀ METODIKA	58
2.1. KOKSNES ŠŪNVEIDA MATERIĀLA IZGATAVOŠANAS TEHNOLOĢIJA	58
2.2. MATERIĀLA IZVĒLE, PARAUGU PĀRBAUDES UN APRĒĶINU METODES	59
2.3. DATU STATISTISKĀS APSTRĀDES METODES.....	61
3. KOKSNES ŠŪNVEIDA MATERIĀLA ĪPAŠĪBAS	62
3.1. MATERIĀLI UN METODES FIZIKĀLO ĪPAŠĪBU NOTEIKŠANAI	62
3.1.1. <i>Mitrums</i>	62
3.1.2. <i>Blīvums</i>	62
3.1.3. <i>Rukšana un briešana</i>	62
3.1.4. <i>Ūdens tvaika caurlaidība</i>	65
3.1.5. <i>Siltumvadītspēja</i>	66
3.2. REZULTĀTI UN DISKUSIJA FIZIKĀLO ĪPAŠĪBU NOTEIKŠANAI	67
3.2.1. <i>Mitrums</i>	67
3.2.2. <i>Blīvums</i>	69
3.2.3. <i>Rukšana un briešana</i>	72
3.2.4. <i>Ūdens tvaika caurlaidība</i>	75
3.2.5. <i>Siltumvadītspēja</i>	79
3.3. MATERIĀLI UN METODES FIZIKĀLI-ĶĪMISKO ĪPAŠĪBU NOTEIKŠANAI.....	81
3.4. REZULTĀTI UN DISKUSIJA FIZIKĀLI-ĶĪMISKO ĪPAŠĪBU NOTEIKŠANAI.....	83
3.5. MATERIĀLI UN METODES MEHĀNISKO ĪPAŠĪBU NOTEIKŠANAI.....	88
3.5.1. <i>Robežstiprība un elastības modulis liecē, spiedē, stiepē un bīdē</i>	88
3.5.2. <i>Ģeometriskā izmēru ietekme uz mehāniskajām īpašībām</i>	89
3.5.3. <i>Mehānisko stiprinājumu - kokskrūvju izraušanas pretestība</i>	91
3.5.4. <i>Līmētā plaknes savienojuma robežstiprība bīdē</i>	93
3.5.5. <i>Salīmējamība ar citiem koksnē materiāliem</i>	93
3.6. REZULTĀTI UN DISKUSIJA MEHĀNISKO ĪPAŠĪBU NOTEIKŠANAI.....	96
3.6.1. <i>Robežstiprība un elastības modulis liecē spiedē, stiepē un bīdē</i>	96
3.6.2. <i>Ģeometriskā izmēru ietekme uz mehāniskajām īpašībām</i>	99
3.6.3. <i>Mehānisko stiprinājumu - kokskrūvju izraušanas pretestība</i>	108
3.6.4. <i>Līmētā plaknes savienojuma robežstiprība bīdē</i>	112
3.6.5. <i>Salīmējamība ar citiem koksnē materiāliem</i>	113
3.7. KOKSNES ŠŪNVEIDA MATERIĀLA ĪPAŠĪBU KOPSAVILKUMS	116
3.8. NODAĻAS SECINĀJUMI	117

4. KOKSNES ŠŪNVEIDA MATERIĀLA ĪPAŠĪBU UZLABOŠANA.....	119
4.1. MATERIĀLI UN METODES FIZIKĀLO ĪPAŠĪBU UZLABOŠANAI	119
4.1.1. <i>Siltuma caurlaidības koeficients</i>	119
4.1.2. <i>Skaņas gaisā izolācijas indekss</i>	119
4.2. REZULTĀTI UN DISKUSIJA FIZIKĀLO ĪPAŠĪBU UZLABOŠANAI	120
4.2.1. <i>Siltuma caurlaidības koeficients</i>	120
4.2.2. <i>Skaņas gaisā izolācijas indekss</i>	123
4.3. MATERIĀLI UN METODES FIZIKĀLI- ĶĪMISKO ĪPAŠĪBU UZLABOŠANAI.....	126
4.4. REZULTĀTI UN DISKUSIJA FIZIKĀLI-ĶĪMISKO ĪPAŠĪBU UZLABOŠANAI.....	127
4.5. MATERIĀLI UN METODES KOKSNES ŠŪNVEIDA MATERIĀLA MEHĀNISKO ĪPAŠĪBU UZLABOŠANAI	132
4.6. REZULTĀTI UN DISKUSIJA MEHĀNISKO ĪPAŠĪBU UZLABOŠANAI.....	135
4.7. NODAĻAS SECINĀJUMI	140
5. SECINĀJUMI UN REKOMENDĀCIJAS.....	141
IZMANTOTO INFORMĀCIJAS AVOTU SARAKSTS.....	143

Darbā ievietoto tabulu saraksts

Tabulas Nr.	Tabulas nosaukums	Lappuse
1.1.	Koksnes maksimālā rukuma rādītāji atkarībā no koku sugas	26
1.2.	Būvniecībā plaši izmantoto plātņu materiālu rukšanas koeficienti	28
1.3.	Skaņas gaisā vājinājuma indeksa R vērtības 25 mm biezām koksnes plātnēm	31
1.4.	Krustām līmēto kokmateriālu paneļu sienas uzbūves konstruktīvā risinājuma ietekme uz skaņas gaisā izolācijas indeksu R_w	32
1.5.	Krustām līmēto kokmateriālu paneļu sienas uzbūves ietekme uz siltuma caurlaidības koeficientu U	38
1.6.	Koku sugu ietekme uz zāģmateriālu mehāniskajiem rādītājiem	39
1.7.	Priedes koksnes mehāniskās īpašības	39
1.8.	Paraugu izmēru ietekme uz koksnes mehāniskajiem rādītājiem	42
1.9.	Zāģmateriālu šķērsriezuma izmēru ietekme uz elastības moduļu rādītājiem	43
1.10.	Līmēto savienojumu stiprību ietekmējošie faktori	44
1.11.	Koksnes materiālu ugunsreakcijas parametri	49
1.12.	Ugunsreakcijas klasifikācijas testa metodes un kritēriji D ugunsreakcijas klasei	50
1.13.	Dažu siltumizolācijas materiālu ugunsreakcijas klases	50
1.14.	Priedes koksnes šūnveida materiāla īpašības, noteiktas saskaņā ar plātņu materiālu testēšanas standartiem	51
1.15.	Trīs kārtu koksnes šūnveida materiāla plātņu fizikālās un mehāniskās īpašības plātnēm ar augsta blīvuma kokšķiedru plātnēm ārējās kārtās	52
1.16.	Trīs kārtu koksnes šūnveida materiāla plātņu mehāniskās īpašības plātnēm ar bērza saplāksni ārējās kārtās	53
1.17.	Priedes koksnes šūnveida materiāla aptuvenie robežstiprības un elastības moduļu rādītāji spiedē	54
3.1.	Paraugu specifikācija koksnes šūnveida materiāla ūdens tvaika pārvades raksturlielumu noteikšanai	66
3.2.	Koksnes šūnveida materiāla blīvuma noteikšanas rezultāti atkarībā no gaisa relatīvā mitruma	69
3.3.	Koksnes šūnveida materiāla teorētiskās tilpuma un mitruma izmaiņas	73
3.4.	Priedes koksnes un priedes koksnes šūnveida materiāla rukšanas koeficienti	74
3.5.	Koksnes šūnveida materiāla ūdens tvaika pārvades raksturlielumi paralēlā virzienā	76
3.6.	Koksnes šūnveida materiāla ūdens tvaika pārvades raksturlielumi perpendikulārā virzienā	77-78
3.7.	Koksnes šūnveida materiāla siltumvadītspējas un siltuma caurlaidības koeficientu noteikšanas rezultāti	80
3.8.	Koksnes šūnveida materiāla ugunsreakcijas parametri paralēlā virzienā	84
3.9.	Koksnes šūnveida materiāla atsevišķa liesmas avota pārbaudes rezultāti	85
3.10.	Paraugi robežstiprības un elastības moduļu noteikšanai	90-91
3.11.	Skrūvju HBS6220 un HBS8280 ģeometriskie parametri	93
3.12.	Līmju tehniskie rādītāji	94
3.13.	Zāģmateriālu un koksnes šūnveida materiāla mehānisko īpašību salīdzinājums	98
3.14.	Skrūvju izraušanas pretestības statistiskie rādītāji atkarībā no skrūvju ieskrūvēšanas dziļuma	108
3.15.	Skrūvju izraušanas pretestības vidējie rādītāji atkarībā no skrūves veida un skrūves iestrādes veida	111

Tabulas Nr.	Tabulas nosaukums	Lappuse
3.16.	Koksnes šūnveida materiāla robežstiprības bīdē rādītāju salīdzinājums dažādās materiāla zonās	112-113
3.17.	Koksnes šūnveida materiāla īpašību salīdzinājums ar priedes koksnes īpašībām	116-117
4.1.	Skaņas izolācijas indeksa noteikšanas sienas paraugu prototipu apraksts	120
4.2.	Piecu dažādu konstrukciju sienu siltuma caurlaidības koeficienti, izmantojot koksnes šūnveida materiālu paralēlā virzienā	121
4.3.	Durvju paneļu prototipu skaņas izolācijas indeksi un to korekcijas	123
4.4.	Sienu paneļu prototipu skaņas izolācijas indeksi un to korekcijas	124
4.5.	Paneļu prototipi koksnes šūnveida materiāla ugunsreakcijas parametru uzlabošanai	127
4.6.	SBI pārbaudes rezultāti 60 mm bieziem paneļu prototipiem ar 4 mm biezu augsta blīvuma šķiedru plātnēm ārējās kārtās	128
4.7.	Lieces paraugu specifikācija	133
4.8.	Spiedes paraugu specifikācija	134
4.9.	Koksnes šūnveida materiāla lieces un spiedes paraugu specifikācija	134

Darbā ievietoto attēlu saraksts

Attēla Nr.	Attēla nosaukums	Lappuse
1.1.	Dendrolight trīs kārtu mēbeļu plātnes	19
1.2.	Dendrolight trīs kārtu plātņu izgatavošanas tehnoloģijas principiālā shēma	20
1.3.	Četrus kārtu koksnes šūnveida materiāla izgatavošanas princips	20
1.4.	Atšķirīgie koksnes šūnveida materiāla virzieni	21
1.5.	Koksnes līdzsvara mitrums atkarībā no gaisa temperatūras un relatīvā gaisa mitruma	22
1.6.	Dažu koku sugu līdzsvara mitruma atkarība no gaisa relatīvā mitruma	22
1.7.	Dažu koksnes plātņu materiālu līdzsvara mitrums atkarībā no gaisa relatīvā mitruma	23
1.8.	Kārtās līmētie kokmateriāli un krustām līmēto kokmateriālu paneļi	27
2.1.	Priedes dēļa šķērsgriezums ar iestrādātām rievām	58
3.1.	Koksnes šūnveida materiāla virzieni	63
3.2.	Paraugi lineāro izmēru izmaiņu noteikšanai	63
3.3.	Paraugi ūdens tvaika pārvades raksturlielumu noteikšanai	66
3.4.	Siltumvadītspējas koeficientu noteikšanas paraugi	67
3.5.	Gaisa relatīvā mitruma ietekme uz koksnes šūnveida materiāla līdzsvara mitrumu pie gaisa temperatūras 20±2 °C	68
3.6.	Gaisa relatīvā mitruma ietekme uz koksnes šūnveida materiāla blīvumu	70
3.7.	Koksnes šūnveida materiāla mitruma ietekme uz blīvumu	70
3.8.	Koksnes šūnveida materiāla un koksnes plātņu materiālu blīvuma vērtību salīdzinājums	71
3.9.	Sakarība starp koksnes šūnveida materiāla mitruma un izmēru izmaiņām	72
3.10.	Koksnes šūnveida materiāla rukšanas koeficientu salīdzinājums ar plātņu materiālu rukšanas koeficientiem	74
3.11.	Ūdens tvaika pārvades raksturlielumu noteikšanas paraugu virsmu atšķirība	77
3.12.	Koksnes šūnveida materiāla un citu būvniecības materiālu ūdens tvaika difūzijas pretestības koeficientu salīdzinājums	78
3.13.	Koksnes šūnveida materiāla un citu būvniecības materiālu siltumvadītspējas koeficientu salīdzinājums	80

Attēla Nr.	Attēla nosaukums	Lappuse
3.14.	Koksnes šūnveida materiāla virziens vienotās dedzināšanas pārbaudes iekārtā	82
3.15.	Koksnes šūnveida materiāla montāža atsevišķas liesmas avota pārbaudes iekārtā atkarībā no liesmas pielikšanas veida	83
3.16.	Koksnes šūnveida materiāla degšanas jaudas HRR dinamika	85
3.17.	Ugunsgrēka attīstības ātruma indeksa FIGRA salīdzinājums dažādiem koksnes materiāliem	86
3.18.	Kopējā siltuma izdalīšanās 600 s laikā THR600s salīdzinājums koksnes šūnveida materiālam, masīvkoksnei un plātņu materiāliem	87
3.19.	Koksnes šūnveida materiāla slogošanas princips materiāla paralēlā virzienā	88
3.20.	Robežstiprības spiedē noteikšanas princips iekārtā Instron 600 kN	90
3.21.	Skrūves ieskrūvēšanas virzieni koksnes šūnveida materiālā	92
3.22.	Aplīmējamās virsmas kontaktaukuma attiecība pret koksnes šūnveida materiāla paralēlā virziena konstruktīvo laukumu materiāla iekšējā daļā	94
3.23.	Stiepes robežstiprības noteikšanas paņēmieni	95
3.24.	Trīs kārtu plātņu materiāla iespējamie sagrāves veidi	96
3.25.	Koksnes šūnveida materiāla robežstiprības vidējie rādītāji ar 95 % ticamības intervālu	97
3.26.	Koksnes šūnveida materiāla elastības moduļu vidējie rādītāji ar 95 % ticamības intervālu	97
3.27.	Paraugu biezuma un platuma ietekme uz robežstiprību liecē $f_{m,0}$	100
3.28.	Paraugu šķēsgriezuma laukuma ietekme uz robežstiprību liecē $f_{m,0}$	101
3.29.	Paraugu biezuma un platuma ietekme uz lokālo elastības moduli liecē $E_{m,l,0}$	101
3.30.	Paraugu šķēsgriezuma laukuma ietekme uz lokālo elastības moduli liecē $E_{m,l,0}$	103
3.31.	Paraugu biezuma un laukuma izmēru ietekme uz robežstiprību spiedē $f_{c,0}$	103
3.32.	Paraugu laukuma ietekme uz koksnes šūnveida materiāla robežstiprību spiedē $f_{c,0}$	104
3.33.	Paraugu biezuma ietekme uz koksnes šūnveida materiāla robežstiprību spiedē $f_{c,0}$	104
3.34.	Paraugu platuma un garuma (augstuma) ietekme uz koksnes šūnveida materiāla robežstiprību bīdē $f_{v,0}$	105
3.35.	Paraugu laukuma ietekme uz koksnes šūnveida materiāla robežstiprību bīdē $f_{v,0}$	106
3.36.	Paraugu platuma un garuma (augstuma) ietekme uz koksnes šūnveida materiāla elastības moduli bīdē G_0	106
3.37.	Paraugu laukuma ietekme uz koksnes šūnveida materiāla elastības moduli bīdē G_0	107
3.38.	Skrūves ieskrūvēšanas dziļuma ietekme uz skrūves izraušanas pretestību šūnveida materiālu orientējot perpendikulārā virzienā	108
3.39.	Skrūvju ieskrūvēšanas vietas ietekme uz skrūvju izraušanas pretestību materiālu orientējot perpendikulāri pret skrūves garenasi	109
3.40.	Skrūvju ieskrūvēšanas vietas ietekme uz skrūvju izraušanas pretestību materiālu orientējot paralēli pret skrūves garenasi	110
3.41.	Skrūvju izraušanas pretestības rādītāju salīdzinājums no koksnes šūnveida materiāla un priedes masīvkoksnes šķērsām šķiedrām	110
3.42.	Trīs kārtu plātņu materiālu vidējie robežstiprības stiepē rādītāji perpendikulāri pret plātņu plakni paraugiem, kas līmēti ar atšķirīgām līmēm	114
3.43.	Sagrāves veidu salīdzinājums šūnveida materiālam, aplīmētam ar dažāda veida koksnes materiāliem	115
4.1.	Siltumizolācijas materiāla biezuma ietekme uz koksnes šūnveida materiāla sienas prototipu siltuma caurlaidības koeficientu - matemātiskais modelis	122
4.2.	Skaņas vājinājuma indeksa R atkarība no frekvences pieauguma	124
4.3.	Skaņas vājinājuma indeksa R atkarība no frekvences pieauguma sienas prototipam 148	125

Attēla Nr.	Attēla nosaukums	Lappuse
4.4.	SBI pārbaude 60 mm bieziem 3 kārtu prototipiem ar augsta blīvuma kokšķiedru plātnēm ārējās kārtās	128
4.5.	Koksnes šūnveida materiāla konstruktīvās uzlabošanas ietekme uz ugunsgrēka attīstības ātruma indeksu	129
4.6.	Koksnes šūnveida materiāla konstruktīvās uzlabošanas ietekme uz kopējo siltuma izdalīšanos 600 s laikā	130
4.7.	Trīs kārtu koksnes šūnveida materiāla prototipu un dažādu koksnes materiālu ugunsgrēka attīstības ātruma indeksu salīdzinājums	130
4.8.	Kopējā siltuma izdalīšanās 600 s laikā THR _{600s} salīdzinājums koksnes šūnveida materiāla paneļu prototipiem, masīvkoksnei un plātņu materiāliem	131
4.9.	Paneļu prototipu A līdz F konstruktīvie risinājumi	133
4.10.	Paneļu konstruktīvo risinājumu ietekme uz robežstiprības liecē rādītājiem	135
4.11.	Paneļu konstruktīvo risinājumu ietekme uz elastības moduļa rādītājiem liecē	136
4.12.	Paneļu orientācija spiedes pārbaudes iekārtā	137
4.13.	Vidējie paneļu prototipu robežstiprības spiedē rādītāji, slogojot tos perpendikulārā virzienā	137
4.14.	Vidējie paneļu prototipu robežstiprības spiedē rādītāji, slogojot tos paralēlā virzienā	138

Darbā ievietoto formulu saraksts

Formulas Nr.	Formulas nosaukums	Lappuse
1.1.	Sakarība gaisā radītās skaņas vājinājuma indeksa aprēķināšanai	29
1.2.	Telpas ekvivalentā absorbcijas fonda aprēķina sakarība	29
1.3.	Viendabīgu homogēnu konstrukciju skaņas izolācijas indeksa aprēķina sakarība	30
1.4.	Koksnes plātņu materiālu skaņas gaisā vājinājuma indeksa aprēķina sakarība	31
1.5.	Materiālu ūdens tvaika pretestības aprēķina sakarība	33
1.6.	Koksnes šķērsām šķiedrām siltumvadītspējas koeficienta aprēķina sakarība	37
1.7.	Koksnes pretestība atkarībā no temperatūras	41
1.8.	Koksnes robežstiprība un elastības modulis liecē un spiedē atkarībā no paraugu izmēriem	42
3.1.	Koksnes rukšanas koeficienta aprēķina sakarība	63
3.2.	Rukšanas vai briešanas koeficients saskaņā ar standartu DIN 52174	64
3.3.	Teorētiskā koksnes šūnveida materiāla kubveida parauga tilpuma aprēķina sakarība	64
3.4.	Teorētiskā vidējā tilpuma rukšanas koeficienta aprēķina sakarība	64
3.5.	Koksnes šūnveida materiāla absolūtā tilpuma rukuma aprēķina sakarība	64
3.6.	Koksnes mitruma aprēķina sakarība	65
3.7.	Koksnes šūnveida materiāla siltumvadītspējas koeficienta izteikšanas sakarība	67
3.8.	Koksnes šūnveida materiāla siltumvadītspējas koeficienta aprēķina sakarība	67
3.9.	Koksnes šūnveida materiāla mitruma aprēķina sakarība atkarībā no relatīvā gaisa mitruma	68
3.10.	Koksnes šūnveida materiāla blīvuma aprēķina sakarība atkarībā no gaisa relatīvā mitruma	69
3.11.	Koksnes šūnveida materiāla blīvuma aprēķina sakarība atkarībā no koksnes šūnveida materiāla mitruma	70
3.12.	Sakarības starp koksnes šūnveida materiāla garuma un mitruma izmaiņām	72
3.13.	Sakarības starp koksnes šūnveida materiāla platuma un mitruma izmaiņām	72

Formulas Nr.	Formulas nosaukums	Lappuse
3.14.	Sakarības starp koksnes šūnveida materiāla augstuma un mitruma izmaiņām	73
3.15.	Koksnes šūnveida materiāla tilpuma izmaiņas atkarībā no materiāla mitruma	73
3.16.	Sakarība starp paraugu platumu un robežstiprību liecē 112 mm bieziem paraugiem	100
3.17.	Sakarība starp paraugu platumu un robežstiprību liecē 56 mm bieziem paraugiem	100
3.18.	Sakarība starp paraugu biezumu un robežstiprību liecē 112 mm bieziem paraugiem	100
3.19.	Sakarība starp paraugu augstumu un robežstiprību liecē 280 mm platiem paraugiem	100
3.20.	Lieces paraugu biezuma un platuma mijiedarbības ietekme uz koksnes šūnveida materiāla robežstiprību liecē	100
3.21.	Sakarība starp paraugu platumu un lokālo elastības moduli 56 mm bieziem paraugiem	102
3.22.	Sakarība starp paraugu platumu un lokālo elastības moduli 112 mm bieziem paraugiem	102
3.23.	Sakarība starp paraugu biezumu un lokālo elastības moduli liecē 112 mm platiem paraugiem	102
3.24.	Sakarība starp paraugu augstumu un lokālo elastības moduli liecē 280 mm platiem paraugiem	102
3.25.	Sakarība starp paraugu augstumu un lokālo elastības moduli liecē paraugiem ar platumu 600 mm	102
3.26.	Lieces paraugu biezuma un platuma mijiedarbības ietekme uz koksnes šūnveida materiāla elastības moduli liecē	102
3.27.	Spiedes paraugu biezuma un šķērsriezuma laukuma mijiedarbības ietekme uz koksnes šūnveida materiāla robežstiprību spiedē	104
3.28.	Sakarība starp paraugu elastības moduli liecē un paraugu laukumu paraugiem ar augstumu 112 mm	105
3.29.	Sakarība starp skrūves SPEC17 ieskrūvēšanas dziļumu un skrūves izraušanas pretestību no koksnes šūnveida materiāla perpendikulārā virzienā	108
3.30.	Sakarība starp skrūves SPEC17 ieskrūvēšanas dziļumu un skrūves izraušanas pretestību no koksnes šūnveida materiāla paralēlā virzienā	109
3.31.	Sakarība starp skrūves SPEC17 ieskrūvēšanas dziļumu un skrūvju izraušanas pretestību no priedes masīvkoksnes šķērsām šķiedrām	111
4.1.	Siltumizolācijas materiāla biezuma ietekme uz koksnes šūnveida materiāla sienas paneļu prototipu siltuma caurlaidības koeficientu 1. paneļa prototipam	121
4.2.	Siltumizolācijas materiāla biezuma ietekme uz koksnes šūnveida materiāla sienas paneļu prototipu siltuma caurlaidības koeficientu 2. paneļa prototipam	121

DARBA APROBĀCIJA

Publikācijas par promocijas darba tēmu:

1. **Iejavs J.**, Spulle U., Jakovļevs V. (2011) The comparison of properties of three-layer cellular material and wood-based panel properties. *Drewno–Wood*. Poznan: Institut Technologii Drewno, Vol. 54, No. 185, p. 40–49. (Science Citation Index Expanded, SCOPUS, BazTech, DREWINF). <https://bibliotekanauki.pl/articles/52758>
2. **Iejavs J.**, Spulle U., Jakovļevs V. (2011) Evaluation of bending properties of three layer cellular wood panels using six different structural models. In: *Proceedings of Annual 17th International Scientific Conference Research for rural development 2011*. Jelgava: LLU, Vol. 2, p. 85–90. (CABI, AGRIS). <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/pdf/10.5555/20123121926>
3. **Iejavs J.**, Jakovļevs V. (2012) Gluability and bonding quality of cellular wood material. In: *Proceedings of the 8th meeting of Northern European Network for Wood Science and Engineering (WSE)*. Kaunas: Kaunas University of Technology, p. 207–213. <https://wsenetwork.org/gluability-and-bonding-quality-of-cellular-wood-material/>
4. **Iejavs J.**, Spulle U. (2013) Compression strength of three-layer cellular wood panels. *Drewno–Wood*. Poznan: Institut Technologii Drewno, Vol. 56, No.189, p. 101–113. (Science Citation Index Expanded, SCOPUS, BazTech, DREWINF). <https://doi.org/10.12841/wood.1644-3985.032.07>
5. **Iejavs J.**, Spulle U. (2013) Structural properties of cellular wood material. *International Journal in the Field of Wood Engeneering ProLigno*. Braşov: Editura Universităţii „Transilvania” din Braşov, Vol. 9, No. 4, Part 2, p. 491–497. (CABI, DOAJ, DRJI, EBSCO Publishing). https://www.proligno.ro/ro/articles/2013/4/Iejavs_final.pdf
6. **Iejavs J.**, Jakovļevs V., Tuherm H. (2013) Koksnes šūnveida materiāla fizikālās un mehāniskās īpašības. No: *Valsts pētījumu programma, 2010–2013. Rakstu krājums, Vietējo resursu ilgtspējīga izmantošana – jauni produkti un tehnoloģijas (NatRes)*. Rīga: LVKŅI, 117.–121. lpp. https://alephfiles.rtu.lv/TUA01/000045085_e.pdf
7. **Iejavs J.**, Ješauskis E. (2014) Ģeometrisko izmēru ietekme uz koksnes šūnveida materiāla mehāniskajām īpašībām. *Zinātne un prakse nozares attīstībai. LLU Meža fakultāte zinātniski praktiskās konferences tēzes*. Jelgava: LLU, 84.–87. lpp.
8. Rozins R., **Iejavs J.** (2014) Evaluation of thermal properties of wood based composite panel walls. No: *Proceedings of Annual 20th International Scientific Conference Research for rural development 2014*. Jelgava: LLU, Vol. 2, p. 109–114. (CABI, AGRIS). <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/pdf/10.5555/20153103543>
9. Buksans E., **Iejavs J.**, Rudzitis E. (2015) Reaction to fire performance of cellular wood materials. In: *Proceedings of the 1st European Workshop Fire Safety of Green Buildings*. Berlin: Shaker Verlag, p. 13–16.
10. **Iejavs J.**, Spulle U. (2016) Cellular wood material properties – rewiev. *Drewno–Wood*. Poznan: Institut Technologii Drewno, Vol. 59, No. 198, p. 5–18. (Science Citation Index Expanded, SCOPUS, BazTech, DREWINF). <https://doi.org/10.12841/wood.1644-3985.156.14>
11. **Iejavs J.**, Rozins R. (2016) Water vapour permeability properties of cellular wood material and condensation risk of composite panel walls. *International Journal in the Field of Wood Engeneering ProLigno*. Braşov: Editura Universităţii „Transilvania” din Braşov, Vol. 12, No. 3, p. 3–11. (CABI, DOAJ, DRJI, EBSCO Publishing). <https://www.proligno.ro/en/articles/2016/3/iejavs.pdf>
12. Spulle U., Buksāns E., **Iejavs J.**, Roziņš R. (2016) Reaction of door constructions made of the cellular wood material to fire. *Drewno–Wood*. Poznan: Institut Technologii Drewno, Vol. 59, No. 198, p. 171–179. (Science Citation Index Expanded, SCOPUS, BazTech, DREWINF). <https://doi.org/10.12841/wood.1644-3985.159.03>

13. Spulle U., Buksans E., **Iejavs J.**, Rozins R. (2018) Swelling Pressure and Form Stability of Cellular Wood Material. *Agronomy Research* 16(1), p. 263–275. (SCOPUS, EBSCO, CABI). <https://doi.org/10.15159/AR.18.011>
14. **Iejavs J.**, Podnieks M., Uzuls A. (2021) Some physical and mechanical properties of wood of fast-growing tree species eucalyptus (*Eucalyptus grandis*) and radiata pine (*Pinus radiata* D.Don). *Agronomy Research*, 19 (2), p 434–443. (SCOPUS, EBSCO, CABI). <https://doi.org/10.15159/ar.21.038>
15. **Iejavs J.**, Šķēle K., Grants E., Uzuls A. (2022) Bonding performance of wood of fast-growing tree species eucalyptus (*Eucalyptus grandis*) and radiata pine (*Pinus radiata* D.Don) with polyvinyl acetate and emulsion polymer isocyanate adhesives. *Agronomy Research*, 20 (1), p 174–187. (SCOPUS, EBSCO, CABI). <https://doi.org/10.15159/ar.22.002>

Dalība zinātniskajās konferencēs par promocijas darba tēmu:

1. **Iejavs J.**, Spulle U. International Scientific Conference “Nordic Baltic Network in Wood Material Science & Engineering (WSE)”, Tallina, Igaunija, 2010. gada 21.–22. oktobris, stenda prezentācija: Dendrolight type panels produced from aspen wood.
2. **Iejavs J.**, Spulle U. International Scientific Conference “Research for Rural Development 2011”, LLU, Jelgava, 2011. gada 18.–20. maijs, referāts: Evaluation of the bending properties of three layer cellular wood panels using six different structural models.
3. **Iejavs J.**, Spulle U., Jakovļevs V. International Scientific Conference “Nordic Baltic Network in Wood Material Science & Engineering (WSE)”, Oslo, Norvēģija, 2011. gada 27.–28. oktobris, stenda prezentācija: Compression properties of three layer cellular wood panels.
4. **Iejavs J.**, Spulle U. 6th International Scientific Conference “Students on Their Way to Science”, LLU, TF, Jelgava, 2011. gada 27. maijs, referāts: Dendrolight type panels produced from aspen wood.
5. **Iejavs J.**, Spulle U. Zinātniski praktiskā konference “Zinātne un prakse nozares attīstībai 2012”, LLU, MF, Jelgava, 2012. gada 15. marts, referāts: Trīs kārtu šūnveida paneļu spiedes robežstiprības rādītāji.
6. **Iejavs J.**, Jakovļevs V. 8th International Scientific Conference “Northern European Network for Wood Science and Engineering”, Kauņa, Lietuva, 2012. gada 13.–14. septembrī, referāts: Gluability and bonding quality of cellular wood material.
7. **Iejavs J.**, Spulle U. 9th International Scientific Conference „Wood Science and Engineering in the Third Millennium”, Brasova, Rumānija, 2013. gada 7.–9. novembris, referāts: Structural properties of cellular wood material.
8. Ješauskis E., **Iejavs J.** Zinātniski praktiskā konference “Zinātne un prakse nozares attīstībai 2014”, LLU, MF, Jelgava, 2014. gada 27. marts, referāts: Ģeometrisko izmēru ietekme uz koksnes šūnveida materiāla mehāniskajām īpašībām.
9. Roziņš R., **Iejavs J.** International Scientific Conference “Research for Rural Development 2014”, LLU, Jelgava, 2014. gada 13.–15. maijs, referāts: Evaluation of thermal properties of wood based composite panel walls.
10. Kūms J., **Iejavs J.**, Roziņš R. Zinātniski praktiskā konference “Zinātne un prakse nozares attīstībai 2015”, LLU, MF, Jelgava, 2015. gada 19. marts, referāts: Šūnveida materiāla ūdens tvaika caurlaidības pētījumi.

Citas aktivitātes saistībā ar promocijas darba tēmu:

1. Vadīts Ješauska Edija diplomdarbs par tēmu “Ģeometrisko izmēru ietekme uz koksnes šūnveida materiāla mehāniskajām īpašībām un blīvumu”.
2. Vadīts Jakovļeva Viļņa maģistra darbs par tēmu “Priedes (*Pinus sylvestris* L.) koksnes šūnveida materiāla fizikālās un mehāniskās īpašības”.

Dalība zinātniskajos projektos:

1. Inovatīvu pašnesošu paneļu un būvelementu izstrāde no šūnveida koksnes materiāla. Nr. 2010/0248/2DP/2.1.1.1.0/10/APIA/VIAA/019. Eiropas Reģionālās attīstības fonds, 2010 - 2013.
2. Paaugstinātas ekoloģiskās vērtības koksnes materiālu izpēte. Nr. L-KC-11-0004. SIA „MNKC”, Latvijas Investīciju attīstības aģentūra, 2011-2015.
3. Vietējo resursu (zemes dziļu, meža, pārtikas un transporta) ilgtspējīga izmantošana - jauni produkti un tehnoloģijas (apakšprojekts Nr.3 - Jauni tehnoloģiski risinājumi inovatīvai augstākas pievienotās vērtības koksnes materiālu un produktu radīšanai). Nr.VP-24, LR IZM, 2010-2014.
4. Meža un zemes dziļu resursu izpēte, ilgtspējīga izmantošana - jauni produkti un tehnoloģijas (ResProd), projekts Nr. 2. Pētījumi koksnes apstrādes, meža produktu loģistikas un plānošanas jomā. Nr. VPP2014-2017, LR IZM, 2014-2017.
5. Inovācijas meža apsaimniekošanā un koksnes apstrādes pievienotās vērtības ķēdē Latvijas izaugsmei: jauni pakalpojumi, produkti, tehnoloģijas (Forest4LV). Nr.VPP-ZM-VRIILA-2024/2-0002”, LR LZP, 2024-2025.



Darbā ievietoto saīsinājumu skaidrojums

Saīsinājumi:

p	parauga platums, mm;
b	parauga biezums, mm;
Ba	baltalksnis (<i>Alnus incana</i> (L.) Moench);
$C_{50-3150}$	spektrālā korekcija skaņas izolācijas aprēķiniem, dB;
CLT	krustām līmēts konstrukciju kokmateriāls;
CON	vidējās vērtības 95 % ticamības intervāls;
C_{tr}	nosacītā transporta trokšņa korekcija, dB
D	vidējais izmērs pie noteikta materiāla mitruma, mm;
D_0	izmērs absolūti sausā stāvoklī, mm;
DIN	Vācijas nacionālais standarts;
D_m	koksnes izmērs pie kokšķiedru piesātinājuma mitruma, mm;
E	egle (<i>Picea abies</i> L.);
E_c	elastības modulis spiedē, MPa;
$E_{m,l}$	lokālais elastības modulis četrpunktu liecē, MPa;
EN	Eiropas standarts;
E_t	elastības modulis stiepē, MPa;
F	spēks, N;
f_c	robežstiprība spiedē, MPa;
FIGRA	ugunsgrēka attīstības ātruma indekss, $W\ s^{-1}$;
f_m	robežstiprība četrpunktu liecē, MPa;
F_{sk}	skrūvju izraušanas pretestība, N;
f_{sl}	līmētā savienojuma robežstiprība bīdē, MPa;
f_t	robežstiprība stiepē, MPa;
$f_{t,apl}$	robežstiprība stiepē perpendikulāri pret aplīmēta koksnes šūnveida materiāla plakni, MPa;
f_v	robežstiprība bīdē, MPa;
G	elastības modulis bīdē, MPa;
GLT	kārtās līmēts konstrukciju kokmateriāls;
h	parauga augstums, mm;
HDF	augsta blīvuma kokšķiedru plātne;
ISO	Starptautiskā Standartizācijas organizācija;
k_b	brīšanas koeficients, % $\%^{-1}$;
KŠM	koksnes šūnveida materiāls;
KŠM0	koksnes šūnveida materiāls paralēlā virzienā;
KŠM90	koksnes šūnveida materiāls perpendikulārā virzienā;
k_r	rukšanas koeficients, % $\%^{-1}$;
k_v	tilpuma rukšanas koeficients, % $\%^{-1}$;
l	parauga garums, mm;
LLU	Latvijas Lauksaimniecības universitāte;
LVS	Latvijas Valsts standarts;
Maks.	maksimālā vērtība;
Min.	minimālā vērtība;
MDF	vidēja blīvuma kokšķiedru plātne;
MPa	megapaskāls;
Os	osis (<i>Fraxinus excelsior</i>);
OSB	orientēto kokskaidu plātne;
P	priede (<i>Pinus sylvestris</i> L.);
PB	kokskaidu plātne;
PW	bērza (<i>Betula pendula</i>) saplāksnis;

R -	skaņas vājinājuma indekss, dB;
r -	korelācijas koeficients;
R^2 -	determinācijas koeficients;
R_u -	absolūtais rukums, %;
R_v -	absolūtais tilpuma rukums, %;
R_w -	normalizētais skaņas gaisā izolācijas indekss, dB;
R'_w -	faktiskais normalizētais skaņas gaisā izolācijas indekss, dB
S -	parauga laukums, mm ² ;
SBI -	vienotās dedzināšanas iekārta;
S_d -	ūdens tvaika pretestības difūzijai ekvivalents gaisa slāņa biezums, m;
SD -	standartnovirze;
SIP -	konstruktīvi izolētais panelis;
SMOGR -	dūmu palielināšanās ātrums, m ² s ⁻² ;
THR _{600s} -	kopējā siltuma izdalīšanās 600 s laikā, MJ;
TMMBa -	termo-mehāniski modificēts balttalksnis;
TSP _{600s} -	kopējā dūmu izdalīšanās 600 s laikā, m ² ;
U -	siltuma caurlaidības koeficients, W m ⁻² K ⁻¹ ;
VAR -	variācijas koeficients, %;
W -	mitrums, %;
W_l -	līdzsvara mitrums, %;
α -	skaņas absorbcijas koeficients;
ΔI -	vidējās izmēru izmaiņas, mainoties materiāla mitrumam noteiktās robežās, mm;
ΔW -	vidējās mitruma izmaiņas, mainoties materiāla mitrumam noteiktās robežās, %;
λ -	siltumvadītspējas koeficients, W m ⁻¹ K ⁻¹ ;
μ -	ūdens tvaika difūzijas pretestības koeficients;
ρ -	blīvums, kg m ⁻³ ;
0 -	rādītājs noteikts KŠM paralēlā virzienā, masīvkoksnei šķiedru virzienā vai plātņu materiāliem plātnes garenvirzienā;
90 -	rādītājs noteikts KŠM perpendikulārā virzienā, masīvkoksnei šķērsām šķiedrām vai plātņu materiālam plātnes šķērsvirzienā.

Indeksi:

0 -	rādītājs noteikts vai paraugs izgatavots KŠM paralēlā virzienā, masīvkoksnei šķiedru virzienā vai plātņu materiāliem plātnes garenvirzienā;
12 -	rādītājs pie standartmitruma 12 %;
90 -	rādītājs noteikts vai paraugs izgatavots KŠM perpendikulārā virzienā, masīvkoksnei šķērsām šķiedrām vai plātņu materiālam plātnes šķērsvirzienā;
k -	zemākā 5 % kvatiles raksturlieluma vērtība;
max -	maksimālā vērtība.

IEVADS

Dažādu konstrukciju ražošanas, transportēšanas un izmantošanas izmaksu samazināšana vienmēr ir bijis aktuāls jautājums, raugoties gan no ekoloģiskajiem, gan arī ekonomiskajiem aspektiem.

Viens no veidiem, kā to iespējams realizēt, ir samazināt vairākslāņu (kārtu) materiāla (kompozītmateriāla jeb kompozīta) masu, aizstājot kādu no materiāla kārtām ar citu koksnes vai nekoksnes materiālu, kura masa ir salīdzinoši zemāka. Tātad šis konstruktīvais risinājums kļūst vieglāks. Vairāki pētnieki ir meklējuši jaunus tehnoloģiskos risinājumus vieglu koksnes konstrukciju izgatavošanai (Skuratov 2010; Voth 2009), tajā skaitā arī vieglo plātņu materiālu izgatavošanas izmaksu samazināšanai (Pflug u.c., 2003). Pētījumos minētās tehnoloģijas plaši tiek lietotas saliktu kompozītu izgatavošanai, visbiežāk iekšējo kārtu veidojot no materiāla ar zemāku blīvumu, bet ārējās kārtās izmantojot materiālu ar augstāku blīvumu, kas nodrošina kompozītam nepieciešamās mehāniskās īpašības.

Koksnes šūnveida materiāla (KŠM) un tā mēbeļu plātņu ar firmas zīmi *Dendrolight*[®], izgudrošanu 2005. gadā un patentēšanu 2009. gadā Austrijā var uzskatīt par pēdējās piecpadsmitgades vienu no ievērojamākajām kokrūpniecības inovācijām. Materiālu izgudroja austriešu profesors Johans Bergers (Johann Berger), par pamatu ņemot slēpju izgatavošanā izmantoto tehnoloģiju^{1,2}.

Materiāla izgatavošanas tehnoloģijas izstrādes sākuma posmā un saistībā ar patenta iesniegšanas jautājumu sākotnēji bija pieejama ierobežota informācija par jauno materiālu, tā izgatavošanas tehnoloģisko procesu un īpašībām.

Latvijā, Ventspilī 2010. gadā tika atklāta pasaulē pirmā KŠM un no tā izgatavoto mēbeļu plātņu rūpnieciskā ražotne. Materiālam tika prognozētas plašas izmantošanas iespējas ne tikai mēbeļu plātņu izgatavošanā, bet arī transporta rūpniecībā un būvniecībā. Šāda materiāla izgatavošanas un izmantošanas pieredzes nebija ne Latvijā, ne arī pasaulē. Līdz tam publiski bija pieejama KŠM izgudrotāja Johana Bergera prezentācija³ un publikācija (Follrich u.c., 2006), kurā tika atspoguļotas nozīmīgākās KŠM kā mēbeļu plātņu īpašības. Jāuzsver, ka tā laika pētījumā KŠM konstruktīvais risinājums atšķīrās no šobrīd attīstītās tehnoloģijas. Lameļu rievās sākotnēji tika iestrādātas vienā lameles plaknē.

Uzsākot KŠM rūpniecisko ražošanu Latvijā, augstākas formas stabilitātes nodrošināšanai un līmētā savienojuma kontakta laukuma palielināšanai tika ieviesta abpusējā lameļu rievu iezāģēšanas tehnoloģija (vienpusējās iezāģēšanu tehnoloģijas vietā), pateicoties kurai tika prognozēta materiāla fizikālo un mehānisko īpašību uzlabošanās.

Pamatojoties uz iepriekš minētajiem faktiem, var apgalvot, ka līdz jaunās uzbūves KŠM pirmā pilotpētījuma veikšanai Latvijā 2009. gadā (Iejavs u.c., 2009) un ražošanas uzsākšanai 2010. gadā nebija pieejama informācija par šādas uzbūves materiāla īpašībām.

KŠM rūpnieciskās ražošanas uzsākšana vietējiem ražotājiem globālā mērogā būtu pavērusi ievērojamas priekšrocības, lai paplašinātu ražotās produkcijas klāstu ar produktiem, kuru struktūra veidota no KŠM. Šūnveida materiāla īpašību izpēti un deklarēšana ļautu piedāvāt dažādu izstrādājumu ražotājiem jaunu materiālu, kas pie noteiktiem stiprības parametriem ievērojami var samazināt izgatavojamā produkta masu un uzlabot tā kvalitāti.

Līdz 2010. gadam nebija veikta KŠM īpašību salīdzināšana ar tipisku koksnes materiālu īpašībām lietošanai kā nenesošajās, tā nesošajās būvkonstrukcijās. Īpašību izpēti atspoguļotu konkrētā materiāla priekšrocības vai iespējamus trūkumus salīdzinājumā ar citiem, kokrūpniecībā plaši izmantotiem koksnes materiāliem. Šī iemesla dēļ ir veikti inovatīvā materiāla pētījumi, kuros atainotas konkrētā materiāla nozīmīgākās īpašības un to ietekmējošie faktori.

¹ <http://www.faqs.org/patents/inventor/berger-at-5/>, skatīts 06.10.2009.

² <http://www.vatp.lv/en/skis-dendrolight>, skatīts 18.01.2012.

³ <http://www.dendrolightturkiye.com/data.pdf>, skatīts 05.03.2011.

Pēdējā desmitgadē koksnes materiālu īpašību prognozēšana ir kļuvusi par efektīvu metodi jaunu produktu izstrādē. Veicot īpašību prognozēšanu, izmantojot datormodelēšanas iespējas, nākas saskarties ar koksnes un koksnes materiālu lielo fizikāli mehānisko un fizikāli ķīmisko rādītāju izkliedi, kuru būtiski palielina mainīgie vides parametri. Salīdzinot ar tādiem neorganiskajiem materiāliem kā betons, metāls un polimērmateriāli, koksnes un koksnes materiālu fizikāli mehāniskās īpašības ir ar daudz lielāku rādītāju izkliedi, kas apgrūtina īpašību prognozēšanu. Lai efektīvi un precīzi spētu izmantot datormodelēšanas iespējas, ir nepieciešams zināt modelējamā materiāla īpašību raksturvērtības, ko apliecina arī Rīgas Tehniskās universitātes zinātnieki un viņu veiktie pētījumi (Labans u.c., 2010).

KŠM izmantošana būvniecībā, durvju un būvelementu izgatavošanā tika izvirzīts kā uzņēmuma SIA „Dendrolight Latvija” nākotnes mērķis, uzsākot rūpnīcas otrās kārtas attīstību. Rūpnīcas ražošanas jauda 2011. gadā tika plānota līdz 65 tūkstošiem m³ KŠM un tā izstrādājumu gadā, bet faktiskie ražošanas un pārdošanas apjomi nākamajos pāris gados sasniedza tikai 10 % no plānotās jaudas gadā. Kā izejmateriāli tika izmantoti zemas kvalitātes kokmateriāli no maza caurmēra apaļkoksnes. Būtiskā atšķirība starp ražošanas jaudu un faktiskajiem ražošanas apjomiem skaidrojama ar jaunā produkta problemātisko virzīšanu tirgū (Graudiņš, 2013).

Pa nožēlu SIA „Dendrolight Latvija” ilgstošais apgrozāmo līdzekļu trūkums un neskaidrie patenta izmantošanas jautājumi bija iespējamie iemesli pasludinātajai uzņēmuma maksātnespējai 2014. gadā un uzņēmuma likvidēšanai 2016. gadā. Rezultātā tika pārtraukta KŠM rūpnieciska ražošana un tirdzniecība. Neskatoties uz to, atsevišķas pētnieciskās iestādes (Berger u.c., 2016; Rozins u.c., 2020) un ražošanas uzņēmumi (“Gisler Holzbau” GmbH; “ARB Pope” SIA) izstrādā un patentē līdzīga tehnoloģiskā risinājuma materiālus jaunu produktu izveidei un esošo produktu ražošanas efektivitātes paaugstināšanai. Iegūtās praktiski pielietojamās zināšanas par šī unikālā materiāla un tā paneļu īpašībām kļūs īpaši aktuālas, brīdī kad KŠM šādā vai citādā formā atgriezīsies ražošanā.

Nemot vērā iepriekš izteiktos apsvērumus, **promocijas darba mērķis** ir noskaidrot Latvijā ražota priedes koksnes šūnveida materiāla īpašības, izstrādāt konstruktīvi uzlabotu KŠM būvniecības paneļu prototipus un novērtēt to īpašības.

Darba tēzes:

1. koksnes šūnveida materiāla īpašības atšķiras no masīvkoksnes un koksnes bāzes plātņu materiālu īpašībām;
2. koksnes šūnveida materiāla konstruktīvā uzlabošana ar aplīmēšanas paņēmieni būtiski uzlabo materiāla fizikālās, fizikāli – ķīmiskās un mehāniskās īpašības.

Darba mērķa sasniegšanai izvirzīti šādi darba uzdevumi:

1. apkopot un analizēt informāciju par KŠM un citu koksnes materiālu izgatavošanas tehnoloģijām, īpašībām, to ietekmējošiem faktoriem;
2. izstrādāt metodiku un noskaidrot KŠM īpašības, tās salīdzinot ar masīvkoksnes un koksnes plātņu materiālu īpašībām;
3. izstrādāt pētījumu metodiku un novērtēt, galvenokārt, ar aplīmēšanas paņēmieni konstruktīvi uzlabotu KŠM būvniecības paneļu prototipu īpašības, tās salīdzināt ar plaši būvniecībā izmantoto koksnes materiālu un pēc pielietojuma līdzīgu izstrādājumu īpašībām.

Pētījumu metodes

Pētījumi saskaņā ar izvirzīto mērķi un no tā izrietošiem uzdevumiem veikti ar eksperimentāli empīrisko datu iegūšanas un matemātiskās statistikas aprēķinu metodēm, izmantojot datorprogrammu paketes *MS Excel Analyze-it* un *SPSS 13.0*. Praktisko pētījumu metožu pamatā ir koksnes izstrādājumu un plātņu materiālu fizikāli mehānisko un fizikāli

ķīmisko īpašību pārbaudes un aprēķinu metodes. Darbā izmantotas galvenokārt LBTU Kokapstrādes katedras un SIA “Meža un koksnes produktu pētniecības un attīstības institūts” materiālu pārbaudes iekārtas un datortehnika. Mehānisko īpašību noteikšanai pārbaudes iekārtas *ZWICK/Z100* un *INSTRON KN600*, materiālu siltumvadītspējas noteikšanai iekārta *Fox 600*, ugunsreakcijas īpašību noskaidrošanai vienotā dedzināšanas iekārta *SBI*. Pētījumu veikšanai izmantots rūpnieciski izgatavots KŠM, kura konstruktīvā uzlabošana veikta gan laboratorijas, gan arī rūpnieciskos apstākļos.

Promocijas darba zinātniskā novitāte:

- noteiktas KŠM īpašības, analizēti to ietekmējošie faktori, kā arī iegūtas sakarības KŠM īpašību prognozēšanai;
- izstrādāti konstruktīvie risinājumi KŠM īpašību uzlabošanai ar aplīmēšanas paņēmienu, noteiktas un salīdzinātas to īpašības ar mēbeļu rūpniecībā un būvniecībā plaši izmantoto koksnes materiālu īpašību rādītājiem;
- izstrādāti KŠM būvniecības paneļu prototipi, noteiktas un salīdzinātas to īpašības ar līdzīgu izstrādājumu īpašībām un būvnormatīvos noteiktajām prasībām.

Darba praktiskā nozīmība

Promocijas darbā noteiktās un apkopotās KŠM īpašības un to sakarības sniedz iespēju veikt inženiertehniskos aprēķinus un īpašību prognozēšanu dažādiem izstrādājumiem un konstrukcijām, kuras projektētas, izmantojot KŠM. Izstrādāti vairāki plātņu materiālu un būvniecības paneļu prototipi, kuros KŠM uzlabots ar konstruktīvo jeb aplīmēšanas paņēmienu, izmantojot masīvkoksni un koksnes plātņu materiālus. Prototipiem noteiktas indikatīvās fizikālās, mehāniskās un fizikāli-ķīmiskās īpašības, lai raksturotu durvju vērtnēm, sienu un pārsegumu paneļiem izvirzīto prasību īpašības. Salīdzinātas KŠM un uzlaboto paneļu prototipu īpašības, novērtēta paneļu prototipu īpašību atbilstība būvnormatīvos noteiktajām prasībām.

1. SITUĀCIJAS ANALĪZE

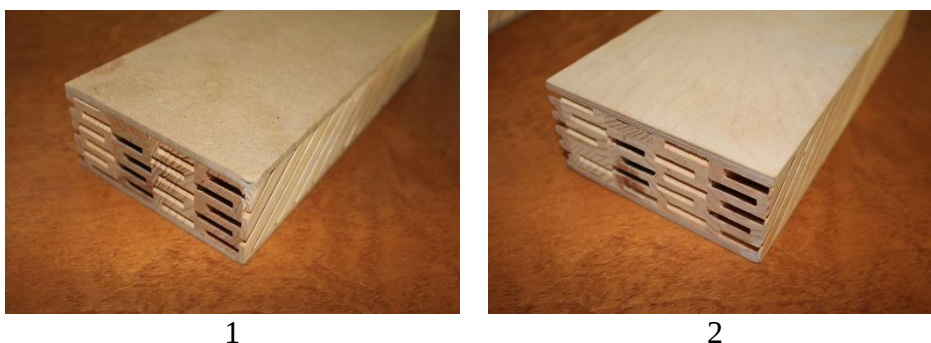
1.1. Koksnes šūnveida materiāls, tā izgatavošanas tehnoloģija un potenciālās izmantošanas iespējas

Pēdējo gadu laikā vieglo plātņu izstrādei kokrūpniecības sektors pievērsies vairāku apsvērumu dēļ - pirmkārt, samazinās atbilstošas kvalitātes tirgū pieejamie koksnes resursi, tādējādi vieglo plātņu izgatavošanas tehnoloģijas dod iespēju ievērojami samazināt materiāla patēriņu, salīdzinot ar klasiskajām plātņu izgatavošanas tehnoloģijām; otrkārt, vieglās plātnes nodrošina iespēju samazināt izmaksas plātņu turpmākās apstrādes procesu īstenošanai, plātņu transportēšanai un montāžai.

Visbiežāk vieglās plātnes tiek izgatavotas kā trīsslāņu (trīs kārtu) kompozītmateriāls. Vidējais slānis tiek veidots no materiāliem, kas ievērojami samazina plātnes masu, savukārt nosedzošie slāņi no abām pusēm nodrošina nepieciešamās fizikāli mehāniskās īpašības. Plātņu iekšējā slāņa izgatavošanai iespējams izmantot visplašāko materiālu spektru, tie var būt gofrētie elementi (no saplākšņa, kartona, polipropilēna vai pat alumīnija), kas pēc aplīmēšanas ar ārējiem slāņiem veido gaisa ieslēgumus. Lieto arī viendabīgos vieglo plātņu pildījumus, koksnes materiālus - korķi un balzu, neorganiskos materiālus - putupoliuretānu, putupolistirolu u.c. Arī ārējo kārtu materiāliem atkarībā no plānotiem vieglo plātņu ekspluatēšanas apstākļiem var izmantot daudzveidīgus materiālus, sākot ar papīru, kartonu, masīvkoksni, finieri, klasiskajām koksnes plātnēm (kokšķiedru plātnes, orientēto kokskaidu plātnes, saplākšņi, kokskaidu plātnes u.c.) un beidzot ar alumīnija un minerālsavienojumu plātnēm.

Vispopulārākais paņēmieni visu trīs slāņu savienošanai ir līmēšanas paņēmieni. Līmi un līmēšanas tehnoloģiju izvēlas galvenokārt pēc piemērotības konkrēto vieglo plātņu materiālu salīmēšanai un plānotajiem ekspluatācijas apstākļiem. Tiek izmantotas kokrūpniecībā plaši lietotās līmes uznešanas metodes. Plātņu presēšanai izmanto gan nepārtrauktas darbības, gan daudzstāvu preses. Mazāk izplatīts ir ekstrūzijas paņēmieni, kas tiek lietots vieglo dobo kokskaidu plātņu izgatavošanai, tās galvenokārt tiek izmantotas durvju ražošanai. Kā trūkumu no dažādiem materiāliem izgatavotām vieglajām plātnēm var uzskatīt to problemātiskās utilizācijas iespējas.

Dendrolight[®] trīs kārtu plātnes galvenokārt tiek izgatavotas no egles vai priedes KŠM iekšējās kārtas un augsta blīvuma kokšķiedru plātnes vai saplākšņa ārējās kārtās, skat 1.1. att.



1.1. att. *Dendrolight*[®] trīs kārtu mēbeļu plātnes:

1 - ar augsta blīvuma kokšķiedru plātni ārējās kārtās un 2 - ar bērza saplākšni ārējās kārtās.

Šī veida plātņu masa tiek samazināta izgatavošanas tehnoloģiskajā procesā, kad masīvkoka dēļos visā to garumā tiek iestrādātas abpusējas rievas.

Dendrolight trīs kārtu plātņu ražošanas tehnoloģiskais process ir sarežģīts un tiek realizēts ar specializētām iekārtām. Pateicoties samazinātajai plātņu materiāla masai, ievērojami tiek samazinātas gatavā produkta apstrādes, transportēšanas un uzstādīšanas izmaksas, salīdzinot ar masīvkoksnes un citu plātņu materiālu durvju un mēbeļu elementiem.

Dendrolight[®] trīs kārtu plātņu materiāla izgatavošanas tehnoloģiskā plūsma parādīta 1.2. attēlā.



1.2. att. *Dendrolight*[®] trīs kārtu plātņu izgatavošanas tehnoloģijas principiālā shēma.

KŠM vidējie slāņi tiek veidoti no četrām kopā salīmētām sagatavēm jeb kārtām, kuras attiecībā pret preses plakni tiek orientētas 45° leņķī. Katras nākamās kārtas sagataves attiecībā pret iepriekšējās kārtas sagatavēm tiek orientētas 90° leņķī, tādējādi iegūstot KŠM bloku, kuru izmanto trīs kārtu plātņu iekšējo kārtu izgatavošanai, skat. 1.3. att.



1.3. att. Četru kārtu KŠM izgatavošanas princips⁴:

1 - sagatave ar abpusēji iezāģētām rievām; 2 - sagatavju līmēšana biezumā; 3 - KŠM bloks.

KŠM izgatavošanai no egles vai priedes koksnes izmanto polivinilacetāta (PVA) līmi. Saistībā ar karsto līmēšanas tehnoloģiju un specializēto līmes uzklāšanas iekārtu citu līmju izmantošana KŠM līmēšanas līnijā nav iespējama. Uzsākot reālu būvelementu izstrādi, izmantojot KŠM, esošā līmēšanas tehnoloģija un līmes uznešanas aprīkojums ir jāaizstāj ar būvelementu izgatavošanai sertificētu līmi un līmēšanas tehnoloģiju.

Pēc iekšējo kārtu sagatavju salīmēšanas kopā tiek iegūts KŠM bloks ar paralēlo virzienu (attiecībā pret līmēšanas preses padevi), skat. 1.4. att.

⁴ <http://www.dendrolight.lv>, skatīts 02.01.2011.



1



2

1.4. att. Atšķirīgie KŠM virzieni:

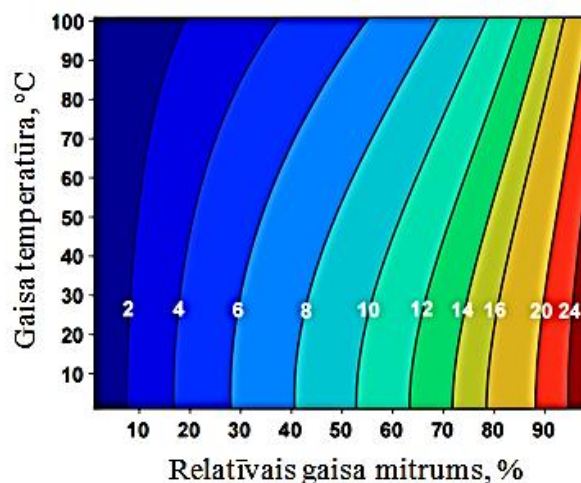
1 - paralēlais (KŠM₀) un 2 - perpendikulārais (KŠM₉₀).

Turpmākajās apstrādes operācijās veic KŠM bloka sazāģēšanu nepieciešamā biezuma sagatavēs, kuras orientē 45° leņķī un kalibrē, iegūstot KŠM ar perpendikulāro virzienu (skat. 1.4. att. 2). KŠM perpendikulārā virzienā aplīmējot ar kādu no ārējās kārtas materiāliem, iegūst *Dendrolight*[®] trīs kārtu plātnes. Ārējās kārtās var izmantot praktiski jebkura veida masīvkoksnes slāni, kā arī plātņu materiālus, kuriem iespējams nodrošināt pietiekami labu saistīšanos ar KŠM perpendikulārā virzienā. Pēc aplīmēšanas tiek veikta plātņu sazāģēšana nepieciešamajos formātos. Ņemot vērā neaplīmēta KŠM virsmas uzbūvi, tā izmantošanas iespējas ir ierobežotas. Neaplīmētu materiālu galvenokārt varētu izmantot dizaina priekšmetu izgatavošanā. Savukārt trīs kārtu KŠM plātņu un būvniecības izstrādājumu potenciāls ir ļoti plašs: ēku būvelementu sastāvdaļas (nesošo un nenesošo sienas elementi, kāpnes, logi un durvju sagataves) ar samazinātu svaru un uzlabotām termiskajām un akustiskajām īpašībām. Sākotnējo KŠM trīs kārtu plātņu pielietojums galvenokārt tika orientēts tikai uz lielizmēra mēbeļu sagatavju izgatavošanu, bet materiāla uzbūve un īpašības ļauj to izmantot transporta industrijā, piemēram, kā kravas mašīnas grīdas elementus vai kā iepakojamo materiālu. Dizaina elementi liekti līmētās konstrukcijās arī ir viens no aplīmēta KŠM izmantošanas veidiem.

1.2. Koksnes materiālu fizikālās īpašības un to ietekmējošie faktori

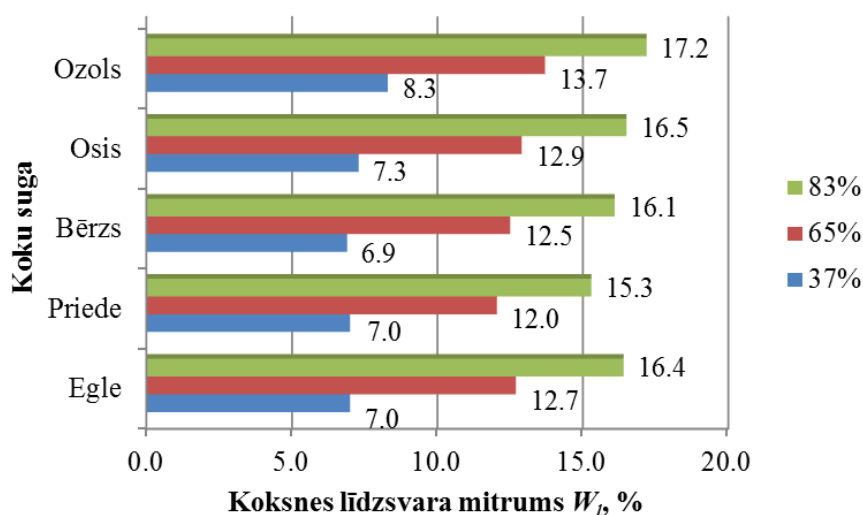
1.2.1. Mitrums

Tā kā koksne ir higroskopisks materiāls, tad tās faktiskais mitrums ir atkarīgs no apkārtējās vides temperatūras un gaisa relatīvā mitruma. Gaisa relatīvajam mitrumam paaugstinoties, koksnes mitrums palielināsies, savukārt temperatūras paaugstināšanās koksnes mitrumu samazina un otrādi (Bowyer u.c., 2003). Ilgākā laika periodā nodrošinot nemainīgus gaisa parametrus, koksnes un koksnes materiāli cenšas ieņemt tā saucamo līdzsvara mitrumu, pie kura izdalītā mitruma daudzums ir vienāds ar uzņemtā mitruma daudzumu. Koksnes materiāliem sasniedzot līdzsvara mitrumu, masa nemainās (Rowell, 2005). Koksnes mitruma raksturošanai koksnes zinātnē pieņemts izmantot absolūto mitrumu. Simpsons izstrādājis matemātisko aprēķinu modeli koksnes līdzsvara mitruma aprēķināšanai atkarībā no relatīvā gaisa mitruma un temperatūras (Simpson, 1973). Koksnes līdzsvara mitruma praktiskai noteikšanai ir izstrādātas universālas tabulas un grafiki, kas praksē plaši tiek izmantoti daudzām koku sugām (skat. 1.5. att.).



1.5. att. Koksnes līdzsvara mitrums atkarībā no gaisa temperatūras un relatīvā gaisa mitruma⁵.

Veicot pētījumus, jāņem vērā, ka starp koksnes līdzsvara mitrumu un ekspluatācijas apstākļiem pastāv nelineāras sakarības. Dažu koku sugu līdzsvara mitruma atkarība no gaisa relatīvā mitruma parādīta 1.6. attēlā.



1.6. att. Dažu koku sugu koksnes līdzsvara mitrums atkarībā no gaisa relatīvā mitruma: DIN 68100:1984.

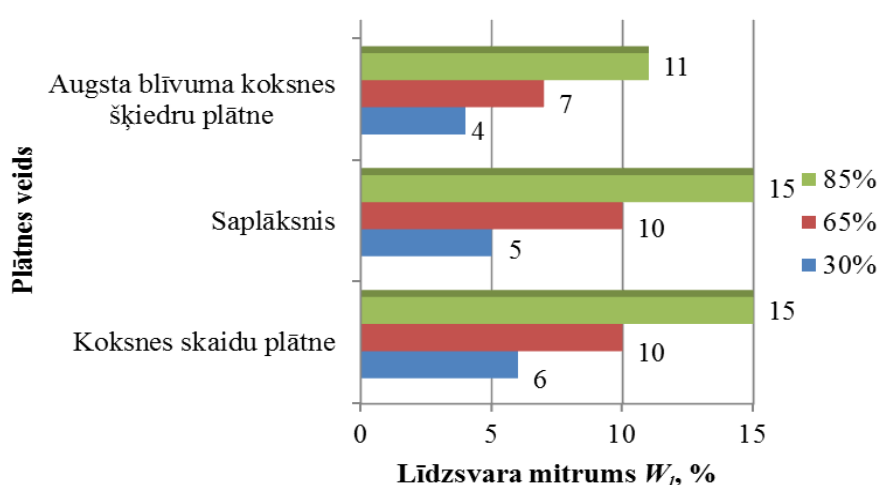
Iepriekš norādītajā 1.6. attēlā aplūkotas standartā ietvertās dažu Latvijā rūpnieciski nozīmīgāko koku sugu līdzsvara mitruma vērtības pie gaisa relatīvā mitruma 37 un 83 %, kā arī temperatūras 20 °C. Koksnes līdzsvara mitrums pie relatīvā gaisa mitruma 65 % aprēķināts ar interpolācijas metodi. Kā redzams, dažādu koku sugu koksnes līdzsvara mitruma vērtību atšķirība pie vienāda gaisa relatīvā mitruma līmeņa nepārsniedz 2 %. Koksnes mitrumam pieaugot, palielinās arī blīvums. Tas izskaidrojams ar to, ka blīvākai koksnei ir vairāk kokšķiedru, kuras var uzņemt no gaisa mitrumu. Izņēmums ir egles koksne, kuras līdzsvara mitrums ir augstāks par blīvākās priedes un bērza koksnes līdzsvara mitrumu.

KŠM saistībā ar izmantotajiem materiāliem tā izgatavošanā, ir identisks tādiem koksnes izstrādājumiem kā līmētie konstrukciju kokmateriāli un krustām līmēto konstrukciju kokmateriālu paneli, kā rezultātā, KŠM var prognozēt tādas pašas mitruma izmaiņas apkārtējās vides ietekmē kā minētajiem materiāliem.

⁵ http://www.fpl.fs.fed.us/documnts/fplgtr/fplgtr190/chapter_04.pdf, skatīts 03.02.2013.

Lielākajai daļai plātņu materiālu mitrums pēc kondicionēšanas standarta atmosfērā ir zemāks nekā koksnei, no kuras konkrētais materiāls ir izgatavots. Bērza saplākšņu mitrums pēc ražošanas ir robežās no 7 līdz 10 % (Lūsiņa u.c., 2007), vidēji par 2 līdz 5 mitruma % zemāks nekā bērza koksnei. Saplākšņa izgatavošanas tehnoloģiskajā procesā notiek finieru vairākkārtēja apstrāde, augstās temperatūrās to žāvējot un līmējot, materiāls tiek termiski modificēts un sablīvināts, kā rezultātā samazinās koksnes materiāla mitruma absorbcijas spēja. Finieru žāvēšanas režīmu ietekmi uz saplākšņa līdzsvara mitrumu dažādu koku sugu saplākšņiem pētījis Audins (Aydin, 2014), noskaidrojot, ka paaugstinātā temperatūrā žāvēta finiera mitrums būtiski samazina saplākšņa līdzsvara mitrumu pēc kondicionēšanas standarta atmosfērā. Līdzīga sakarība novērota arī citiem plātņu materiāliem, kuru ražošanā koksnes izejmateriāls tiek pakļauts augstai temperatūrai. Arī līmju mitruma uzsūkšanas spēja ir zemāka nekā koksnei, kas papildus samazina līmētā koksnes materiāla mitrumu (Bowyer u.c., 2003).

Plātņu materiālu līdzsvara mitrums pie dažādiem gaisa relatīvā mitruma līmeņiem parādīts 1.7. att.



1.7. att. Dažu koksnes plātņu materiālu līdzsvara mitrums atkarībā no gaisa relatīvā mitruma:

DIN 68100:1984.

Kā redzams 1.7. attēlā, augsta blīvuma kokšķiedru plātnēm līdzsvara mitrums ir zemāks, jo to izgatavošanā izmanto vairāk sveķu un līmju nekā saplākšnim un kokskaidu plātnēm.

Zāģmateriālu transportēšana nereti mēdz būt ilgstošs process, tādēļ tiek izvirzītas prasības attiecībā uz zāģmateriālu mitrumu transportēšanas brīdī jeb transporta mitrumu. Parasti zāģmateriālus pirms transportēšanas žāvē, līdz tie sasniedz vidēji 20 % mitruma saturu, kas daudzām koku sugām ir augšējā robeža, virs kuras rodas labvēlīga vide koksnes bioloģisko noārdītāju attīstībai.

Būvniecībā izmantojamās koksnes materiālus atkarībā no to ekspluatācijas apstākļiem iedala 3 ekspluatācijas klasēs (LVS EN 1995-1-1+AC+A1:2012). Lielākā daļa koksnes izstrādājumu un plātņu materiālu ir izmantojama 1. un 2. ekspluatācijas klasē.

Gadījumos, ja mitrums jānosaka tādiem kompozītiem, kas veidoti, piemēram, no plātnes un masīvkoksnes, precīzāki rezultāti tiks iegūti, izmantojot (lielākajam materiālam konstrukcijā proporcionāli pēc masas) atbilstošo pārbaudes metodi.

Koksnes mitrumu var ietekmēt daudzi iepriekš minētie faktori, kurus ne vienmēr iespējams precīzi prognozēt. Šī iemesla dēļ eksperimentālajos pētījumos, kuros nosakāmie rādītāji ir atkarīgi no koksnes mitruma, var rekomendēt materiāla mitruma kontroli. Tādējādi tiek iegūta visprecīzākā informācija par koksni vai koksnes materiālu mitrumu un tā iespējamo ietekmi uz pētāmo īpašību.

1.2.2. Blīvums

Koksnes un koksnes materiālu blīvums būtiski ietekmē to fizikālās, fizikāli ķīmiskās un arī mehāniskās īpašības.

Koksnes blīvums galvenokārt ir atkarīgs no koku sugas, koku vecuma, koku augšanas apstākļiem, koksnes mitruma, atrašanās vietas stumbrā, koksnes anatomiskās uzbūves, koksnes vainām un ģenētiskā materiāla.

Dažādām koku sugām blīvums var būtiski atšķirties. Literatūrā minētas šādas blīvuma ρ_{12} (kg m^{-3}) vērtības Baltijas valstīs augošām koku sugām, pie koksnes mitruma 12 %: egles 465, priede 535, bērzs 665 un osis 673 (Волынский, 2000). Savukārt Vācijas standartā DIN 68100 dažādām koku sugām ir norādītas šādas blīvuma ρ_{12} (kg m^{-3}) vērtības: egles 470, priede 520, bērzs 650 un osis 690. Kā redzams, dažādos avotos atšķiras dažādu koku sugu vidējās blīvuma vērtības, tomēr maksimālā atšķirība nepārsniedz 20 kg m^{-3} . Pie vienāda mitruma augstākas blīvuma vērtības ir cieto lapkoku koksnei, vidēji blīva ir priede, savukārt zemākās blīvuma vērtības ir eglei un apsei.

Koksnei augot labvēlīgos augšanas apstākļos, gadskārtas platums ir lielāks salīdzinājumā ar tās augšanu nelabvēlīgos apstākļos, kā rezultātā agrīnās koksnes daudzums šādā materiālā būtiski pārsniedz vēlīnās koksnes daudzumu, kas samazina koksnes blīvumu (Полубояринов, 1976).

Koksnes blīvums ir atkarīgs no parauga atrašanās vietas stumbrā. To ietekmē tas, vai paraugs ņemts stumbra garumā, vai šķēsgriezumā. Virzienā no galotnes uz saknēm priedes un bērza koksnes blīvums pieaug, savukārt egles koksnei tas samazinās (Repola, 2006), kā arī priedei aplievas koksne ir mazāk blīva nekā kodolkoksne (Aleinikovas, 2007). Koksnes vielas blīvums, neņemot vērā dobumus, ir ap 1520 kg m^{-3} (Bowyer u.c., 2003).

Literatūrā salīdzinoši plaši pētītas dažādu koksnes un koksnes materiālu mehāniskās īpašības, kā vienu no papildu rādītājiem nosakot tās blīvumu. Piemēram, pēc egles koksnes kondicionēšanas standarta atmosfērā pie $20 \pm 2^\circ \text{C}$ temperatūras un $65 \pm 5\%$ relatīvā gaisa mitruma vairāki autori ieguvuši vidējo egles koksnes blīvumu ρ_{12} , no 414 līdz 422 kg m^{-3} (Sviták u.c., 2014; Mayes un Oksanes, 2003; Brandner u.c., 2007). Savukārt atsevišķi autori uzrādījuši krietni zemāku egles koksnes blīvumu 385 kg m^{-3} , ko noteikuši izžāvētai koksnei līdz absolūti sausam stāvoklim (Repola, 2006). Vācu zinātnieks Wagenfuhrs (Wagenführ, 1996) publicējis būtisku egles koksnes blīvuma rādītāju izkliedi pie koksnes mitruma 12 līdz 15 %, robežās no 330 līdz 680 kg m^{-3} .

Iepriekš veiktie pētījumi par impregnēšanas ietekmi uz egles koksnes līmēto ķīļtapu savienojumu robežstiprību liecē liecina, ka Latvijā augušas egles koksnes blīvums ρ_{12} variē robežās no 363 līdz 546 kg m^{-3} . Norādītajās robežās iekļaujas visu iepriekš minēto autoru noteiktās egles koksnes blīvuma vidējās vērtības. Pat gadījumā, ja apskatīta mitruma ietekme uz koksnes blīvumu robežās no 12 līdz 26 %, koksnes vidējais blīvums pieaug no 436 līdz 476 kg m^{-3} . Egles koksnes vidējais blīvums pieaug aptuveni par 3 kg m^{-3} , mitrumam palielinoties par 1 % (Iejavs, 2007^b).

Kā zināms, priedes koksnes vidējais blīvums ir lielāks nekā egles koksnei. Priedes koksnes vidējais blīvums ρ_{12} ir robežās no 538 līdz 573 kg m^{-3} (Aleinikovas, 2007; Mayes un Oksanes, 2003). Priedes koksnes vidējais blīvums ρ_0 ir 418 kg m^{-3} (Repola, 2006). Latvijā noteiktā priedes koksnes blīvuma vērtības ρ_{12} ir zemākas - no 492 līdz 505 kg m^{-3} (Šķēle u.c., 2002; Kalniņš un Liepiņš, 1933), ko var izskaidrot ar atšķirīgiem koku augšanas apstākļiem dažādos reģionos. Būtisku priedes koksnes blīvuma rādītāju izkliedi robežās no 330 līdz 890 kg m^{-3} pie koksnes mitruma 12 līdz 15 % publicējis Wagenfuhrs (Wagenführ, 1996). Pamatojoties uz šo analīzi, ir iespējams secināt, ka koksnei ir raksturīga liela blīvuma rādītāju izkliede - pat vienas koku sugas ietvaros. Tā jāņem vērā pie materiālu īpašību aprēķiniem un modelēšanas, rādītāju deklarēšanas un savstarpējas salīdzināšanas.

Dažādām koksnes vainām ir būtiska ietekme uz koksnes blīvumu. Kā piemēru var minēt zarus un sveķu ailes (ligzdas), kuru klātbūtne koksņē ievērojami palielina tās blīvumu.

Savukārt, ja koksnē ir sastopamas tādas koksnes vainas kā mizas ieaugumi un plaisas, koksnes blīvums var būtiski samazināties. Lai izvairītos no koksnes vainu ietekmes uz materiāla blīvumu, pētījumos un materiālu novērtēšanā bieži tiek izgatavoti paraugi bez koksnes vainām (LVS EN 408+A1:2012).

Koksnei kā plātņu materiālu izgatavošanas izejmateriālam ir būtiska ietekme uz plātņu materiālu fizikāli mehāniskajām īpašībām. Bieži tā ir problēma, jo nav zināma koksnes izcelsme, koku sugu attiecība piegādātajā izejmateriāla partijā, no kuras vietas kokā koksne ir ņemta un kādi ir bijuši koku augšanas apstākļi.

Koksnes plātņu materiālu blīvums ir atkarīgs ne tikai no koksnes mitruma, blīvuma, bet arī no saistvielu blīvuma, koksnes un saistvielu attiecības materiālā, kā arī materiāla izgatavošanas tehnoloģiskā procesa. Kā piemēru var minēt saplākšņu izgatavošanas tehnoloģisko procesu, kad no lobītiem finieriem un līmes tiek izgatavoti saplākšņi. Kā galvenie saplākšņu blīvumu ietekmējošie faktori literatūrā tiek minēti - koksnes blīvums, koksnes mitrums, līme, saplākšņu sapresēšanās pakāpe līmēšanas procesā un biezums (Ozoliņš, 2005). Saistībā ar koksnes sapresēšanos saplākšņu līmēšanas procesā saplākšņi ir par 15 % blīvāki nekā izmantojamā koksne. Blīvuma palielināšanos ietekmē arī izmantotā līme, jo tās blīvums bieži pārsniedz koksnes blīvumu (Vaņins, 1950). Latvijā ražoto bērza koksnes saplākšņu blīvums ir robežās no 650 līdz 750 kg m⁻³ (Lūsiņa u.c., 2007), kas pārsniedz bērza koksnes vidējo blīvumu 665 kg m⁻³ (Волынский, 2000).

Kokskaidu plātņu un orientēto skaidu plātņu (OSB) blīvums parasti ir 1.2 līdz 1.6 reizes augstāks nekā izmantojamai koksnei. Skaidu plātņu blīvums ir robežās no 590 līdz 880 kg m⁻³. Šajās plātnēs līme un sveķi pēc masas attiecības ir robežās no 3 līdz 12 %. OSB plātņu blīvums ir robežās no 610 līdz 700 kg m⁻³, bet to līmes un sveķu daudzums ir mazāks nekā skaidu plātnēm - robežās no 3 līdz 6 %. Lielākā blīvuma rādītāju izkliede ir kokšķiedru plātnēm, kuru blīvums ir atkarīgs no plātņu ekspluatācijas klases. Kokšķiedru izolācijas plātņu blīvums ir robežās no 160 līdz 480 kg m⁻³. Vidējā blīvuma kokšķiedru plātnes, kuras izmanto kā izolācijas materiālus, un vēja barjeras blīvums ir robežās no 500 līdz 800 kg m⁻³. Savukārt durvju izgatavošanā, grīdu un sienu apdarē izmanto augsta blīvuma kokšķiedru plātnes ar blīvumu no 800 līdz 1120 kg m⁻³. Kokšķiedru plātnes var saturēt līmi, sveķus un citas piedevas robežās no 0.5 līdz 30 % materiāla fizikālo un mehānisko īpašību uzlabošanai (Bowyer u.c., 2003).

1.2.3. Rukšana un briešana

Līdztekus faktam, ka koksne ir higroskopisks materiāls, tā ir arī anizotropisks materiāls. Tas nozīmē, ka materiāla īpašības ir atkarīgas arī no kokšķiedru virziena. Uzskatāmi to var novērot, salīdzinot koksnes izmēru izmaiņas dažādos tās virzienos. Ne tikai koksnei, bet arī koksnes materiāliem piemīt īpašība mainīt izmērus, tilpumu un arī formu, mainoties koksnes mitrumam un temperatūrai. Praktiskajos aprēķinos koksnes temperatūras ietekme uz izmēru izmaiņām netiek ņemta vērā, jo tā nav būtiska (Hoadley, 2000; Kokins un Staprāns, 1984; Ulpe un Kupče, 1991). Šī iemesla dēļ koksnes un koksnes materiālu pētījumos un praktiskajā izmantošanā galvenokārt tiek apskatītas ar mitrumu saistītās izmēru un tilpuma izmaiņas (Pavlovičs, 2011; Pang un Herritsch, 2005; Mirski un Dziurka, 2013).

Koksnes izmēru un tilpuma izmaiņas notiek koksnes mitruma robežās no 0 % līdz šķiedru piesātinājuma mitrumam ~30 %, visstraujāk 5 līdz 20 % robežās. (Kūliņš, 2004; Kokins un Staprāns, 1984). Priedes kokšķiedru piesātinājuma mitrums ir nedaudz zemāks ~28 % (Kūliņš, 2004).

Šūnu sienām uzbriestot, koksnes izmēri palielinās. Samazinoties mitrumam, izmēri samazinās, un materiāls sarūk. Rukšana un briešana dažādos koksnes virzienos notiek atšķirīgi. Tangenciālajā, radiālajā virzienā tās ir būtiski lielākas nekā šķiedru jeb aksiālajā virzienā. Tieši šīs rukšanas un briešanas atšķirības dažādos virzienos izraisa koksnes un

koksnes materiālu deformēšanos, mainoties tās mitrumam (Stalnaker, 1997). Izmantojot iegūtos rukšanas vai briešanas rādītājus visos trīs koksnes virzienos, iespējams aprēķināt koksnes tilpuma izmaiņas, ko var noteikt saskaņā ar standarta DIN 52184 prasībām.

Saistībā ar to, ka koksnei faktiskos ekspluatācijas apstākļos ir noteikts mitrums, praktiskiem aprēķiniem izmanto rukšanas koeficientu, nevis maksimālo rukumu. Rukšanas koeficients parāda, par cik procentiem mainās parauga izmēri vai tilpums, koksnes mitrumam samazinoties par 1 %. Zinot koksnes maksimālo rukumu un kokšsnes šķiedru piesātinājuma mitrumu vai koksnes rukšanas izmaiņas noteiktās mitruma robežās, iespējams aprēķināt koksnes rukšanas koeficientu.

Koksnes rukšanas procesam pretēja darbība ir briešanas process. Mitrumam koksnes šķiedrās palielinoties, var noteikt maksimālo lineāro vai tilpuma uzbriešanu. Zinot koksnes maksimālo uzbriešanu vai koksnes uzbriešanas izmaiņas noteiktās mitruma robežās, iespējams noteikt koksnes briešanas koeficientu.

Analizējot literatūru, noskaidrotas vairāku autoru minētās priedes koksnes rukšanas koeficientu vidējās vērtības, tangenciālajā virzienā tās ir robežās no 0.28 līdz 0.30 % %⁻¹, radiālajā 0.14 līdz 0.19 % %⁻¹, aksiālajā no 0.0057 līdz 0.01 % %⁻¹. Savukārt tilpuma rukšanas koeficients ir robežās no 0.42 līdz 0.43 % %⁻¹ (Kūliņš, 2004; Wagenfuhr, 1996; Dinwoodie, 2000; Rijdsdijk un Laming, 1994). Minētie rādītāji izmantojami, lai salīdzinātu priedes KŠM lineāros un tilpuma rukšanas koeficientus ar priedes koksnes rukšanas rādītājiem.

Koku suga būtiski ietekmē koksnes rukšanas un briešanas rādītājus. Latvijā augošu koku sugu maksimālā rukuma rādītāji apkopoti 1.1. tabulā.

Kā redzams 1.1. tabulā, koksnes maksimālais rukums dažādām koku sugām var būtiski atšķirties. Tā kā koksnes rukšana un briešana notiek, mitrumam izstvaikojot no koksnes šķiedrām vai tajās uzsūcoties, koksnei ar lielāku blīvumu, izmēru un tilpumu izmaiņas rukšanas un briešanas procesā būs lielākas nekā koksnei ar mazāku blīvumu.

1.1. tabula

Koksnes maksimālā rukuma rādītāji atkarībā no koku sugas (Kūliņš, 2004)

Koku suga	Blīvums, kg m ⁻³	Maksimālais rukums R, %			
		aksiāli	radiāli	tangenciāli	tilpumā
Osis	600	-	4.9	7.8	-
Bērzs	650	-	6.5	9.0	-
Egle	430	0.3	3.6	7.9	11.9
Priede	490	0.4	4.0	7.7	12.1

Koksnes rukšana un briešana ir lineārs un atgriezenisks process, tādējādi rukšanas un briešanas izmaiņas atkarībā no koksnes materiāla mitruma var aprakstīt, izmantojot lineārās korelācijas sakarības (Gorman, 1998).

No masīvkoksnes izgatavotiem izstrādājumiem ir līdzīgas rukšanas un briešanas īpašības kā izmantotajai koksnei - pie nosacījuma, ja savienoto koksnes elementu šķiedru virziens izstrādājumā ir vienāds.

Kārtās līmētājiem kokmateriāliem (GLT), kas veidoti no vairākās kārtās biežumā salīmētiem kokmateriāliem, rukšanas un briešanas rādītāji būtiski neatšķirsies no izmantotās koksnes rukšanas un briešanas rādītājiem. Savukārt krustām līmēto kokmateriālu panelu (CLT) garuma un platuma izmaiņas būtiski atšķirsies, jo tie veidoti vairākās kārtās līmējot kopā kokmateriālus, katru nākamo kārtu orientējot 90° leņķī pret iepriekšējo. Tā rezultātā materiāla rukšanu un briešanu garumā un platumā noteiks koksnes aksiālās un tangenciālās rukšanas komponentes. Savukārt biežumā materiāls saglabā koksnes radiālās un tangenciālās rukšanas īpašības. Kārtās līmēto konstrukciju kokmateriālu un krustām līmēto kokmateriālu panelu uzbūvi iespējams aplūkot 1.8. att.



1.8. att. Kārtās līmētie kokmateriāli (1) un krustām līmēto kokmateriālu paneli (2) ^{6; 7}.

Brandners apkopojis CLT paneļu ražošanas pieredzi un norādījis egles koksnes paneļu rukšanas un briešanas koeficientus materiāla garumā, platumā $0.02\ \%^{-1}$ un biezumā $0.24\ \%^{-1}$ (Brandner, 2014). Pētījumā norādītais rukšanas un briešanas koeficients paneļu garumā un platumā ir 6 līdz 13 reizes zemāks nekā egles koksnei radiālajā un tangenciālajā virzienā, bet uz pusi lielāks nekā egles koksnei aksiālajā virzienā. Savukārt rukšanas koeficients paneļa biezumā aptuveni atbilst egles koksnes radiālā un tangenciālā rukšanas koeficienta vidējai vērtībai $0.19\ \%^{-1}$. Minētā rādītāja atšķirība izskaidrojama ar tangenciālās koksnes īpatsvara pārkāpumu pār radiālo koksni paneļa biezumā.

Tādiem koksnes plātņu materiāliem kā saplākšņiem, kokskaidu plātnēm, OSB un MDF izmēru izmaiņas mitruma ietekmē notiek atšķirīgi no masīvkoksnes. Plātņu materiālu izmēru izmaiņas ierobežo: koksnes daļiņu un līmes attiecība materiālā; koksnes materiāla sapresēšanās pakāpe plātnes izgatavošanas procesā, kā arī līmes pretošanās spēja. Līdztekus tādiem materiāliem kā HDF plātnes līme daļēji aizpilda koksnes šūnas, tādējādi samazinot mitruma uzņemšanas spēju (Bowyer u.c., 2003).

Ka piemēru var minēt saplākšņus, kas veidoti no vairākām kopā salīmētām koksnes kārtām. Tām raksturīgi izmantotās koksnes aksiālā un tangenciālā virziena rukšanas un briešanas rādītāji. Salīmējot kārtas kopā, katru nākamo kārtu orientējot 90° leņķī pret iepriekšējo, veidojas materiāls, kam koksnes aksiālā virziena izmaiņas būtiski ierobežo tangenciālā virziena izmaiņas, kā rezultātā saplākšņa izmaiņas mitruma ietekmē plātnes garenvirzienā un šķērsvirzienā būs būtiski zemākas, nekā izmantotajai koksnei tangenciālajā virzienā. Savukārt izmaiņas pa materiāla biezumu būs mazākas nekā izmantotajai koksnei radiālajā virzienā, jo finiera skaidas saplākšņu izgatavošanas procesā tiek termiski apstrādātas un mehāniski sablīvinātas. (Bowyer u.c., 2003). OSB izmēru izmaiņas ir mazākas nekā izmantotajai koksnei, jo izmantotās sveķu līmes koksnes daļiņu salīmēšanai ierobežo koksnes daļiņu izmēru izmaiņas. Ņemot vērā to, ka OSB daļiņas tiek orientētas vienā virzienā, šo plātņu izmēru izmaiņas plātnes garenvirzienā būs mazākas nekā šķērsvirzienā.

Līdztekus izmantotā koksnes materiāla un līmes mehāniskajai izmēru izmaiņu ierobežošanai MDF, līme un sveķi daļēji iesūcas kokšķiedru sienīnās, samazinot mitruma uzsūkšanas spēju. Tā rezultātā plātņu materiāls spēj mazāk uzņemt mitrumu, tā līdzsvara mitrums samazinās attiecībā pret izmantotās koksnes līdzsvara mitrumu, kas rezultātā samazina plātnes kopējās izmēru izmaiņas mitruma ietekmē. Kokšķiedru plātnēm un skaidu plātnēm izmēru izmaiņas plātnes garenvirzienā un šķērsvirzienā būs vienādas, jo izmantotajām koksnes daļiņām plātnē nav noteikta virziena (Bowyer u.c., 2003).

Koksnes plātņu materiālu izmēru izmaiņas var būt divu veidu: atgriezeniskas un neatgriezeniskas. Gadījumā, ja, materiālam uzņemot un atdodot vienādu ūdens daudzumu, materiāla izmērs nav mainījies, ir notikušas atgriezeniskas izmēru izmaiņas. Šādas izmēru izmaiņas būtiski neietekmē plātņu materiālu fizikālās un mehāniskās īpašības. Savukārt, ja izmērs neatgriežas sākotnējā stāvoklī, ir notikušas neatgriezeniskas materiāla izmēru

⁶ <http://www.archiexpo.com/prod/boozer-laminated-beam-company/wooden-beam-glulam-60686-661296.html>, skatīts 02.03.2012.

⁷ <http://timberfirst.wordpress.com/2012/07/25/what-is-cross-laminated-timber-clt/>, skatīts 02.03.2012.

izmaiņas. Neatgriezeniskās izmēru izmaiņas izraisa plātņu materiālu iekšējie briešanas spēki, kuru rezultātā notiek neatgriezeniski materiāla uzbūves bojājumi un mehānisko rādītāju samazināšanās. OSB izmēru izmaiņas atkarībā no plātņu mitruma pētījuši Wu un Piao (Wu un Piao, 1998). Konkrētajā pētījumā ir apskatīta ne tikai mitruma ietekme uz OSB izmēriem, bet arī ir noteiktas sakarības starp plātņu mitrumu un mehāniskajām īpašībām. Pētījumā noskaidrots, ka, plātņu mitrumam palielinoties līdz 8 %, plātņu izmēri un mehāniskās īpašības būtiski nemainās. Plātņu mitrumam paaugstinoties līdz 12 %, norisinās neatgriezeniskas izmēru izmaiņas un plātņu stiepes stiprības samazināšanās perpendikulāri pret plātņu plakni. Savukārt mitrumam palielinoties līdz 25 %, tiek konstatēta 19.8 % liela neatgriezeniskā izmēru izmaiņa, kas izraisījusi stiepes stiprības samazināšanos par 62.9 %.

Atkarībā no plātņu izmantošanas veida plātņu materiāliem tiek limitētas maksimālās lineārās izmaiņu robežas. Piemēram, OSB maksimālās lineārās izmēru izmaiņas tiek ierobežotas no 0.25 līdz 0.55 %, maksimālās biezuma izmaiņas - no 15 līdz 25 %. HDF lineārās izmēru izmaiņas netiek limitētas, savukārt izmaiņas materiāla biezumā nedrīkst pārsniegt 8 līdz 30 % (Bowyer u.c., 2003).

Būvniecībā izmantoto koksnes plātņu materiālu rukšanas koeficienti apkopoti 1.2. tabulā.

1.2. tabula

Būvniecībā plaši izmantoto plātņu materiālu rukšanas koeficienti
(LVS CEN/TS 12872:2007)

Plātnes veids	Rukšanas koeficients k_r , % % ⁻¹		
	garenvirzienā	šķērsvirzienā	biezumā
Kokskaidu plātnes	0.03 līdz 0.05	0.04 līdz 0.05	0.50 līdz 0.70
Orientēto kokskaidu plātnes (OSB)	0.02 līdz 0.03	0.03 līdz 0.04	0.50 līdz 0.70
Kokskaidu-minerālvielu plātnes	0.05	0.05	0.04
Saplākšņi	0.15	0.15	0.30 līdz 0.40
Kokšķiedru plātnes (sausais ražošanas process)	0.04	0.04	-

Kā parādīts 1.2. tabulā, plātņu materiālu izgatavošanas tehnoloģija atstāj būtisku ietekmi uz plātņu rukšanas parametriem. Zemākās izmēru izmaiņas plātnes biezumā ir novērojamas saplākšņiem un kokskaidu-minerālvielu plātnēm, savukārt mazākās izmēru izmaiņas garenvirzienā un šķērsvirzienā - OSB.

Koksnes un koksnes plātņu materiālu rukšanas un briešanas rādītāji plaši tiek izmantoti būvniecībā un mēbeļu izgatavošanā pielaižu, sēžu un kompensācijas spraugu aprēķināšanai.

KŠM uzbūve (izgatavošanā izmantotā PVA līme) praktiski neļauj novērtēt materiāla rukšanas un briešanas rādītājus materiālam absolūti sausā stāvoklī un virs šķiedru piesātinājuma mitrumu. Materiālu izturot ūdenī vai žāvējot augstā temperatūrā, līmei šķīstot ūdenī vai kūstot, var būtiski mainīties materiālu uzbūve. Šī iemesla dēļ, līdzīgi kā koksnes plātņu materiāliem un līmētajiem koksnes produktiem, izmēru un tilpuma izmaiņas virs vai zem noteiktām mitruma robežām var uzskatīt par neatgriezenisku procesu.

1.2.4. Skaņas izolēšana

Skaņa tiek definēta kā mehāniskās enerģijas pārvietošanās, kas izplatās elastīgā vielā svārstību veidā. Skaņas viļņu iedarbības rezultātā konstrukcija, kas pakļauta skaņas ietekmei, iesvārstās, daļu skaņas atstarojot, daļu absorbējot, bet daļu vadot cauri konstrukcijai, kā arī radot jaunus mazākas intensitātes skaņas viļņus. Skaņas viļņiem pārklājoties un atstarojoties, rodas tā saucamais troksnis, kas ietekmē cilvēku dzīves komforta līmeni vai pat var nelabvēlīgi ietekmēt cilvēka veselību.

Atkarībā no skaņas avota atrašanās vietas, ārpus mājas vai mājas iekšpusē, skaņas avotus iedala ārējos vai iekšējos skaņas avotos. Pie ārējiem skaņas avotiem galvenokārt minami

transportu un rūpnieciskie objekti, savukārt cilvēki, inženierkomunikācijas un iekārtas, kuru radītā skaņa nereti cilvēkiem izraisa diskomfortu, ir klasificējami pie iekšējiem skaņas avotiem.

Skaņas nokļūšana cauri norobežojošai konstrukcijai no vienas telpas citā ir konstrukcijas skaņas vadāmība jeb caurlaidība. Lielums, kas apgriezti proporcionāls skaņas caurlaidībai, ir skaņas absorbcija, ko apraksta ar skaņas gaisā vājinājuma indeksu R , izteiktu dB. Atkarībā no skaņas izcelšanās veida tiek izmantoti atšķirīgi norobežojošo būvkonstrukciju skaņas izolēšanas paņēmieni (Zabrauskis, 2006).

Skaņas gaisā radītie trokšņi ir visizplatītākie, tādēļ primāri jāapskata šo trokšņu absorbēšanas iespējas. Matemātiski gaisā radītas skaņas absorbciju iespējams aprēķināt pēc sakarības (Zabrauskis, 2006)

$$R = 10 \lg \frac{S}{A_2} + L_1 - L_2, \quad (1.1.)$$

kur: S - norobežojošās konstrukcijas laukums, m^2 ;

A_2 - izolējamās telpas ekvivalentais absorbcijas fonds, m^2 ;

L_1 un L_2 - skaņas spiediena avota līmeņi avota un izolējamā telpā, dB.

Izolējamās telpas ekvivalento absorbcijas fondu var aprēķināt pēc sakarības (Strazdiņš, 2011)

$$A_2 = 0.16 \frac{V}{T_2}, \quad (1.2.)$$

kur: A_2 - ekvivalentais absorbcijas laukums, m^2 ;

V - uztverošās telpas tilpums, m^3 ;

T_2 - reverberācijas laiks, s.

Atkarībā no norobežojošās konstrukcijas uzbūves tās iedala viendabīgās un nevienadabīgās konstrukcijās. Akustiski viendabīgas konstrukcijas ir tās, kuras veidotas no vienas homogēna materiāla kārtas vai vairākām. Akustiski nevienadabīgas konstrukcijas sastāv no divām vai vairākām cietām kārtām, kuras nodalītas ar elastīga materiāla starpkārtu (Zabrauskis, 2006).

Skaņas izolācijas prasības ēku iekšējām un ārējām norobežojošajām konstrukcijām nosaka būvnormatīvs LBN 016-11 "Būvakustika". Tajā norādītas skaņas gaisā normalizētā izolācijas indeksa R'_w robežvērtības sienām, durvīm, logiem un citām norobežojošām konstrukcijām atkarībā no ēkas un telpas tipa. No akustiskā komforta viedokļa telpas tiek iedalītas četrās klasēs (LBN 016-11):

- A klase - telpas ar īpaši augstām akustikas un skaņas izolācijas īpašībām;
- B klase - telpas ar augstākām akustikas un skaņas izolācijas īpašībām nekā minimāli noteiktās;
- C klase - telpas, kurās skaņas izolācijai noteiktās minimālās prasības ir obligāti piemērojamas jaunu ēku projektēšanā;
- D klase - telpas ekspluatācijā esošās ēkās.

Saskaņā ar iepriekš minēto būvnormatīvu ēku konstrukcijas projektē un izbūvē tā, lai to iekštelpās un teritorijās ap tām nodrošinātu trokšņa līmeņus atbilstoši normatīvo aktu prasībām par trokšņa pieļaujamajām vērtībām. Izmantotajām būvkonstrukcijām un izstrādājumiem jānodrošina normatīvajos aktos noteiktās izolācijas īpašības. Norobežojošo konstrukciju skaņas izolācijas īpašības var noteikt akustisko mērījumu un aprēķinu ceļā.

Jaunām nestandartizētām būvkonstrukcijām un izstrādājumiem ir jāveic to testēšana, noskaidrojot nepieciešamos akustiskos raksturlielumus, kurus iespējams izmantot ēku norobežojošo konstrukciju akustisko īpašību aprēķināšanai.

Gadījumā, ja norobežojošā konstrukcija ir viendabīga un tiek veidota no vairākām kārtām, kuru skaņas izolācijas īpašības ir zināmas, konkrētās konstrukcijas kopējo skaņas

izolācijas indeksu iespējams noskaidrot aprēķinu ceļā, izmantojot specializētas datorprogrammas, piemēram, „*Insul*” vai „*Bastian*”.

Ja norobežojošā konstrukcija nav viendabīga vai nav zināma kādas materiāla kārtas skaņas izolācijas indeksa rādītāji, konstrukcijas skaņas izolācijas indeksa vērtība jānosaka būvakustikas laboratorijā, nosakot skaņas izolācijas indeksu R_w vai R'_w . Skaņas gaisā izolācijas indekss R_w tiek noteikts laboratorijas apstākļos bez skaņas izplatības ietekmes pa blakusceļiem, savukārt indekss R'_w ievērtē skaņas izplatību pa telpas konstrukcijas blakusceļiem, veicot mērījumus izbūvētām telpām (LBN 016-11).

Būvkonstrukciju skaņas izolācijas spēja ir atkarīga no skaņas frekvences, tādēļ akustiskos parametrus nosaka un vērtē pie šādām vidusfrekvencēm: 125, 250, 500, 1000, 2000 un 4000 Hz (LBN 016-11). Parasti norobežojošās konstrukcijas efektīvāk izolē augsto frekvenču skaņas.

Skaņas izolācijas jeb vājinājuma indeksa R raksturlīknes var noteikt saskaņā ar standarta LVS EN ISO 140-3 pārbaudes metodiku, ja nepieciešams, ievērtējot skaņas apkārtceļu ietekmi saskaņā ar standarta LVS EN ISO 140-1 aprēķinu metodiku. Praktiski noteikto skaņas vājinājuma indeksa R raksturlīkni salīdzinot ar standartā LVS EN ISO 717-1 norādīto references līkni, rezultātā iespējams noteikt norobežojošās konstrukcijas normalizētā skaņas gaisā izolācijas indeksa R_w vērtību ar korekcijām C un C_{tr} .

Normalizētā skaņas gaisā izolācijas indeksa korekcija C paredzēta skaņas frekvenču diapazona paplašināšanai no 50 līdz pat 5000 Hz, jo R raksturlīkne tiek noteikta šaurākā diapazonā, parasti no 100 līdz 2500 Hz, bet jāņem vērā, ka dažādu sadzīves skaņu frekvences var būt gan augstākas, gan arī zemākas nekā noteiktajai raksturlīknei. C_{tr} korekcija ir paredzēta zemāku, galvenokārt transporta radīto trokšņu ievērtēšanai (LBN 016-11).

Pēc iepriekš aprakstītās metodikas noteiktais skaņas gaisā izolācijas indekss R_w parāda norobežojošo sienu, durvju un grīdu konstrukciju skaņas izolācijas spējas efektivitāti. Jo augstāka noteiktā R_w vērtība, jo efektīvāka norobežojošās konstrukcijas skaņas izolācija.

Noteikto skaņas izolācijas indeksa vērtību var izmantot, lai novērtētu būvkonstrukciju atbilstību būvnormatīva prasībām vai inženiertehniskajos aprēķinos, norobežojošo konstrukciju skaņas absorbcijas indeksa aprēķināšanā vai dažādu konstrukciju skaņas izolēšanas parametru modelēšanā.

Viendabīgām homogēnām, masīvām konstrukcijām, kuru laukuma masa pārsniedz 250 kg m^{-2} , skaņas absorbcijas spējas seko tā saucamajam “masas likumam”. Tas nosaka, ka, palielinoties norobežojošās konstrukcijas masai, palielināsies arī skaņas absorbcijas spēja. Šādām konstrukcijām, 1 kvadrātmetra masai palielinoties divas reizes, vērojams skaņas izolācijas indeksa R_w pieaugums par 6 dB^8 .

Viendabīgām homogēnām konstrukcijām skaņas absorbcijas indeksu vērtības var aprēķināt pēc logaritmiskas sakarības (Zabrauskis, 2006)

$$R_w = 32.4 \lg(m) - 26, \quad (1.3.)$$

kur: m - elementa virsmas masa, kg.

Pastāv daudz un dažādi risinājumi norobežojošo konstrukciju skaņas absorbcijas īpašību uzlabošanai, tomēr kā efektīvākais risinājums tiek uzskatīta dubulto konstrukciju veidošana, starp kurām tiek atstāta gaisa sprauga.

Saliktām konstrukcijām ar norobežojošām ārējām kārtām iespējams panākt tādas pašas vai pat augstākus skaņas absorbcijas rādītājus ar ievērojami zemāku konstrukcijas laukuma masu. Saliktām būvkonstrukcijām skaņas absorbcijas indekss ir atkarīgs no izmantoto materiālu uzbūves, blīvuma, virsmas masas, biezuma un attiecības konstrukcijā, kā arī skaņas frekvences.

Vieglām divu vai vairāku kārtu starpsienām var sasniegt labus skaņas absorbcijas rādītājus, izmantojot “masa-atspere-masa” uzbūves principu. Ārējās norobežojošās kārtas

⁸ <http://www.isover.lv/Download/27705/Isover%20akustikas%20buklets.pdf>, skatīts 15.07.2013.

visbiežāk pilda masas funkciju, savukārt starp tām izveidotā gaisa kārtā veic “atsperes” funkciju. Skaņai ejot cauri norobežojošajai konstrukcijas kārtai un sastopoties ar gaisa slāni, tiek samazināta kopējā sistēmas rezonanses frekvence, tādējādi, nonākot pretējā konstrukcijas pusē, skaņa tiek samazināta. Šādas konstrukcijas absorbcijas efektivitāti nosaka ārējās kārtās izmantotā materiāla laukuma masa, piemēram, vienu ģipškartona kārtu aizvieto ar divām kārtām. Otrs variants ir izmainīt gaisa kārtas dinamiskās īpašības, aizvieto ar skaņu absorbējošu materiālu, piemēram, minerālvati (Zabauskis, 2006). Gaisa spraugu aizpildot ar minerālvati, iespējams panākt normalizētā skaņas gaisā izolācijas indeksa R_w palielināšanos par 5 līdz 10 dB⁹.

Durvju konstrukciju skaņas izolācijas īpašības pētījuši Dlhū un Tomašovičs, kā galvenos durvju skaņas absorbcijas īpašību ietekmējošos faktorus minot un analizējot: vērtnes konstrukciju, rāmja konstrukciju, durvju rāmja lieveni, saskarvietu starp durvju vērtni un durvju lieveni, saskarvietu starp durvju vērtni un rāmi, durvju rāmja un sienas konstrukcijas savienojošajiem elementiem un citiem atvērumiem, kā arī neblīvām vietām (Dlhý un Tomašovič, 2014).

Koksnes plātņu materiālu skaņas gaisā vājinājuma indekss ir atkarīgs no vidējās plātņu virsmas masas. Plātnēm, kuru masa ir lielāka par 5 kg m⁻², skaņas frekvenču diapazonā no 1 līdz 3 kHz skaņas vājinājuma indeksu var aprēķināt pēc sakarības (LVS EN 13986:2005)

$$R = 13 \lg(m_p) + 14, \quad (1.4.)$$

kur: R - skaņas gaisā vājinājuma indeksa R , dB;

m_p - plātnes vidējā virsmas masa, kg m⁻².

Zinot koksnes plātņu materiālu biezumu un blīvumu pēc iepriekš norādītās sakarības, iespējams aprēķināt plātņu materiālu skaņas gaisā vājinājuma indeksu R . Aprēķinu ceļā iegūtie 25 mm biezu plātņu materiālu skaņas gaisā vājinājuma indeksa rādītāji apkopoti 1.3. tabulā.

1.3. tabula

Skaņas gaisā vājinājuma indeksa R vērtības 25 mm biezām koksnes plātnēm
(aprēķins saskaņā ar LVS EN 13986:2005)

Plātnes veids	Vidējais blīvums ρ , kg m ⁻³ (LVS EN 13986:2005)	Plātnes vidējā virsmas masa m_p , kg m ⁻²	Skaņas gaisā vājinājuma indekss R , dB
Kokšķiedru plātnes (MDF)	250	6.3	24.4
Kokšķiedru plātnes (MDF)	400	10.0	27.0
Kokšķiedru plātnes (MDF)	600	15.0	29.3
Orientēto kokskaidu plātnes (OSB)	650	16.3	29.8
Saplākšņi 9 (PW)	700	17.5	30.2

Kā apliecina iepriekš norādītajā tabulā veiktie aprēķini, materiāla blīvumam un plātnes vidējai virsmas masai palielinoties, skaņas vājinājuma indeksa vērtības pieaug. Minētā sakarība novērojama gan kokšķiedru plātņu gadījumā, gan salīdzinot dažādus koksnes plātņu materiālu veidus.

Analizētā informācija par krustām līmēto konstrukciju kokmateriālu (CLT) paneļu akustiskajām īpašībām apliecina, ka, materiāla biezumam palielinoties no 100 līdz 135 mm, skaņas izolācijas indeksa vērtības pieaug par 5 dB, no 34 līdz 39 dB¹⁰. Materiāla biezuma un

⁹ <http://www.clt.info/en/product/technical-specifications/>, skatīts 15.07.2012.

¹⁰ <http://repository.tudelft.nl/assets/uuid:952bbf5e-a5b4-487f-bcae-50bb4f6d256b/rapport.pdf>, skatīts 15.08.2014.

laukuma masas palielināšanu var uzskatīt par efektīvu līdzekli norobežojošo koka konstrukciju skaņas izolācijas īpašību uzlabošanai.

Literatūras analīze parādījusi, ka krustām līmēto konstrukciju kokmateriālu paneļi (CLT) ar biezumu 100 mm nespēj nodrošināt ēku starpsienu, ārsienu un pārsegumu paneļiem nepieciešamās skaņas gaisā izolācijas indeksa prasības, jo skaņas izolācijas indeksa vērtība R_w ir 34 dB¹⁴. Tā ir krietni zemāka nekā nepieciešams ēku norobežojošajām būvkonstrukcijām saskaņā ar būvnormatīvu LBN 016-11. Šī iemesla dēļ minētās konstrukcijas praksē tiek papildinātas ar dažādiem materiāliem (minerālvati, ekstrudēto polistirolu u.c.) skaņas izolācijas īpašību uzlabošanai un normatīvo prasību izpildei (skat. 1.4. tabulu).

1.4. tabula

Krustām līmēto kokmateriālu (CLT) paneļu sienas uzbūves konstruktīvā risinājuma ietekme uz skaņas gaisā izolācijas indeksu R_w ¹¹

Nr.	Materiāls	Biezums b , mm	Blīvums ρ , kg m ⁻³	Sienas kopējais biezums, mm	Izolācijas indekss R_w , dB
1.	CLT	100	470	100	34
2.	CLT	100	470	113	36
	Ģipškartons	13	800		
3.	Ģipškartons	13	800	191	42
	CLT	100	470		
	Koksnes latas 40×50 mm /minerālvate	50/ 50	500/18		
	OSB	15	600		
	Ģipškartons	13	800		
4.	Apšuvuma dēļi	25	500	428	52
	Latas 40×30 mm ar ventilējamu fasādi	30	500		
	Horizontālas latas/minerālvate	130/130	500/18		
	Vertikālas latas/minerālvate	130/130	500/18		
	CLT	100	470		
	Ģipškartons	13	800		

Kā redzams šajā tabulā, būtisku sienas konstrukcijas skaņas izolācijas indeksa palielināšanos par 18 dB (no 34 līdz 52 dB) iespējams panākt, krustām līmēto kokmateriālu paneļu sienas veidojot no vairākām dažādu materiālu kārtām, katrai kārtai pildot noteiktu funkciju. Minerālvate uzlabo skaņas izolācijas īpašības, ģipškartons pilda uguns izturības un uguns reakcijas parametru uzlabošanas funkciju, apšuvuma dēļi ierobežo apkārtējās vides ietekmi uz sienas konstrukciju, savukārt krustām līmēto kokmateriālu paneļi nodrošina konstrukcijas mehānisko izturību.

KŠM perpendikulārā virzienā bez papildu apdares nav izmantojams kā skaņu izolējoša norobežojoša konstrukcija, jo tajā esošie gaisa kanāli brīvi vada skaņu cauri konstrukcijai. Arī materiāla perpendikulārajam virzienam tiek prognozēti daudz zemāki skaņas izolācijas indeksa rādītāji nekā masīvkoksnei un plātņu materiāliem, jo ar materiālā iezāģētajām rievām samazinātais materiāla biezums un samazinātā materiāla masa būtiski samazina materiāla skaņas izolācijas spējas, tādēļ lietderīgi noteikt jau konstruktīvi uzlabota koksnes šūnveida izstrādājuma skaņas izolācijas īpašības.

¹¹ <http://www.clt.info/wp-content/uploads/2012/10/Soundproofing-of-CLT-internal-wall-structures-EN.pdf>, skatīts 05.12.2012.

Būvniecībā akustisko īpašību uzlabošanai visbiežāk tiek izmantots materiālu konstruktīvās uzlabošanas paņēmiens, kuru efektīvi var izmantot arī KŠM norobežojošo būvkonstrukciju izstrādē.

1.2.5. Ūdens tvaika caurlaidība

Ārējās un iekšējās norobežojošās būvkonstrukcijas var tikt pakļautas ne tikai temperatūras un skaņas svārstību ietekmei, bet arī ūdens tvaika iedarbībai. Tā rezultātā būvkonstrukcijās var rasties kondensāts un būvkonstrukcijas var paātrināti bojāties. Kondensāta rašanās negatīvi ietekmē ne tikai metāla konstrukcijas, izraisot metāla koroziju, bet arī koksni un koksnes materiālus, kuros var rasties labvēlīgi vides parametri koksnes bioloģisko noārdītāju attīstībai.

Otrs negatīvs kondensāta rašanās aspekts koka konstrukcijās ir konstrukcijas kopējā mitruma palielināšanās, kas var būtiski samazināt konstrukcijas mehānisko izturību un palielināt siltuma caurlaidību.

Būvkonstrukciju ūdens tvaika kondensācijas riska aprēķināšanai nepieciešams noteikt divus svarīgākos materiāla ūdens tvaika pārvades raksturlielumus - ūdens tvaika pretestības koeficientu μ un materiāla ūdens tvaika pretestības gaisa difūzijas ekvivalentu S_d .

Ūdens tvaika pretestības koeficients μ ir gaisa ūdens tvaika caurlaidības un konkrētā materiāla jeb izstrādājuma ūdens tvaika caurlaidības attiecība. Tas norāda ūdens tvaika pretestības atšķirību, kas piemīt konkrētajam izstrādājumam un tāda paša biezuma nekustīgam gaisa slānim pie vienādas temperatūras. Ūdens tvaika difūzijas ekvivalentā gaisa slāņa biezums S_d ir nekustīga gaisa slāņa biezums, kuram ir tāda pati ūdens tvaika pretestība kā testēšanas paraugam ar biezumu d (LVS EN 12086:2014).

Viendabīgiem būvmateriāliem un siltumizolācijas materiāliem ūdens tvaika pretestību aprēķina pēc sakarības (LBN 002-01)

$$S_d = \mu \cdot d, \quad (1.5.)$$

kur: S_d - būvmateriāla vai siltumizolācijas materiāla ūdens tvaika pretestības gaisa difūzijas ekvivalents, m;

μ - ūdens tvaika pretestības koeficients;

d - viendabīgā būvmateriāla vai siltumizolācijas materiāla slāņa biezums, m.

Standartizētiem būvniecības izstrādājumiem ūdens tvaika pārvades raksturlielumu noteikšanas metodes nosaka harmonizēto standartu prasības. Kā piemēru var minēt būvniecībā izmantojamās siltumizolācijas un plātņu materiālus. Siltumizolācijas materiāliem ūdens tvaika pārvades raksturlielumi jānosaka saskaņā ar standarta LVS EN 12086 prasībām, savukārt plātņu materiālu ūdens tvaika pārvades noteikšanai izmanto standarta LVS EN ISO 12572 metodiku.

Nemot vērā to, ka KŠM perpendikulārā virzienā ir ar caurejošiem gaisa kanāliem un paralēlā virzienā ir ar samazinātu biezumu, pateicoties iezāģētajām rievām, materiālam tiek prognozēti daudz zemāki ūdens tvaika pārvades raksturlielumi nekā (ūdens tvaika difūzijas pretestības koeficients μ un ūdens tvaika pretestības gaisa difūzijas ekvivalenta vērtība S_d) masīvkoksnei un plātņu materiāliem, tādēļ to noteikšanai ieteicams izmantot siltumizolācijas materiāliem paredzēto standarta LVS EN 12086 pārbaudes metodi.

Būvnormatīvā LBN 002-01 ir izvirzīta prasība attiecībā uz vairākslāņu būvelementu projektēšanu - ja būvelements vai tā savienojumi tiek veidoti no vairāku materiālu slāņiem, tad ārējās norobežojošās konstrukcijas siltajā pusē izvietoto materiāla slāņu kopējam ūdens tvaika pretestības gaisa difūzijas ekvivalentam S_{ds} ir jābūt vismaz piecas reizes lielākam par aukstajā pusē izvietoto slāņu kopējo ūdens tvaika pretestības gaisa difūzijas ekvivalentu S_{da} . Vispārīgos gadījumos, ja būvnormatīva prasība tiek izpildīta, konstrukcijai nav nepieciešams veikt detalizētu mitruma režīmu aprēķinu (Borodņecs un Krēsliņš, 2007).

No koka veidotām būvkonstrukcijām ir jāveic detalizēta konstrukciju mitruma režīmu izvērtēšana, jo koka būvkonstrukcijās kondensāta rašanās nav pieļaujama (Borodiņecs un Krēsliņš, 2007). Tas nozīmē, ka nevienā no norobežojošās konstrukcijas virsmām relatīvais gaisa mitrums nedrīkst pārsniegt 100 %.

Nemot vērā to, ka koksnes konstrukciju bioloģiskā bojāšanās var notikt arī pie ilgstoši paaugstināta gaisa mitruma līmeņa, kas pie noteiktas temperatūras pārsniedz 80 %, koksnes konstrukcijas vēlams projektēt tā, lai gada laikā norobežojošajās koka konstrukcijās relatīvā gaisa mitruma līmenis nepārsniegtu 80 % (Borodiņecs un Krēsliņš, 2007).

Ēku norobežojošo konstrukciju kondensācijas riska novērtējumu var veikt saskaņā ar standarta LVS EN 13788 metodiku. Šajā standartā kondensācijas riska novērtēšanai tiek izmantotas atšķirīgo konstrukcijas slāņu ūdens tvaika difūzijas S_d vērtības. Aprēķinos materiāla slānis tiek aizvietots ar gaisa slāni, kam ir tikpat liela ūdens tvaika pretestība kā apskatītajam materiālam. Aprēķinus veic pie vidējām mēneša temperatūrām un vidējā mēneša relatīvā gaisa mitruma rādītājiem visiem gada mēnešiem. Aprēķina rezultātā salīdzina konstrukcijas katra mēneša mitruma kondensācijas un iztvaikošanas bilanci, tā nedrīkst būt pozitīva (Borodiņecs un Krēsliņš, 2007).

Praksē plaši tiek izmantoti divi paņēmieni norobežojošo koka būvkonstrukciju kondensācijas riska novēršanai: 1) papildinot būvkonstrukciju silto pusi ar ūdens tvaiku necaurlaidīgiem materiāliem (visbiežāk tvaika izolācijas plēvi); 2) papildinot konstrukciju auksto pusi ar siltumizolācijas materiālu, kura ūdens tvaika caurlaidība ir augstāka, nekā nesošai konstrukcijai. Tādējādi tiek novērsta ūdens tvaiku iesūkšanās konstrukcijā no telpas iekšpuses un tiek izmainīta konstrukcijas slāņu ūdens tvaiku pretestības gaisa difūzijas ekvivalentu attiecība. Ūdens tvaikam ir tendence pārvietoties no siltās konstrukcijas puses uz auksto, vai no gaisa ar augstāku mitruma koncentrāciju uz gaisu, kurā mitruma koncentrācija ir zemāka. Jāpiebilst, ka atkarībā no gadalaika ūdens tvaika plūsma cauri konstrukcijai var mainīt savu virzienu.

Analizējot literatūru, noskaidrotas šādas dažu plaši izmantoto būvmateriālu ūdens tvaika difūzijas koeficientu vērtības pie noteikta materiāla blīvuma - gaisam 1 (blīvums 1.23 kg m^{-3}); minerālvatei 1 (40 kg m^{-3}); ģipškartonam 10 (700 kg m^{-3}); keramikas ķieģeļiem (1800 kg m^{-3}); kokšķiedru plātnēm 20 (600 kg m^{-3}); fibrolītam 30 (1200 kg m^{-3}); masīvkoksnei šķērsām šķiedrām 50 (500 kg m^{-3}); orientēto kokskaidu plātnēm 50 (650 kg m^{-3}); putupoliuretānam 60 (35 kg m^{-3}); betonam 100 (2000 kg m^{-3}) un saplāksnim 220 (700 kg m^{-3}) (Borodiņecs un Krēsliņš, 2007; LVS EN ISO 10456:2007; LVS EN 13986:2005). Salīdzinot minētos rādītājus ar būvnormatīvā LBN 002-01 norādītajām ūdens tvaika difūzijas pretestības koeficientu aprēķinu vērtībām, nākas secināt, ka atsevišķiem rādītājiem dažādos literatūras avotos minētās vērtības būtiski atšķiras. Piemēram, norādītā koksnei piešķirtā koeficienta vērtība ir 40 (pie blīvuma 500 kg m^{-3}), betonam 115 (2000 kg m^{-3}) un saplāksnim 400 (700 kg m^{-3}).

Pamatojoties uz veikto analīzi, iespējams secināt, ka ūdens tvaika difūzijas pretestības koeficientu vērtība, salīdzinot dažādus materiālus, ir atkarīga no materiāla uzbūves, bet nav atkarīga no blīvuma. Dažādos literatūras avotos norādītās koeficientu vērtības vienādiem materiāliem var atšķirties, tādēļ, veicot norobežojošo konstrukciju ūdens tvaika kondensācijas riska analīzi, ir svarīgi norādīt, no kādiem literatūras avotiem ir gūtas aprēķinos izmantotās materiālu ūdens tvaika pārvades raksturlielumu vērtības.

Salīdzinot vienādas uzbūves materiālus ar atšķirīgiem blīvumiem, var secināt, ka, materiāla blīvumam pieaugot, paaugstinās arī ūdens tvaika difūzijas koeficientu vērtības. Piemēram, pieaugot kokšķiedru plātņu materiāla blīvumam no 250 līdz 800 kg m^{-3} , μ vērtība palielinās 10 reizes - no 2 līdz 20. Savukārt masīvkoksnes plātņu un saplākšņu blīvumam palielinoties no 300 līdz 1000 kg m^{-3} , ūdens tvaika difūzijas koeficientu vērtības pieaug aptuveni 2.2 reizes - no 50 līdz 110 (LVS EN 13986:2005).

Uzsākot KŠM īpašību pētījumus, literatūrā netika atrasta informācija par minētā materiāla ūdens tvaika pārvades raksturlielumiem, tādēļ tika izvirzīts viens no promocijas darba apakšuzdevumiem - noskaidrot KŠM ūdens tvaika pārvades raksturlielumus. KŠM

uzbūve divos virzienos no trim būtiski atšķiras, tādēļ nepieciešams veikt abu atšķirīgo virzienu ūdens tvaika pārvades raksturlielumu noskaidrošanu. Iegūtie rādītāji dos iespēju veikt no KŠM izgatavoto ārējo norobežojošo būvkonstrukciju detalizētu kondensācijas riska analīzi un novērtēt konstrukciju atbilstību LBN 002-01 prasībām.

1.2.6. Siltumvadītspēja un siltuma caurlaidība

Pasaules iedzīvotāju skaita pieaugums būtiski palielina kopējo enerģijas patēriņu un to izmaksu nepārtrauktu kāpumu, kas galvenokārt saistīts ar naftas un dabasgāzes resursu izsīkšanu. Kā vienīgais loģiskais atbildes gājiens šādai situācijai ir saņemtās enerģijas, tostarp arī siltumenerģijas, racionāla un taupīga izmantošana¹². Vieglo konstrukciju izgatavošana no atjaunojamiem resursiem, pie kuriem pieskaitāms arī KŠM un tā produkti, ir iespējamais risinājums ekoloģisku un energotaupošu koka mazstāvu ēku būvniecībā. Ēku KŠM būvniecības paneli var pildīt ne tikai konstrukciju nesošās funkcijas, bet tai ir arī potenciāls samazināt ārējo norobežojošo konstrukciju siltuma caurlaidību.

Īpaši aktuāls jautājums par siltumenerģijas taupīšanu ir pēckara periodā, laika posmā no 1950. līdz 1990. gadam būvētajām ēkām, kurām ir zema siltuma noturību. Šādās ēkās siltums aizplūst caur neblīviem logiem, sienām, jumtiem un pagrabstāva pārsegumiem ar augstu siltuma caurlaidību. Šādām ēkām jāparedz kompleksa renovācija, veicot logu, durvju nomaiņu un ārējo norobežojošo konstrukciju siltināšanas pasākumus. Ilggadēji praktiski veiktie apsekojumi apliecina, ka vairumam padomju laikā būvētajām daudzdzīvokļu ēkām energoefektivitātes rādītājs ir 150 līdz 200 kWh m⁻² gadā. Vidēja energopatēriņa ēkai šim rādītājam jābūt robežās no 60 līdz 100 kWh m⁻² gadā (Liepiņš, 2011). KŠM sienu paneli var būt efektīvs risinājums ne tikai mazstāvu ēku būvniecībā, bet arī dzelzsbetona paneļu ēku renovācijā, dzelzsbetona sienas konstrukcijas aizvietojo ar daudz vieglākiem, energoefektīvākiem pašnesošiem KŠM sienu paneļiem, kas nodrošina būvnormatīvā norādītos siltuma caurlaidības rādītājus.

Jaunbūvējamo ēku siltumenerģijas taupīšana galvenokārt saistīta ar normatīviem atbilstošu energoefektivitātes projektu izstrādi un būvniecības tehnoloģiju ievērošanu būvniecības procesa laikā.

Norobežojošo būvelementu (logu, ārsienu, grīdu, jumta, pamatu u.c.) siltuma caurlaidības koeficients nosaka, kādu siltuma daudzumu konkrētā konstrukcija atdos apkārtējā vidē. Būtiska nozīme ir arī ēkas formai, stāvu skaitam, orientācijai pret debess pusēm, atrašanās vietai u.c. faktoriem, kas noteiks ēkas siltuma zudumus (Štrausa u.c., 2011). Siltuma zudumu proporcionālais sadalījums dažāda veida ēkām var būtiski atšķirties, piemēram, daudzdzīvokļu mājām vidējais siltuma zudumu sadalījums pa būvelementiem ir šāds: ārsienas 34 %; logi un durvis 27 %; ventilācija 21 %; pagraba un bēniņu pārsegumi kopā 18 %¹³. Izstrādājot norobežojošo konstrukciju prototipus no KŠM, lietderīgi ir aplūkot tieši ārsienu, logu un durvju konstrukcijas, pa kurām ēkās notiek lielākie siltuma zudumi.

Ēku norobežojošo konstrukciju siltuma zudumus nosaka izmantoto siltumizolācijas materiālu siltumtechnikā efektivitāte. Tirgū pieejamo siltumizolācijas materiālu klāsts ir ļoti plašs, tai pašā laikā to izvēle galvenokārt ir atkarīga no materiāla plānotā izmantošanas veida. Siltumizolācijas materiāli var atšķirties ar daudzām īpašībām, tomēr kā nozīmīgākās īpašības tiek minētas (Liepiņš, 2011; Štrausa u.c., 2011):

- materiāla siltumvadītspēja;
- mehāniskā izturība un stingrība;
- pretestība pret ūdens un tvaika pārnasi;
- izmēru un dimensiju stabilitāte;

¹² <http://www.fortum.com/countries/lv/par-fortum/biomasas-kogenerācijas-stacija/bio-kogenerācijas-stacija-jelgava/pages/default.aspx>, skatīts 02.10.2013.

¹³ <http://goo.gl/j3F9eN>, skatīts 02.10.2013.

- nekaitīgums veselībai.

Siltumizolācijas materiālu klasifikāciju pēc to darbības principa var iedalīt trīs lielās grupās (Štrausa u.c., 2011):

- konvektīvie siltumizolācijas materiāli - galvenokārt ir poraini ar minimālu siltuma konvekcijas rādītāju;
- atstarojošie jeb reflektīvie siltumizolācijas materiāli - galvenokārt ir ar augstu virsmas atstarošanas pakāpi;
- vakuuma siltumizolācija pamatojas uz “bezgaisa” principu - nenotiek siltuma vadīšana ar konvekciju.

Savukārt pēc ķīmiskās izcelsmes siltumizolācijas materiālus iedala divās grupās - organiskās un neorganiskās izcelsmes materiāli (Štrausa u.c., 2011). Organiskās izcelsmes siltumizolācijas materiāli ir kaņepju, linu, kokšķiedru, celulozes un kokvilnas siltumizolācijas materiāli. Neorganiskās izcelsmes siltumizolācijas materiāli ir akmens vai stikla vates un stikla granulas. Citos literatūras avotos atsevišķi tiek izdalīti sintētiskie siltumizolācijas materiāli - tādi kā putupolistirols (EPS), ekstrudētais putupolistirols un cietais putupoliuretāns¹⁴.

Siltumizolācijas materiālu raksturo tā siltumvadītspēja. Siltumizolācijas materiāla galvenais uzdevums ir samazināt siltuma plūsmu cauri konstrukcijai. Šo īpašību raksturo materiāla siltumvadītspējas koeficients λ , $W m^{-1} K^{-1}$. Lambda vērtība raksturo katra būvmateriāla spēju aizturēt siltumu, t.i., samazināt siltuma zudumus caur norobežojošai konstrukcijai. Jo zemāka ir materiāla λ vērtība, jo labāka ir tā siltumizolācijas spēja (Štrausa u.c., 2011).

Plašāk būvniecībā lietotie siltumizolācijas materiāli ir minerālvate (akmens vai stikla vate), priekšputotais putupolistirols (EPS), putupoliuretāns (PUR). Šo materiālu siltumvadītspējas koeficients ir robežās no 0.032 līdz 0.045 $W m^{-1} K^{-1}$ (Štrausa u.c., 2011). Minētie materiāli visplašāk tiek izmantoti privātmāju, daudzstāvu dzīvojamu ēku un rūpniecisko būvju būvniecībā un renovācijā.

Veicot literatūras analīzi, apkopoti plaši izmantoto būvmateriālu siltumvadītspējas koeficienti, kurus var izmantot dažādu būvkonstrukciju siltumtehnikajos aprēķinos. Atsevišķus būvmateriālus raksturo šādi siltumvadītspējas koeficienti: putupoliuretānu 0.025 $W m^{-1} K^{-1}$ (materiāla blīvums 35 $kg m^{-3}$); akmens vati 0.04 $W m^{-1} K^{-1}$ (40 $kg m^{-3}$); koksni šķērsām šķiedrām 0.13 $W m^{-1} K^{-1}$ (500 $kg m^{-3}$); orientēto kokskaidu plātni 0.13 $W m^{-1} K^{-1}$ (650 $kg m^{-3}$); kokšķiedru plātni 0.14 $W m^{-1} K^{-1}$ (600 $kg m^{-3}$); saplāksni 0.17 $W m^{-1} K^{-1}$ (700 $kg m^{-3}$); fibrolītu 0.23 $W m^{-1} K^{-1}$ (1200 $kg m^{-3}$); keramiskos ķieģeļus 0.81 $W m^{-1} K^{-1}$ (1800 $kg m^{-3}$) un betonu 1.35 $W m^{-1} K^{-1}$ (2000 $kg m^{-3}$) (Borodiņecs un Krēsliņš, 2007; LVS EN ISO 10456:2007; LVS EN 13986:2005).

Būvniecībā tiek apskatītas četras koksnes un koksnes materiālu termiskās īpašības: siltumvadītspēja, siltumietilpība, termiskā difūzija un termiskā izplešanās (Wood handbook, 2010). Uzsākot pētījumus ar jaunu materiālu, kura termiskās īpašības nav zināmas, produktu izstrādes sākumā lietderīgi apskatīt tieši materiāla siltumvadītspēju, kas turpmāk izmantojama dažādu konstrukciju siltuma caurlaidības aprēķinos.

Koksnes un koksnes materiālu siltumvadītspēju ietekmē vairāki faktori. Kā nozīmīgākos var minēt - blīvums, mitrums, temperatūra, koksnes vainas, koksnei šķiedru virziens un plātņu materiāliem plātnes virziens attiecībā pret siltuma plūsmu.

Koksnes aptuveno siltumvadītspējas koeficientu šķērsām šķiedrām var aprēķināt pēc šādas sakarības (Wood handbook, 2010)

¹⁴ <http://www.vainode.lv/wp-content/uploads/Siltumizolacijas.pdf>, skatīts 03.08.2013.

$$\lambda = G_x \cdot (B + C_x) + A, \quad (1.6.)$$

kur: G_x - koksnes īpatnējais blīvums, kas noteikts, absolūti sausas koksnes masu attiecinot pret koksnes tilpumu pie noteikta mitruma līmeņa x (%);
 A , B un C - konstantes; gadījumā, ja īpatnējais blīvums ir $G_x > 0.3$, temperatūra aptuveni 24 °C un mitrums $x < 25$ %, sakarībā izmantojamās konstantes ir šādas: $A = 0.01864$, $B = 0.1941$ un $C = 0.028$.

Saskaņā ar sakarību 1.6. aprēķinu ceļā iegūtā koksnes siltumvadītspējas koeficienta vērtība par 20 % var atšķirties no faktiskās siltumvadītspējas koeficienta vērtības. Siltumvadītspējas koeficients koksnei šķiedru virzienā ir aptuveni 1.5 līdz 2.8 reizes augstāks nekā šķērsām šķiedrām - vidēji 1.8 reizes (Wood handbook, 2010).

Koksnes un koksnes plātņu materiālu blīvuma palielināšanās paaugstina materiāla siltumvadītspēju. Piemēram, Zviedrijā augušu bērzu koksni pie 20 °C raksturo siltumvadītspējas koeficients $0.291 \text{ W m}^{-1} \text{ °C}^{-1}$ - pie absolūti sausas koksnes blīvuma 543 kg m^{-3} , kā arī siltumvadītspējas koeficients $0.323 \text{ W m}^{-1} \text{ °C}^{-1}$ - pie blīvuma 680 kg m^{-3} . Starp koksnes blīvuma un siltumvadītspējas koeficientu pastāv lineārs raksturs, vidēji cieša pozitīva sakarība (Suleiman u.c., 1999).

Mitruma palielināšanās koksnē un koksnes materiālos paaugstina materiālu siltumvadītspēju. Kols (Kol, 2009) pētījis Turcijā augušas priedes koksnes termiskās un dielektriskās īpašības materiāla radiālajā un tangenciālajā virzienā. Pētījumā noskaidrots, ka, koksnes mitrumam pieaugot no 0 līdz 22 %, priedes koksnes siltumvadītspējas koeficients tangenciālā virzienā pieaug par 59 % - attiecīgi no 0.098 līdz $0.167 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$. Pie koksnes mitruma 12 % noteiktais priedes koksnes siltumvadītspējas koeficients tangenciālā virzienā dots $0.139 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$.

Priedes koksnes siltumvadītspējas koeficients ir augstāka materiāla radiālā virzienā nekā tangenciālā, tomēr atšķirība nav statistiski būtiska, un praktiskiem aprēķiniem lietderīgi ir izmantot vidējo tangenciālā un radiālā virziena siltumvadītspējas koeficienta vērtību $0.142 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ (Kol, 2009). Savukārt starp koksnes siltumvadītspējas koeficientu šķiedru virzienā un šķērsvirzienā pastāv būtiska atšķirība, piemēram, egles koksnei siltumvadītspējas koeficients kokšķiedru virzienā ir aptuveni par 50 % augstāks nekā šķērsām šķiedrām, atbilstošie siltumvadītspējas koeficienti ir 0.22 un $0.11 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ (Niemz, 1993).

Temperatūras ietekme uz koksnes siltumvadītspēju ir vērtējama kā maznozīmīga. Tā palielinās aptuveni par 2 līdz 3 % uz katriem 10 °C (Wood Handbook, 2010).

Arī koksnes plātņu materiālu siltumvadītspējas koeficients ir atkarīgs no plātņu virziena. Saskaņā ar Čaikovski u.c. (Czajkowski u.c., 2016) kokskaidu plātņu, zema blīvuma kokšķiedru plātņu un orientēto kokskaidu plātņu gadījumā siltumvadītspēja plātnes garenvirzienā ir ievērojami augstāka nekā perpendikulāri pret plātnes plakni. Norādītā atšķirība tiek skaidrota ar atšķirīgo blīvuma sadalījumu materiāla šķērsgrīzumā.

Konstrukcijas siltuma caurlaidības koeficienta (U) vērtību nosaka izolācijas materiāla biezums un siltumvadītspējas koeficienta lielums. Siltuma caurlaidības koeficients (U) norāda, kāds siltuma daudzums laika vienībā izplūst caur konstrukcijas vienu kvadrātmetru lielu laukumu, ja temperatūras atšķirība starp norobežojošās konstrukcijas abām pusēm ir viens grāds. Jo mazāka ir norobežojošās konstrukcijas U vērtība, jo mazāki būs siltuma zudumi caur konstrukciju (Štrausa u.c., 2011).

Būvkonstrukciju siltumtehniko īpašību uzlabošanai visbiežāk tiek izmantots materiālu konstruktīvās uzlabošanas paņēmieni. Krustām līmēto kokmateriālu paneļu sienu uzbūves ietekme uz siltuma caurlaidības koeficientu U parādīta 1.5. tabulā.

Krustām līmēto kokmateriālu (CLT) paneļu sienas uzbūves ietekme uz siltuma caurlaidības koeficientu U^{15}

Sienas konstrukcija	Materiāls	Biezums b , mm	Blīvums ρ , kg m^{-3}	Siltumvadītspējas koeficients λ , $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	Siltum-caurlaidības koeficients U , $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$
1.	CLT	100	470	0.11	0.927
2.	CLT	100	470	0.11	0.820
	Ģipškartons	13	800	0.25	
3.	Ģipškartons	13	800	0.25	0.375
	CLT	100	470	0.11	
	Koksnes latas 40×50 mm /minerālvate	50/50	500/18	0.13/0.04	
	OSB	15	600	0.13	
	Ģipškartons	13	800	0.25	
4.	Apšuvuma dēļi	25	500	0.13	0.130
	Latas 40×30 mm (ventilējama fasāde)	30	500	0.13	
	Horizontālas latas/minerālvate	130/130	500/18	0.13/0.04	
	Vertikālas latas/minerālvate	130/130	500/18	0.13/0.04	
	CLT	100	470	0.11	
	Ģipškartons	13	800	0.25	

Kā redzams 1.5. tabulā, būtisku sienas konstrukcijas siltuma caurlaidības koeficienta samazināšanos no 0.927 līdz 0.130 $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$ iespējams panākt, krustām līmēto kokmateriālu paneļu sienas veidojot no vairākām dažādu materiālu kārtām, katrai kārtai pildot noteiktu funkciju. Minerālvate kā siltumizolācijas materiāls būtiski samazina sienas konstrukcijas siltuma caurlaidību, krustām līmēto kokmateriālu paneļi nodrošina konstrukcijas nestspēju, apšuvuma dēļi pasargā konstrukciju no klimata ietekmes, ventilējamā gaisa sprauga nodrošina konstrukcijai nepieciešamo mitruma režīmu, savukārt ģipškartons uzlabo konstrukcijas ugunsizturības un ugunsreakcijas parametrus.

KŠM tiek prognozēta augstāka siltumvadītspēja, salīdzinot ar klasiskajiem siltumizolācijas materiāliem, bet zemāka kā koksnes plātņu materiāliem un masīvkoksnei, tādēļ, lai noteiktu KŠM termisko pretestību un aprēķinātu siltumvadītspējas koeficientus, var izmantot standarta LVS EN 12667 pārbaudes metodiku. Minētā metode ir paredzēta termiskās pretestības noteikšanai izstrādājumiem ar zemu un vidēju termisko pretestību, kas pārsniedz 0.5 $\text{m}^2 \text{K W}^{-1}$. Pārbaudes metode balstīta uz kalorimetra un karsto plātņu pārbaudes metodi.

1.3. Koksnes materiālu mehāniskās īpašības un tās ietekmējošie faktori

Jebkuram materiālam vai konstrukcijai neatkarīgi no lietošanas sfēras jāspēj izturēt noteikta slodzes iedarbība atsevišķos gadījumos, nepārsniedzot noteiktās deformācijas robežas. Literatūrā tiek minēti trīs galvenie koksnes mehāniskos rādītājus ietekmējošie faktori - koksnes porainums jeb koksnes vielas un gaisa attiecība (visbiežāk izsaka kā blīvumu), šūnu orientācija, kas sevī ietver šūnu sienu mikrouzbūvi un šūnu daudzumu materiālā (atkarīga no koku sugas), kā arī mitrums (Bowyer u.c., 2003).

¹⁵ <http://www.clt.info/en/product/technical-specifications/soundproofing/>, skatīts 02.12.2012

Šo iedalījumu var izvērst plašāk:

- koku suga un koksnes anatomiskā uzbūve (šķiedru orientācija, agrīnās un vēlīnās koksnes attiecība, gadskārtu platums u.c.);
- koksnes blīvums;
- koksnes mitrums;
- koksnes izmēri;
- slodzes veids (dinamiskā vai statiskā), ilgums un sloģošanas ātrums;
- koksnes temperatūra un ārējās vides temperatūras iedarbība;
- koksnes vainas (piemēram, plaisas, sveķu ligzdas, zari, greizšķiedrainība u.c.);
- entomoloģiskā un mikoloģiskā iedarbība.

Līdztekus iepriekš minētajiem faktoriem līmēto konstrukciju kokmateriālu un plātņu materiālu mehāniskās īpašības var ietekmēt šādi faktori:

- izejmateriālu veids, kvalitāte un attiecība materiālā (kokskaidas, kokšķiedras, finieri, līmes u.c.);
- izgatavošanas tehnoloģija un tehnoloģiskie parametri (saklāšanas shēma, uzklājamās līmes daudzums, presēšanas spiediens un laiks u.c.);
- izejmateriāla noslēguma apstrāde (impregnēšana vai laminēšana u.c.).

Koku suga kā faktors būtiski ietekmē ne tikai koksnes fizikālās, bet arī mehāniskās īpašības. 1.6. tabulā apkopotas Latvijā noteikto 5 koku sugu koksnes vidējie mehāniskie rādītāji. Apkopotie rādītāji apliecina, ka koksnes sugai ir būtiska ietekme uz materiāla mehāniskajām īpašībām. Salīdzinot ar visām aplūkotajām koku sugām, apses mehāniskie rādītāji ir vērtējami kā zemākie, savukārt bērzam un ozolam tie ir augstāki. Konkrētie rādītāji noteikti mazu izmēru koksnes paraugiem bez vainām.

1.6. tabula

Koku sugu ietekme uz zāgmateriālu mehāniskajiem rādītājiem
(Волынский, 2000)

Rādītājs	Koku suga				
	egle	apse	priede	bērzs	ozols
Robežstiprība spiedē šķiedru virzienā, MPa	48.0	42.8	55.0	58.7	51.9
Robežstiprība liecē šķiedru virzienā, MPa	82.0	71.0	91.0	121.0	97.8
Robežstiprība bīdē radiāli, MPa	89.6	97.1	115.0	-	-
Elastības modulis liecē šķiedru virzienā, GPa	9.7	-	8.0	9.1	10.0

Koksnes mehāniskās īpašības var atšķirties ne tikai starp sugām, bet arī vienas sugas ietvaros. 1.7. tabulā ir apkopotas dažādos literatūras avotos norādītās priedes koksnes mehāniskās īpašības.

1.7. tabula

Priedes koksnes mehāniskās īpašības

Rādītājs	Literatūras avots			
	Bowyer u.c., 2003	Волынский, 2000	Wagenfuhr, 1996	DIN 68364
Robežstiprība liecē, MPa	89	91	80	80
Elastības modulis liecē, GPa	10	-	12	11
Robežstiprība stiepē paralēli šķiedrām, MPa	-	115	104	100
Robežstiprība stiepē perpendikulāri, MPa	-	-	3	-
Robežstiprība spiedē paralēli, MPa	48	55	55	45
Robežstiprība spiedē perpendikulāri, MPa	5	-	-	-
Robežstiprība bīdē, MPa	-	6-8	10	10
Bīdes elastības modulis, MPa	-	-	-	680

Lai arī koksnes mehāniskie rādītāji vienas sugas ietvaros ir ar lielu izkliedi, dažādos literatūras avotos norādītie priedes koksnes vidējie mehāniskie rādītāji ir līdzīgi, kas attiecas arī uz maziem bezdefektu paraugiem.

Koksnes blīvums un koksnes gadskārtu platums bieži pētījumos tiek apskatīts kā koksnes stiprības un elastības rādītājus ietekmējošais faktors. Blīvumam palielinoties, koksnes robežstiprība un elastības modulis būtiski pieaug, līdzīga tendence novērojama, samazinoties gadskārtu platumam. Gadskārtu platuma ietekmi uz koksnes mehāniskajām īpašībām raksturo determinācijas koeficienti robežās no 0.2 līdz 0.44. Blīvuma un mehānisko īpašību sakarības raksturo determinācijas koeficienti robežās no 0.16 līdz 0.4 (Johannson un Boström, 1998).

Arī veiktajos pētījumos iegūtas atziņas, ka koksnes un koksnes materiālu blīvumam ir būtiska ietekme uz materiāla fizikālajām, fizikāli ķīmiskajām un mehāniskajām īpašībām (Iejavs, 2007^b; Bukšāns, 2010). To apliecina arī standartos norādītās dažādu īpašību aprēķinu robežvērtības, kuras ir atkarīgas no blīvuma (LVS EN 13986:2005; LVS EN 338:2010).

Koksnes blīvumam palielinoties, robežstiprība un elastības moduli pieaug, maksimumu sasniedzot pie blīvuma, kas ir aptuveni 800 kg m^{-3} . Blīvumam pieaugot vēl, robežstiprība samazinās. Šī sakarība ietekmē arī līmētos koksnes savienojumus. Līmējuma stiprība pieaug vienlaikus ar blīvumu, līdz tas sasniedz aptuveni 700 līdz 800 kg m^{-3} (pie koksnes mitruma 12 %). Virs šāda blīvuma līmējuma stiprība pakāpeniski samazinās (Kūliņš, 2004).

Koksni ar augstu blīvumu ir grūtāk salīmēt, jo:

- saistībā ar biezākām šūnu sienām un mazāku šūnu dobuma daudzumu ir apgrūtināta līmes iesūkšanās;
- saistībā ar lielāku blīvumu un lielāku stiprību ir nepieciešams lielāks presēšanas spiediens, lai nodrošinātu ciešu kontaktu starp salīmējamām virsmām un izveidotos plāna līmes šuve;
- koksnes sugas ar lielu blīvumu (piemēram, ozols un dažādas tropu koku sugas) satur paaugstinātu ekstraktvielu daudzumu, kas var negatīvi ietekmēt līmēšanas procesu;
- izmainoties koksnes mitrumam koksnei ar augstu blīvumu, parādās deformācijas un lielāki spriegumi (Kūliņš, 2004).

Koksnē esošie dobumi būtiski ietekmē līmes iespiešanās dziļumu un virzienu. Lai sasniegtu pietiekamu līmējuma stiprību, līmei jāiespiežas vairākās nebojātās šūnu rindās. Tā kā koksnes dobumi pārsvarā orientēti šķiedru virzienā, līme iespiežas šajā virzienā (Kūliņš, 2004). Starp koksnes temperatūru un mehāniskajām īpašībām pastāv ciešas lineāras negatīvas sakarības, vienīgi robežstiprības liecē sakarība ir nelineāra rakstura. Koksnes temperatūrai pieaugot, būtiski samazinās mehāniskie rādītāji. Priedes koksnes temperatūrai palielinoties no aptuveni 20 līdz 150°C , robežstiprība liecē samazinās no 80 līdz 36 MPa . Temperatūras palielināšanās visvairāk samazina robežstiprības rādītājus stiepē, savukārt vismazākā ietekme tai ir uz bīdes elastības moduli šķiedru virzienā (Хмелидзе, 1986).

Veicot koksnes materiālu mehāniskās pārbaudes statiskā slogošanas režīmā, slogošanas ātrums ir viens no mehāniskos rādītājus ietekmējošiem faktoriem. Vispārīgi var minēt, ka slogošanas ātruma palielināšana samazina koksnes mehāniskās īpašības. Īpaši labi šo sakarību var novērot koksnes materiāliem ar augstu blīvumu (Madsen, 1975).

Bieži materiāla stiprību apskata ilgstošas slodzes iedarbības rezultātā jeb ilgizturībā, kas ir spriegums, ar kuru materiālu pie bezgalīgi ilgas slogošanas vēl var slogot bez sagrāves. Ilgizturība normālos klimatiskajos apstākļos ir aptuveni 60 % no maksimālās stiprības (Kūliņš, 2004).

Koksnes kā materiāla stiprību un elastību būtiski ietekmē šūnu sienās saistītais mitrums, kas sieniņās esošo celulozi un lignīnu padara mīkstāku. Praksē tiek ņemta vērā zināma sakarība, ka, pieaugot koksnes mitrumam, tās stiprība samazinās, savukārt elastība palielinās, tomēr tas ir novērojams tikai līdz šķiedru maksimālajam piesātinājumam. Brīvais ūdens koksnes stiprību tikpat kā neietekmē, bet padara to tikai smagāku (Iejavs, 2007^b).

Koksnes mitruma palielināšanās būtiski samazina koksnes un koksnes materiālu mehāniskās īpašības, šī sakarība ir spēkā gan masīvkoksnei, gan līmētajiem koksnes materiāliem (Svitāk u.c., 2014; Iejavs, 2007^a). Piemēram, palielinoties egles koksnes mitrumam no 11.6 % līdz 19.9 %, vidējā robežstiprība četrpunktu liecē, pārbaudot materiālu platajā skaldnē, samazinās par 17 MPa jeb 24 % (no 70.8 līdz 53.8 MPa). Mitrumam palielinoties par 1 %, robežstiprība liecē samazinās vidēji par 3 %. Aprakstot sakarību starp koksnes robežstiprību liecē un mitruma saturu ar lineārās regresijas taisni, korelācijas koeficients $r = 0.57$. Mitruma satura robežās no 10 līdz 22 % pastāv vidēji cieša negatīva sakarība starp egles koksnes mitruma saturu un robežstiprību liecē (Iejavs, 2007^b).

Mitruma ietekme uz koksnes mehāniskajām īpašībām pie dažādiem sloģošanas veidiem ir principiāli līdzīga. Vērojama tendence, ka, palielinoties mitrumam, stiprība un elastība samazinās. Šī sakarība ir visizteiktākā, apskatot koksnes mitruma robežas no 5 līdz 30 %, robežstiprībai samazinoties pat līdz 60 % pēc absolūtajām vērtībām. Uz koksnes robežstiprību stiepē mitruma izmaiņām ir vismazākā ietekme. Atsevišķām īpašībām, tādām kā robežstiprībai stiepē un robežstiprībai liecē, koksnes mitrumam palielinoties no 0 līdz 5 %, ir novērojams robežstiprības pieaugums (ГСССД 69-84,1984). Līdzīgi kā robežstiprības rādītāji, arī elastības moduļu rādītāji, palielinoties koksnes mitrumam no 0 līdz 30 %, samazinās līdz pat 60 %. Starp robežstiprības, elastības un mitruma rādītājiem pastāv ciešas un vidēji ciešas, nelineāras, negatīvas sakarības (ГСССД 69-84,1984).

Borovikovs un Ugoļovs pētījis koksnes mitruma ietekmi uz dažādu koku sugu koksnes mehāniskajām īpašībām. Noskaidrots, ka koksnes mitruma palielināšanās no absolūti sausa stāvokļa līdz šķiedru piesātinājuma mitrumam būtiski samazina koksnes mehāniskās īpašības, piemēram, priedes koksnes robežstiprību liecē par 42 % (no 85 līdz 49 MPa). Līdzīga tendence novērojama arī citām koku sugām (Боровиков и Уголев, 1989).

Saskaņā ar Ulpes un Kupča pētījumiem, koksnes mitrumam palielinoties, tās stiprība samazinās līdz 30 % no maksimālās stiprības vērtības. Starp koksnes pretestību un mitrumu robežās no 8 līdz 23 % pastāv šāda sakarība (Ulpe un Kupče, 1991)

$$R_m = \frac{R_{12}}{1 + \alpha(W - 12)}, \quad (1.7.)$$

kur: R_{12} - pretestība koksnei ar mitrumu 12 %;

R_m - pretestība koksnei ar mitrumu W ;

α - pretestības relatīvā izmaiņa, mitrumam mainoties par 1 %, piemēram, $\alpha =$ liecē visām koku sugām.

Šķiedru virziens ir viens no svarīgākajiem koksnes fizikālos un mehāniskos rādītājus ietekmējošajiem faktoriem. Koksnes elastības modulis šķiedru virzienā ir 20 reizes lielāks nekā šķērsām šķiedrām, savukārt robežstiprība stiepē šajos virzienos atšķiras 12 līdz 17 reizes (Ulpe un Kupče, 1991). No minētā var secināt, ka pat neliela novirze no šķiedru virziena var būtiski samazināt koksnes mehāniskās īpašības. Greizšķiedrainības attiecība 1:6 var izraisīt robežstiprības liecē samazināšanos pat par 60 % un robežstiprības spiedē samazināšanos par 44 % (Bowyer u.c., 2003).

Arī uz līmēto koksnes materiālu mehāniskajām īpašībām kokšķiedru virzienam ir būtiska ietekme. Līmētiem koksnes savienojumiem, kuru šķiedras orientētas paralēli līmes šuvei un paralēli spēku pielikšanas virzienam, bīdes stiprība ir visaugstākā. Ja salīmējamo virsmu šķiedras veido leņķi, tad atkarībā no koka sugas, palielinoties leņķim, līmējuma stiprība samazinās. Pie 90° leņķa (sakrustotām šķiedrām, piemēram, saplāksnim) stiprība ir vismazākā. Vismazāko mehānisko stiprību iegūst līmētie savienojumi, kas veidoti perpendikulāri šķiedru virzienam (Kūliņš, 2004). Šāds savienojums praksē tiek lietots reti. Kā izņēmumu var minēt ķīļtapu savienojuma līmēšanas tehnoloģiju, kuras gadījumā kokšķiedru virziens starp savienojamajām detaļām ir 0°, bet līmes šuve tiek veidota kā slīpais sadursavienojums, kurš attiecībā pret šķiedru virzienu veido aptuveni 7° lielu leņķi. Šāds

savienojums savu mehānisko stiprību panāk, pateicoties detaļu savstarpējai iekļīlēšanai, kas nodrošina līmēšanai nepieciešamo spiedienu.

No līmēšanas teorijas izriet, ka, KŠM paralēlā virzienā aplīmējot ar kādu citu koksnes materiālu, var izveidot mehāniski izturīgāku savienojumu nekā KŠM perpendikulārā virzienā. Paralēlajā virzienā koksnes šķiedras pret līmes plakni orientētas paralēli, savukārt perpendikulārā virzienā - 45° grādu leņķī.

Visas novirzes no normālas koksnes struktūras, kuras ietekmē koksnes mehāniskās īpašības, sauc par vainām. Kā nozīmīgākās koksnes vainas tiek apskatītas zari, greizšķiedrainība un koksnes plaisas (Ulpe un Kupče, 1991). Zaru ietekme uz koksnes fizikālajām un mehāniskajām īpašībām pētīta salīdzinoši plaši, apskatot gan zāģmateriālu, gan līmēto konstrukciju kokmateriālu rādītājus. Noskaidrots, ka zara izmēra palielināšanās proporcionāli samazina robežstiprību liecē, ja zars atrodas parauga stieptajā skaldnē. Zara izmēra palielināšana atstāj mazāku ietekmi uz elastības moduli liecē nekā uz robežstiprību liecē. Visvairāk zaru klātbūtne ietekmē koksnes robežstiprību stiepē (Леонтьев, 1949). Līmēto konstrukciju kokmateriālu izgatavošanas gadījumā, palielinot materiāla kārtu skaitu, zaru ietekme samazinās. Lieces pārbaudēs noskaidrots, ka pastāv cieša sakarība ne tikai starp zara izmēru un mehāniskajām īpašībām (korelācijas koeficients 0.82), bet arī starp zara laukumu (0.84) (Королев, 1978). Minētajā pētījumā tiek uzsvērts, ka ne tikai zara klātbūtne ietekmē mehāniskās īpašības, bet būtiska nozīme ir arī kokšķiedru virziena izmaiņām ap zara vietu.

Atkarībā no pārbaudes mērķa praksē koksnes mehānisko īpašību novērtēšanai tiek izmantoti vai nu maza izmēra bezdefektu koksnes paraugi, vai nu liela izmēra paraugi ar ekspluatācijai nepieciešamajiem izmēriem un koksne sastopamajām vainām. Maza izmēra paraugus praktiski izmanto koksnes sugas raksturošanai. Liela izmēra paraugu pārbaudes mērķis ir novērtēt materiāla mehānisko īpašību atbilstību plānotajai izmantošanai. Analizējot koksnes materiālu mehāniskās īpašības, jāņem vērā tas, ka maza izmēra paraugu mehāniskās īpašības būs krietni augstākas nekā liela izmēra paraugiem. Šo atšķirību izsaka, izmantojot mēroga koeficientu, kura noteikšanā būtisku ieguldījumu devis profesors Soboļovs. Viņa pētījumos noskaidrots, ka robežstiprība un elastības modulis statiskajā liecē, kā arī spiedē šķiedru virzienā ir atkarīgi no parauga izmēriem, ko iespējams aplūkots ar šādu sakarību (Соболев, 1982)

$$y = Ax^{-a} \quad (1.8.)$$

kur: A - konstante, kura ir atkarīga no materiāla uzbūves un slodzes veida, tā ir vienāda ar ideāli viendabīga materiāla bez vainām mehānisko rādītāju;
x - parauga šķērsriezuma laukums.

Daļa no Soboļova veiktā pētījuma atspoguļota kopsavilkuma 1.8. tabulā.

1.8. tabula

Paraugu izmēru ietekme uz koksnes mehāniskajiem rādītājiem (Соболев, 1982)

Rādītājs	Paraugu izmēri, mm		Vienādojuma konstantes		Samazinājuma indekss, %
	Min.	Maks.	A	α	
Robežstiprība spiedē šķiedru virzienā	20×20×30	120×120×180	51.3	0.024	12.0
Robežstiprība liecē šķiedru virzienā	20×20×300	120×120×1800	96.4	0.120	44.2
Elastības modulis liecē	20×20×300	120×120×1800	11.2	0.034	12.2

Kā redzams iepriekš norādītajā tabulā, visvairāk parauga izmēru palielināšana samazina robežstiprību liecē, savukārt robežstiprības spiedē šķiedru virzienā un elastības moduļa samazināšanās ir aptuveni 4 reizes mazāka. Paraugu izmēru ietekmi uz koksnes robežstiprību liecē pētījuši arī citi autori (Nedbal, 1960; Iljinen, 1942; Савков, 1962). Viņi nonākuši pie

vienota secinājuma, ka robežstiprības rādītāji liecē samazinās, palielinot materiāla šķēsgriezuma augstumu un apakšējo atbalstu attālumu.

Jaunākie zāgmateriālu elastības rādītāju pētījumi liecina, ka iepriekš veiktie pētījumi par materiāla izmēru ietekmi uz mehāniskajām īpašībām nav viennozīmīgi. Bachers un Krzoseks veikuši apjomīgu eksperimentālo darbu, noskaidrojot sakarības, kas veidojas starp zāgmateriālu lieces un stiepes elastības moduļiem, kuri noteikti ar piecām dažādām pārbaudes un aprēķinu metodēm. Daļa no iegūtajiem rādītājiem, pārbaudot priedes zāgmateriālus šaurajā skaldnē, apkopot 1.9. tabulā.

1.9. tabula

Zāgmateriālu šķēsgriezuma ietekme uz elastības moduļu rādītājiem
(Bacher and Krzoseks, 2013)

Zāgmateriālu šķēsgriezuma izmērs, mm	Paraugu skaits, gab.	Globālais elastības modulis liecē, MPa	Lokālais elastības modulis liecē, MPa	Elastības modulis stiepē šķiedru virzienā, MPa
38 × 100	71	11396	11519	11113
50 × 150	71	12387	13325	11682
44 × 200	72	11167	12615	11961

Kā redzams 1.9. tabulā, zāgmateriālu elastības moduļu vidējās vērtības liecē būtiski nesamazinās, stiepes paraugu gadījumā elastības moduļa vidējie rādītāji pat palielinās. Pamatojoties uz minēto informāciju, varam secināt, ka gadījumā, ja tiek pārbaudīti bezdefektu koksnes paraugi, palielinoties paraugu izmēriem, mehāniskās īpašības samazināsies, bet zāgmateriālu pārbaudes gadījumā šī sakarība nebūs spēkā, jo lielāku ietekmi uz mehāniskajiem rādītājiem atstāj koksnes vainas, nekā zāgmateriālu izmēru izmaiņas. Būvniecībā plaši lietoto zāgmateriālu mehāniskie rādītāji saskaņā ar standartu LVS EN 338 ir daudz zemāki.

Koksnes materiāli atkarībā no to veida un sugas tiek šķiroti šādās stiprības klasēs - D18 līdz D70 (lapkoki), C14 līdz C50 (skujkoki) un GL20 līdz GL32 (līmētie konstrukciju kokmateriāli). Nozīmīgākie mehāniskie rādītāji, pēc kuriem klasificēt konstrukciju kokmateriālus, ir robežstiprība liecē, elastības modulis liecē un fizikālais rādītājs blīvums, jo starp šiem rādītājiem un pārējām mehāniskajām īpašībām pastāv ciešas sakarības (LVS EN 384:2010).

Projektēšanas un mehānisko rādītāju salīdzināšanas vajadzībām var aprēķināt koksnes materiālu un konstrukciju mehānisko rādītāju 5 % kvantiļa raksturlielumu vērtības saskaņā ar standarta LVS EN 14358 aprēķinu metodiku. 5 % kvantiļa raksturlieluma vērtības tiek definētas kā rādītāju izkliedes zemākā robeža ar 95 % ticamības līmeni, kas noteikts paraugiem pie līdzsvara mitruma 12 %.

KŠM izgatavošanā izmantoti garumā līmēti priedes koksnes kokmateriāli, kuru mehāniskie rādītāji atbilst zāgmateriālu stiprības klases C24 rādītājiem saskaņā ar standarta LVS EN 338 prasībām.

Koksnes materiālu izmēri un ierobežotā forma bieži ir limitējošais faktors konstrukciju izgatavošanai. Tas ir izraisījis un sekmējis dažādu koksnes un koksnes materiālu savienošanas metožu attīstības norisi. Kā nozīmīgākos koksnes materiālu savienošanas veidus var minēt - līmēšanu, skrūvēšanu un naglošanu. Ņemot vērā to, ka KŠM veidots no plānām koksnes kārtām, naglošanas paņēmiens netiek apskatīts kā piemērotākais veids šāda materiāla savienošanai. Produktu izgatavošanā izmantotā līme un līmēšanas tehnoloģijas būtiski ietekmē gala produktu fizikālās un mehāniskās īpašības. Procesā lietotās līmes bieži nosaka produkta izmantošanas apstākļus.

Kūlīņš apkopojis galvenos līmēto savienojumu stiprību ietekmējošos faktorus, skat 1.10. tabulu.

Līmēto savienojumu stiprību ietekmējošie faktori (Kūliņš, 2004)

Materiālu ietekme	Salīmējamais materiāls	Koksnes suga, koksnes mitrums, koksnes struktūra, stiprība, morfoloģija, reoloģija, polaritāte
	Līme	Stiprība, deformētība, rukšana, līmes veids, reoloģija, sacietēšanas norise
Tehnoloģiskā ietekme	Salīmējamā materiāla virsmas stāvoklis	Apstrādes kvalitāte (viļņainums, raupjums, tīrība)
	Līmes sagatavošana	Līmes sastāvdaļas, pildvielu daudzums
	Līmes izmantošana	Līmes uzklāšana, sacietēšanas nosacījumi, līmes šuves biežums
Salīmējamā materiāla ģeometrija	Savienojuma forma	Savienojuma veids
	Izmēri	Savienojuma garums, salīmējamā materiāla biežums, līmes šuves biežums
Izmantošanas apstākļu ietekme	Slogošanas veids (spēka iedarbības veids)	Stiepe, spiede, bīde, cirpe (statiski vai dinamiski)
	Apkārtējās vides ietekme	Klimatiskie apstākļi, siltuma starojums, ķīmiskais aģents

Visi iepriekš minētie līmēto savienojumu stiprību ietekmējošie faktori ir jāņem vērā, veicot līmēto savienojumu kvalitātes pētījumus.

Savukārt materiālu saskrūvēšanas paņēmienam ir būtiska nozīme koka konstrukciju savienojumu veidošanā gan mēbeļu, gan būvkonstrukciju izgatavošanā. Skrūvju izraušanas pretestība no masīvkoksnes un plātņu materiāliem ir atkarīga no daudziem faktoriem. Kā nozīmīgākos var minēt:

- materiāla blīvumu - materiāla blīvumam palielinoties, skrūvju izraušanas pretestība paaugstinās (Eckelman, 1990);
- materiāla virzienu - šķērsām šķiedrām vai šķiedru virzienā masīvkoksnei, vai perpendikulāri, vai paralēli plātnes plaknei plātņu materiāliem;
- materiāla mitrumu - mitrumam palielinoties līdz 30 %, skrūvju izraušanas rādītāji ievērojami samazinās;
- skrūves ģeometriskos izmērus - iekšējais un ārējais diametrs, vītnes solis un skrūves ieskrūvēšanas dziļums;
- aizurbšanas paņēmiena izmantošanu skrūvju iestrādē.

Masīvkokšķiedru virzienam attiecībā pret skrūvju izraušanas virzienu ir būtiska ietekme uz skrūvju izraušanas pretestību. Tādām koku sugām kā papelei, dižskābardim un balteglei skrūvju izraušanas rādītāji koksnes radiālā virzienā ir no 20 līdz pat 60 % augstāki nekā šķiedru virzienā. Dižskābardim novērota krietni augstāka skrūvju izraušanas pretestība, salīdzinot ar papeli un baltegli, kas galvenokārt ir saistīts ar dižskābardim raksturīgajiem augstākiem blīvuma rādītājiem (Taghiyari u.c., 2012).

Arī koksnes plātņu materiāla veids un virziens būtiski ietekmē skrūvju izraušanas pretestības rādītājus. Ņemot vērā to, ka PB un OSB ārējās kārtās blīvums ir krietni augstāks nekā plātnes vidū esošais, skrūvju izraušanas rādītāji no plaknes ir augstāki nekā no plātnes malas.

Salīdzinot skrūvju izraušanas rādītājus no plātnes malas kokskaidu plātnēm un orientēto kokskaidu plātnēm, OSB plātņu vidējie skrūvju izraušanas pretestības rādītāji ir par 56 % augstāki, sasniedzot vidējo rādītāju 2100 N. Minētajā pētījumā arī noskaidrots, ka skrūves diametra palielināšana no 4 līdz 5 mm būtiski palielina skrūvju izraušanas pretestības rādītājus gan no kokskaidu plātnēm, gan no orientēto kokskaidu plātnēm. Kā galvenais skrūvju izraušanas pretestību ietekmējošais faktors pētījumā tiek minēts plātņu daļiņu izmērs,

jo būtiskas blīvuma atšķirības pārbaudītajiem paraugiem netika konstatētas (Miljković u.c., 2007).

Vairākos literatūras avotos secināts, ka koka skrūves ģeometriskajiem izmēriem ir svarīga ietekme uz skrūvju izraušanas pretestību no koksnes. Piemēram, Gounts (Gount, 1997) pētījis skrūves vītnes soļa palielināšanas ietekmi uz skrūvju izraušanas pretestību. Pētījumā apskatītas lielizmēra koka būvkonstrukcijām paredzētās skrūves ar ārējo diametru 22 mm un vītnes soli no 12 līdz 31.1 mm. Pētījuma rezultātā secināts, ka skrūves vītnes soļa palielināšana ļauj uzlabot skrūvju izraušanas pretestību no masīvkoksnes par 25 %. Šajā pētījumā tika pierādīts, ka, koksnes blīvumam un skrūves ieskrūvēšanas dziļumam pieaugot, skrūvju izraušanas pretestība būtiski palielinās.

Geits (Gates, 2009) sagatavojis pārskatu un veicis analīzi par dažiem skrūvju izraušanas pretestību ietekmējošiem faktoriem. Apskatā minēts, ka optimāls aizurbšanas urbja diametrs, izmantojot to skaidu plātnēm, veido 85-90 % no skrūves iekšējā diametra. Aizurbšanas izmantošana skrūvju iestrādē plātnes malā būtiski samazina skaidu plātņu plaisāšanu, vienlaikus uzlabojot skrūvju izraušanas pretestību vidēji par 10 līdz 15 %. Skrūvju ieskrūvēšanas dziļuma palielināšana no 19.1 līdz 24.5 mm paaugstina skrūvju izraušanas pretestību aptuveni par 30 %.

Atsevišķos gadījumos skrūvju izraušanas pretestības rādītāji tiek izmantoti cita materiāla mehānisko rādītāju prognozēšanai. Semple un Smits (Semple un Smith, 2005) izstrādājuši modeli kokskaidu plātņu stiepes stiprības perpendikulāri pret plātnes plakni prognozēšanai atkarībā no skrūvju izraušanas pretestības no plātņu malām. Minētais modelis izmantojams kā ekspresmetode mēbeļu plātņu ražošanas kvalitātes kontrolei. Pētījumā konstatēts, ka sakarības starp skaidu plātņu skrūvju izraušanas pretestības rādītājiem un blīvumu ir vidēji ciešas vai vājas.

Nemot vērā to, ka KŠM nav izstrādāti vienoti materiāla izgatavošanas un pārbaudes standarti, šī materiāla īpašību noteikšanai pētnieciskiem mērķiem var izmantot materiālam piemērotas dažādas citas būvniecībā plaši izmantoto materiālu un izstrādājumu kvalitātes kontrolei paredzētas pārbaudes metodes. Analizējot KŠM mehāniskās īpašības, lietderīgi ir apskatīt materiāla izmēru ietekmi uz mehāniskajām īpašībām. Tas dod iespēju projektēšanas vajadzībām izvēlēties KŠM izmēriem atbilstošas mehāniskās īpašības.

1.4. Fizikāli ķīmiskās īpašības un tās ietekmējošie faktori

Pēdējo gadu laikā saistībā ar dažādu koksnes materiālu, izstrādājumu attīstību un izmantošanu būvniecībā arvien lielāku nozīmi iegūst pētījumi un pārbaudes, kuri atspoguļo koksnes materiālu ugunsdrošību un tās uzlabošanas iespējas.

Neskatoties uz to, ka koksne ir degošs materiāls, to ir iespējams izmantot droši, veicot atbilstošus uguns aizsardzības pasākumus vai izvēloties koksnes materiālam atbilstošu izmantošanas veidu. Koksnes aizsardzību var realizēt vairākos veidos - izmantojot ķīmisko, bioķīmisko vai fizikālo modificēšanu, kā arī konstruktīvo paņēmieni rezultātā (Thelanderson un Larsen, 2003).

Koksnes izmantošanu būvniecībā, dažādās izmantošanas sfērās galvenokārt ierobežo nacionālie būvniecības normatīvi (Östman un Rydholm, 2002). Koksnes un koksnes materiālu ugunsdrošības īpašību uzlabošana ievērojami paplašina to izmantošanas iespējas. Aktuāls kļūst jautājums par dažādu uguns aizsardzības līdzekļu efektivitātes saglabāšanu ilgstošas eksploatacijas laikā, it īpaši āra apstākļos, kā arī jautājums par estētisko īpašību saglabāšanu (Östman u.c., 2001).

Uguns aizsardzības līdzekļu efektivitātes jautājums tiek apskatīts arī materiālu blīvuma kontekstā. Materiāla blīvuma palielināšanās būtiski samazina aizsardzības līdzekļa uzsūkšanās spēju materiālā - ne tikai dažādiem koksnes materiāliem, bet arī masīvkoksnei vienas koku

sugas ietvaros. Tas rada uguns aizsardzības līdzekļa atšķirīgu iedarbību uz vienas koku sugas, bet dažāda blīvuma koksnes materiāliem (Kristoffersen u.c., 2004).

Materiāla aizdedzināmība, degtspēja, siltuma atdeve un uguns izplatība ir biežāk sastopamās koksnes materiālu īpašības, kuras tiek apskatītas uguns aizsardzības jautājumu kontekstā. Pāroģļošanās ātrums ir īpašība, kura bieži tiek aplūkota saistībā ar koksnes materiālu ugunsizturības noteikšanu.

Degšanas procesu ietekmē ne tikai materiāla īpašības, bet arī apkārtējās vides apstākļi, piemēram, gaisa temperatūra un mitrums, skābekļa koncentrācija gaisā u.c.

Nozīmīgākie koksnes materiālu degšanu ietekmējošie faktori saskaņā ar Hakkarainen (Hakkarainen et al., 2005) ir materiāla ģeometriskie izmēri, mitrums, konstruktīvais risinājums, koku suga vai kompozītmateriāla veids, koksnes apstrāde, izmantotie dekoratīvās vai pretuguns apdares materiāli, materiālu kombinācijas.

Koksnes materiālus pēc to biezuma var iedalīt termiski plānos un termiski biezos. Termiski plāni materiāli aizdegas ātrāk nekā termiski biezi materiāli. No vienas puses, pakļaujot siltuma iedarbībai termiski plānus materiālus, tā pretējās puses ātri sasniedz siltuma iedarbībai pakļautās puses temperatūru, savukārt termiski biezu materiālu gadījumā pat pie materiāla aizdegšanās materiāla pretējās puses temperatūra saglabā apkārtējās vides temperatūru. Runājot par koksnes materiāliem, par termiski plāniem tiek uzskatīti materiāli ar biezumu ≤ 10 mm, savukārt par termiski bieziem - materiāli ar biezumu, kas lielāks par 10 mm (Hakkarainen u.c. 2005).

Salīdzinot termiski plāna (6.5 mm) bērza saplākšņa ugunsreakcijas parametrus ar termiski biezu saplākšņu (12 un 30 mm) ugunsreakcijas parametriem, vērojama būtiska atšķirība. Termiski plāns saplākšnis uzrādījis 2.5 līdz 2.8 reizes augstāku ugunsgrēka attīstības indeksu, salīdzinot ar termiski bieziem saplākšņiem. Kopējā siltuma izdalīšanās 600 s laikā THR_{600s} termiski plānam saplākšnim ir 3.2 līdz 4.6 reizes augstāka nekā termiski biežajiem saplākšņiem. Ievērojamā rādītāju atšķirība skaidrojama ar termiski plānā materiāla caurdegšanu un degšanas attīstību materiāla pretējā pusē (Bukšāns, 2010).

Būvmateriālu tirgū ir pieejams plašs koksnes un koksnes materiālu klāsts ar ļoti atšķirīgu uzbūvi un īpašībām. Var atšķirties ne tikai produkta izmēri, bet arī virsmas apstrādes veids. Sastopami izstrādājumi ar lielā šķērsriezuma dimensijām, piemēram, liekti līmētās koka konstrukcijas tiltu un ēku būvniecībai, kā arī tādi produkti kā apšuvuma dēļi, kurus bieži var uzskatīt par termiski plāniem materiāliem. Saskaņā ar Bukšāna veiktajiem pētījumiem 2010. gadā koksnes materiālu izmantošana dažādos konstruktīvajos risinājumos maina konstrukciju ugunsreakcijas parametrus. Noskaidrots, ka tādi rādītāji kā virsmas apstrādes kvalitāte, kokšķiedru orientācija un elementu izvietojums konstrukcijā ietekmē ugunsreakcijas parametrus. Frēzētai virsmai novērojama straujāka materiāla aizdegšanās un degšanas jaudas palielināšanās nekā zāģētai virsmai. Ugunsgrēka attīstības ātruma indekss FIGRA būtiski neatšķiras horizontāli un vertikāli orientētiem egles dēļiem, toties siltuma izdalīšanās 600 s laikā THR_{600s} ir daudz augstāka vertikāli orientētiem egles dēļiem nekā horizontāli orientētiem dēļiem. Veidojot konstrukciju ar gaisa spraugām starp horizontāliem egles koksnes elementiem, ievērojami palielinās gan ugunsgrēka attīstības ātruma indekss, gan izdalītā siltuma daudzums, salīdzinot ar elementiem bez gaisa spraugām. Šādas situācijas rašanās pamatojama ar palielinātu degošās virsmas laukumu un papildu skābekļa piekļuvi degšanas vietai.

Koksnes aizdedzināmība ir atkarīga no sildīšanas veida, koksnes termiskajām īpašībām un siltuma veida ietekmes. Tiek izšķirti vairāki nozīmīgi koksnes aizdegšanos ietekmējoši faktori - koksnes mitruma palielināšanās būtiski palielina aizdegšanās laiku, koksnes dimensiju samazināšana aizdegšanās laiku samazina, savukārt koksnes blīvumam palielinoties, palielinās arī aizdegšanās laiks. Pie ārējiem faktoriem, kuri ietekmē koksnes aizdedzināmību, var minēt - siltuma iedarbības intensitāti un veidu, piemēram, iedarbības attālumu un laukumu, kādā notiek iedarbība (Hakkarainen u.c. 2005).

Koksnes mitruma galvenā ietekme uz koksnes aizdedzināmību izpaužas kā koksnes siltuma kritums, kas saistīts ar koksni esošā ūdens uzsildīšanu un īpaši ar enerģijas patēriņu ūdens iztvaikošanas nodrošināšanai. Koksnes mitruma palielināšanās paaugstina tās siltumnerci (Hakkarainen u.c. 2005).

Koksnes mitruma saturs tieši ietekmē koksnes degšanas procesu. Starp koksnes mitrumu un ugunsreakciju raksturojošajiem parametriem FIGRA un THR_{600s} pastāv ciešas negatīvas sakarības, savukārt mitruma palielināšanās neatstāj būtisku ietekmi uz dūmu veidošanās parametriem SMOGRA un TSP (Bukšāns, 2010).

Koksnes sugai un koksnes kompozītmateriālu veidam ir nozīmīga ietekme uz degšanas parametriem. Tādām koku sugām kā eglei, priedei un apsei ir raksturīgs ievērojami īsāks laiks, līdz tās aizdegas, salīdzinot ar oša un ozola koksni. Līdzīga tendence vērojama, analizējot dažādu koku sugu maksimālās degšanas jaudas sasniegšanas laiku. Skujkokiem un mīkstajiem lapkokiem šis laiks ir mazāks nekā bērzam un cietajiem lapkokiem. Plaši pazīstami un lietoti koksnes kompozītmateriāli, tādi kā orientēto kokskaidu plātnes, vidēja blīvuma šķiedru plātnes un skaidu plātnes, uzrāda augstākus ugunsgrēka attīstības indeksa FIGRA rādītājus, salīdzinot ar egles koksnes rādītājiem. Savukārt bērza saplākšņa ugunsgrēka attīstības ātruma indekss ir zemāks nekā egles koksnei. Kopējā siltuma izdalīšanās 600 s laikā THR_{600s} visiem iepriekš minētajiem kompozītmateriāliem ir augstāka nekā egles koksnei (Bukšāns, 2010).

Siltuma starojuma ietekmi uz egles koksnes aizdegšanās laiku var aprakstīt ar ciešu negatīvu sakarību. Siltuma starojumam palielinoties no 25 līdz 75 $Kw\ m^{-2}$, aizdegšanās laiks samazinās aptuveni 20 reizes - no 160 līdz 8 s. Savukārt egles koksnes maksimālā degšanas jauda, palielinoties siltuma starojumam, būtiski pieaug (Bukšāns, 2010).

Degšanas procesā atdotajam siltumam ir svarīga nozīme uguns izplatībā. Jo lielāka ir degošā objekta siltuma atdeve, jo ātrāk uguns izplatās. Izdalīto gāzu temperatūra un ierobežojošā materiāla temperatūra kļūst augstāka. Siltuma atdeves ātrums ir viens no biežāk sastopamajiem rādītājiem materiālu degšanas raksturošanai, minēto rādītāju parasti izsaka kW vai MW. Ņemot vērā materiālu daudzveidību un degšanas procesu ietekmējošos ārējos faktorus, siltuma atdeves ātrumu nevar raksturot ar konkrētu siltuma atdeves ātruma rādītāju. Koksnei degot, liesmas izplatās pa tās virsmu, tādēļ uguns izplatība ir atkarīga no tiem pašiem faktoriem kā koksnes aizdedzināmība. Degošās virsmas siltuma atdevei, sildot degšanas vietai tuvās virsmas, ir tieša ietekme uz uguns izplatības ātrumu. Šī iemesla dēļ faktori, kuri ietekmē siltuma atdeves ātrumu, būtiski ietekmē arī uguns izplatību (Hakkarainen u.c. 2005).

Materiālam degot ar nemainīgu siltuma atdevi uz laukuma vienības, robeža starp pirolīzei pakļauto materiālu un neskarto koksni virzās materiāla dziļumā. Pāroģļošanās ātrums atbilst pirolīzes procesa ātrumam. Pāroģļošanās ātrumam ir būtiska nozīme koka konstrukciju uguns izturības aprēķinos. Degšanas procesā radusies ogles kārtā noteiktu laiku spēj saglabāt koksnes sākotnējās īpašības un kavē degšanas procesu.

Koksnes pāroģļošanās ātrumu ietekmē šādi rādītāji: blīvums, ārējā siltuma plūsma, mitrums, koksnes virziens un koksnes ķīmiskais sastāvs (Mikkola, 1990; Collier, 1992). Palielinoties blīvumam, koksnes pāroģļošanās ātrums samazinās, tāpat kā koksnes mitruma palielināšanās gadījumā. Starp ārējo siltuma plūsmu un pāroģļošanās ātrumu pastāv lineāra sakarība. Saistībā ar mitruma iztvaikošanu kokšķiedru virzienā pāroģļošanās notiek ātrāk nekā šķērsām šķiedrām. Koksnes ķīmiskā sastāva atšķirības dažādām koku sugām var būtiski palielināt vai samazināt koksnes pāroģļošanās ātrumu. Koksnes pāroģļošanās ātrums ir robežās no 0.5 līdz 1 $mm\ min^{-1}$ (Hakkarainen u.c. 2005).

Pāroģļošanās ātrums nav atkarīgs no uguns aizsardzības līdzekļu izmantošanas (Nussbaum, 1988). Uguns aizsardzības līdzekļu izmantošana ir efektīva degšanas sākuma fāzē, kuras laikā tiek kavēta materiāla aizdegšanās.

Viens no degšanas blakusproduktiem ir dūmi, kas galvenokārt sastāv no oglekļa daļiņām, kuras būtiski samazina redzamību. Dūmu izdalīšanās daudzums laika vienībā ietekmē materiāla izmantošanas iespējas. Šis rādītājs tiek vērtēts ne tikai materiālu

klasificēšanā pēc ugunsreakcijas, bet arī evakuācijas ceļu projektēšanas kontekstā. Dūmu izdalīšanās ir atkarīga no degošā materiāla veida un arī no ārējiem faktoriem - tādiem kā degšanas veida un skābekļa apgādes. Saskaņā ar Bukšāna veikto pētījumu, koksnes kompozītmateriāliem degot, izdalās mazāk dūmu nekā egles koksnei. Savukārt mīksto lapkoku koksnes degšanas procesā izdalās mazāk dūmu, nekā degot skujkoku koksnei (Bukšāns, 2010). Salīdzinot ar plastikāta izstrādājumiem, koksnes materiāli un produkti ir raksturojami ar krietni zemāku dūmu izdalīšanos, kas ir aptuveni $25-100 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$ (Hakkarainen u.c. 2005).

Atkarībā no uguns aizsardzības līdzekļa veida uguns aizsardzības līdzekļu izmantošana var gan palielināt dūmu izdalīšanos, gan to samazināt. Pietiekami efektīvi uguns aizsardzības līdzeklim kavējot degšanas attīstību, būtiski samazinās izdalīto dūmu daudzums degšanas sākuma fāzē.

Atkarībā no apdares materiāla veida to izmantošana var gan kavēt, gan veicināt uguns izplatību. Uz bērsa saplākšņa uzklājot nitrolaku, poliuretāna laku, skābās cietēšanas krāsu vai laku, saplākšņa aizdegšanās notiek ātrāk nekā saplāksnim bez apdares. Eļļas, vaski, ūdens bāzes lakas un krāsas saplākšņa aizdegšanās laiku palielina. Lai arī apdares materiāli ietekmē materiāla aizdegšanos un uguns izplatību, tie neatstāj būtisku ietekmi uz ugunsgrēka attīstības ātruma indeksu FIGRA un kopējā siltuma izdalīšanos 600 s laikā $\text{THR}_{600\text{s}}$, līdz ar to ar apdares materiāliem pārklāto bērsa saplāksni var klasificēt ugunsreakcijas klasē D - tāpat kā nepārklātu saplāksni (Bukšāns, 2010).

Koksnes termiskā modificēšana un acetilēšana pasliktina ugunsreakcijas parametrus, kas var izraisīt materiāla pāriešanu zemākā ugunsreakcijas klasē (Bukšāns, 2010).

Jaunās būvizstrādājumu regulas Nr. 305/2011 stāšanās spēkā Eiropā 2011. gadā Eiropas Savienības dalībvalstīs, līdztekus ar būvniecības likuma¹⁶ un ugunsdrošības normu MK Nr. 498 LBN 201-10 izmaiņām Latvijā, piedāvā Eiroklasifikācijas sistēmu, kurā visi būvmateriāli tiek klasificēti pēc to ugunsreakcijas un ugunsizturības. Tas nozīmē, ka konkrētam būvniecības pielietojumam ir izmantojami klasificēti būvmateriāli, kuri spēj nodrošināt nepieciešamos ugunsizturības vai ugunsreakcijas parametrus. Minēto būvmateriālu atbilstības apliecināšana ir pakļauta Eiropas harmonizētajiem standartiem, tajos minētajām novērtēšanas sistēmām un pārbaudes metodēm. Pēc Eiroklasifikācijas sistēmas novērtēts būvmateriāls ar tam noteiktu ugunsreakcijas vai ugunsizturības klasi var tikt piedāvāts jebkuras Eiropas Ekonomiskās zonas valsts tirgū, tai pašā laikā nosacījumus, ar kādiem konkrēto būvmateriālu var iebūvēt konkrētā būvē, nosaka katra valsts atsevišķi - atbilstoši savas valsts nacionālajiem būvniecības noteikumiem.

Ugunsizturība ir būves elementu vai konstrukciju spēja noteiktā laika posmā saglabāt nestspēju, termoizolētību un viengabalainību. Būvju konstrukciju ugunsizturību nosaka atbilstoši būvkonstrukcijas nestspējas, viengabalainības un termoizolētības īpašību noturībai ugunsgrēka laikā. Būvkonstrukciju ugunsizturību nosaka testējot, aprēķinot vai arī apvienojot testēšanu ar aprēķiniem. Standarts LVS EN 13501-2+A1 nosaka būves elementu un to konstrukciju ugunsizturības klasifikāciju.

Par ugunsreakciju sauc noteiktiem apstākļiem pakļauta būvizstrādājuma reakciju uz uguni. Ugunsreakcija raksturo būvizstrādājuma spēju ar savu noārdīšanos veicināt uguns izplatību. Būvizstrādājumu ugunsreakciju raksturo šādas īpašības, kas izpaužas, būvizstrādājumam nonākot saskarē ar uguni - uzliesmošana, siltuma izdalīšanās, uguns izplatība, dūmu izdalīšanās un degošu (karstu) pilienu izdalīšanās. Ugunsreakcijas īpašības nosaka, vai nu testējot un klasificējot saskaņā ar standarta LVS EN 13501-1+A1 metodiku, vai standartizētiem produktiem deklarējot bez testēšanas (LBN 201-10). Galvenā atšķirība starp ugunsizturības un ugunsreakcijas parametru noteikšanas metodēm ir novērtēšanas principā - ugunsizturības pārbaudēs tiek noteikta būvkonstrukcijas īpašību noturība līdz

¹⁶ <http://likumi.lv/ta/id/36531-buvniecibas-likums>, skatīts 12.01.2013.

materiāla pilnīgai sagrāvei, savukārt ugunsreakcijas pārbaudēs parametri tiek noteikti 600 s laikā no pārbaudes sākuma.

Būvizstrādājumus, izņemot grīdas segumus, pēc to ugunsreakcijas var klasificēt šādās 7 klasēs - A1, A2, B, C, D, E un F, kur A1 ir visaugstākā ugunsreakcijas klase jeb nedegoši materiāli, savukārt F ir viegli uzliesmojoši materiāli. Uguns reakcijas klases papildus raksturo ar dūmu veidošanās indeksu s1, s2 vai s3 un liesmojošu pilienu, daļiņu indeksu d0, d1 vai d2. Indeksu nozīmi skatīt 1.13. tabulā.

Materiālu ugunsreakciju raksturo šādi rādītāji: ugunsgrēka attīstības ātruma indekss (FIGRA), kopējā siltuma izdalīšanās 600 s laikā (THR_{600s}), dūmu palielināšanās ātrums (SMOGR), TSP 600 s laikā (TSP_{600s}), liesmas izplatība (FS), liesmu izplatīšanās uz sāniem (LFS), kopējais sadegšanas siltums (PCF), masas zudums (Δm), temperatūras pieaugums (ΔT) un kritiskā siltuma plūsma (CHF).

Koksnes materiālu ugunsreakciju un to ietekmējošos faktorus savā disertācijā pētījis Bukšāns. Viņa darbā apkopota un analizēta plaša informācija par koksnes un koksnes kompozītmateriālu ugunsreakciju, ugunsdrošību un to ietekmējošiem faktoriem, kā arī antipirēnu izmantošanu koksnes aizsardzībā. Autors savus pētījumus apkopojis 10 publikācijās (Bukšāns, 2010).

Pētījumos noteiktie koksnes materiālu ugunsreakcijas parametri būvniecībā plaši izmantotiem koksnes materiāliem apkopoti 1.11. tabulā.

Izmantojot 1.11. tabulā norādītos ugunsgrēka attīstības ātruma indeksa FIGRA rādītājus, pēc standarta LVS EN 13501-1+A1 metodikas var noteikt minēto koksnes materiālu potenciālo ugunsreakcijas klasi. Noskaidrots, ka pēc FIGRA, kas visos gadījumos ir mazāks par 750 W s^{-1} , bet lielāks par 250 W s^{-1} , visi 1.11. tabulā minētie koksnes materiāli var tikt klasificēti D ugunsreakcijas klasē. D ugunsreakcijas klases būvizstrādājumi uguns iedarbības rezultātā var radīt vispārējas uzliesmošanas situāciju un aktīvi iesaistīties degšanas procesā. Atsevišķus koksnes materiālus, kā arī ar uguns aizsardzības līdzekļiem speciāli apstrādātos koksnes materiālus iespējams klasificēt B ugunsreakcijas klasē (Thelanderson un Larsen, 2003).

1.11. tabula

Koksnes materiālu ugunsreakcijas parametri

Koksnes materiāls	Biezums, mm	FIGRA, W s^{-1}	THR_{600s} , MJ	SMOGR, $\text{m}^2 \text{s}^{-2}$	TSP_{600s} , m^2	Avots
Bērza saplāksnis	12	306	20.0	-	-	(Bukšāns, 2010)
Egle	20	374	15.2	-	61	
Apse	20	432	26.3	-	25	
Egle	18	419	18.0	4	36	(Mayes un Oksanen, 2003)
Priede	21	321	23.2	3	15	
Termiski modificēta priede	25	581	32.8	6	62	
Egles saplāksnis	12	596	15.8	3	45	

Ēku koka apšuvumu ugunsreakcijas pētījumi liecina, ka koka dēļu apšuvumu var klasificēt D-s2, d0 reakcijas klasē. Kā galvenie koka apšuvuma dēļu ugunsreakcijas parametrus ietekmējošie faktori tiek minēti - materiāla biezums, blīvums un izmantošanas nosacījumi, ar vai bez gaisa spraugas aiz materiāla (Östman and Mikkola, 2006).

Nēmot vērā iepriekš minēto informāciju, izstrādājot jaunus koksnes materiālus, kuru uguns reakcijas klase nav zināma, ieteicams izvēlēties D ugunsreakcijas klasei izmantotās standarta LVS EN 13501-1+A1 testēšanas metodes, skat. 1.12. tabulu.

Ugunsreakcijas klasifikācijas testa metodes un kritēriji D ugunsreakcijas klasei

Klase	Testa metodes	Klasifikācijas kritēriji	Papildu klasifikācija
D	LVS EN 13823 un	$FIGRA \leq 750 \text{ W s}^{-1}$	Dūmu veidošanās ^{b)} un liesmojoši pilieni, daļiņas ^{c)}
	LVS EN ISO 11925-2 ^{a)} Iedarbība = 30 s	$F_s \leq 150 \text{ mm 60 s laikā}$	Liesmojoši pilieni, daļiņas ^{c)}

^{a)} virsmas iedarbības apstākļos un ja tas atbilst izstrādājuma galīgā pielietojuma apstākļiem, šķautnes liesmas iedarbībā.

^{b)} testu procedūras izstrādes pēdējā posmā ir ieviestas dūmu mērīšanas sistēmas izmaiņas, kuru ietekme ir turpmāk jāpēta. Tas var būt par cēloni dūmu veidošanās novērtējuma robežvērtību un/vai parametru grozījumiem. $s1 = \text{SMOGRA} \leq 30 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ un $\text{TSP}_{600s} \leq 50 \text{ m}^2$; $s2 = \text{SMOGRA} \leq 180 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ un $\text{TSP}_{600s} \leq 200 \text{ m}^2$; $s3$ nav ne $s1$ ne $s2$.

^{c)} $d0$ = nav liesmojošu pilienu, daļiņu standarta LVS EN 13823 600 s laikā; $d1$ = nav liesmojošu pilienu, daļiņu, kas liesmo ilgāk par 10 s standarta LVS EN 13823 600 s laikā; $d2$ = nav ne $d0$, ne $d1$.

Tāpat kā koksnes materiāliem, arī visiem siltumizolācijas materiāliem, kurus izmanto būvniecībā, jāveic to testēšana attiecībā uz ugunsreakciju. Atsevišķu siltumizolācijas materiālu ugunsreakcijas klases apkopotas 1.13. tabulā (Pfundstein, 2008). Kā redzams 1.13. tabulā, siltumizolācijas materiāli uz koksnes bāzes un putupolistirola siltumizolācijas materiāli tiek klasificēti E ugunsreakcijas klasē, kas ir par klasi zemāka nekā koksnei un koksnes materiāliem. Savukārt minerālvates, fibrolīta un poliuretāna siltumizolācijas materiāli tiek klasificēti augstākās ugunsreakcijas klasēs no A1 līdz C.

Dažu siltumizolācijas materiālu ugunsreakcijas klases

Siltumizolācijas materiāls	Ugunsreakcijas klase	Dūmu veidošanās indekss un liesmojošo pilienu un daļiņu indekss
Celulozes šķiedras	E	-
Koksnes šķiedras	E	-
Poliuretāns cietā formā	no B līdz C	no $s2$, $d0$ līdz $s3$, $d0$
Putupolistirols	E	-
Fibrolīts	B	$s1$, $d0$
Minerālvate	no A1 līdz A2	-

Literatūrā plaši apskatītas dažādas metodes koksnes un koksnes materiālu ugunsreakcijas parametru uzlabošanai. Lielākā vērība tiek pievērsta uguns aizsardzības līdzekļu (antipirēnu) izmantošanai koksnes aizsardzībā. Visbiežāk tiek izmantotas šādas koksnes un koksnes materiālu apstrādes tehnoloģijas ar uguns aizsardzības līdzekļiem - impregnēšana zem spiediena, virsmas apstrāde un uguns aizsardzības piedevu pievienošana materiāla izgatavošanas procesā. Minētie paņēmieni ir efektīvi koksnes un koksnes materiālu aizdedzināmības, siltuma atdeves un uguns izplatības samazināšanai. Tai pašā laikā tiek minēts, ka nav izgudrots efektīvs līdzeklis, kas padarītu koksni un koksnes materiālus nedegošus (Hakarainen u.c., 2005).

Fizikālās un konstruktīvās modificēšanas paņēmiena izmantošana tiek minēta kā otrs praksē plaši izmantotais variants materiālu ugunsreakcijas parametru uzlabošanai. Kā piemērus var minēt materiāla virsmas blīvināšanu, materiālu veidošanu, kombinējot dažādu koku sugu koksni, un kompozītmateriālu veidošanu. Šādas modificēšanas mērķis ir veidot materiālu, kura ārējās kārtās esošais materiāls ir ar mazāku siltuma atdevi, degšana notiek ar mazāku attīstības ātrumu, kas nodrošina iespēju klasificēt materiālu augstākā ugunsreakcijas klasē, tādējādi paverot materiālam plašākas izmantošanas iespējas. Kā piemēru materiāla

aizdeģšanās laika palielināšanai var minēt materiāla laminēšanu zem augsta spiediena ar ugunsizturīgu aizsargkārtu vai kompozītmateriāla ārējās kārtas veidošanu no koksnes, kas impregnēta ar uguns aizsardzības līdzekli, materiāla iekšējos slāņos atstājot neimpregnētu materiālu (Hakarainen u.c., 2005).

Efektīvākais konstruktīvais risinājums koksnes materiālu ugunsreakcijas parametru uzlabošanai ir materiāla aizsardzība ar nedegoša (A vai B ugunsreakcijas klases) materiāla kārtu, tādējādi kavējot liesmas izplatību. Minētais paņēmieni plaši tiek izmantots koka karkasa, krustām līmēto konstrukciju kokmateriālu (CLT) un konstruktīvi izolēto paneļu (SIP) ēku būvniecībā. Kompozītmateriālu veidošanai pastāv plašas iespējas, kuru risinājums galvenokārt ir atkarīgs no produkta plānotā izmantošanas veida un izvirzītajām prasībām.

1.5. Pētījumi par koksnes šūnveida materiāla īpašībām

Kā pirmo pētījumu, kurā aktualizētas KŠM mehānisko īpašību modelēšanas iespējas, var minēt Vīnes Tehniskās universitātes pētnieku darbu profesora Eberharsteinera vadībā (Hofstetter u.c., 2009). Pētījumā izmantota matemātiskā galīgo elementu modelēšanas metode KŠM plātņu stiepes un lieces elastības prognozēšanai. Lai arī pētījumā secināts, ka KŠM ar matemātiskajiem aprēķiniem prognozētās mehāniskās īpašības būtiski neatšķiras ar eksperimentāli noteiktajām, tomēr šajā publikācijā netiek atspoguļoti dati, kas šo faktu apstiprinātu.

Uzsākot KŠM un trīs kārtu mēbeļu plātņu ražošanu, 2011. gadā veikti no priedes koksnes izgatavota KŠM un trīs kārtu mēbeļu plātņu materiāla fizikālo un mehānisko īpašību noteikšana. SIA "Dendrolight Latvija" deklarētās KŠM īpašības apkopotas 1.14. tabulā¹⁷. Īpašības noteiktas KŠM perpendikulārā virzienā, pārbaudot 52 mm biezus paraugus. Paraugu pārējie izmēri ir saskaņā ar saistīto testēšanas standartu prasībām.

1.14. tabula

Priedes KŠM īpašības, noteiktas saskaņā ar plātņu materiālu testēšanas standartiem¹⁸

Īpašība	Virziens	Testēšanas standarts	Rādītājs
Robežstiprība trīspunktu liecē, MPa	garenvirzienā	LVS EN 310	1.90
Elastības modulis trīspunktu liecē, MPa	garenvirzienā	LVS EN 310	131
Skrūvju izraušanas pretestība, N	no plaknes	LVS EN 320	330
	no skaldnes		388

Analizējot iegūtos mehāniskos rādītājus, iespējams secināt, ka KŠM robežstiprība statiskā liecē, pārbaudot perpendikulārā virzienā, ir 45 reizes zemāka nekā bezdefektu priedes koksnes robežstiprība statiskā liecē 86.0 MPa (Aleinikovas un Grigaliūnas, 2006), savukārt KŠM elastības modulis trīspunktu statiskā liecē atšķiras vēl vairāk - 110 reizes, salīdzinot ar literatūrā norādīto priedes koksnes elastības moduļa rādītāju trīspunktu liecē 14400 MPa (Termiski, 2005).

Neaplīmēta KŠM robežstiprība trīspunktu statiskā liecē, kas noteikta saskaņā ar standarta LVS EN 310 pārbaudes metodiku, ir aptuveni 10 līdz 15 reizes zemāka nekā vidēja blīvuma kokšķiedru plātnēm, savukārt elastības moduļa rādītājs statiskā liecē ir par 16 līdz 22 reizēm zemāks nekā vidēja blīvuma kokšķiedru plātnēm saskaņā ar literatūru²³.

Viens no plātņu materiālu raksturojošajiem mehāniskajiem rādītājiem ir savienotājlīdzekļu jeb skrūvju izraušanas pretestība, ko nosaka saskaņā ar standarta LVS EN 320 pārbaudes metodiku. Literatūrā netika atrasta informācija par skrūvju izraušanas

¹⁷ <http://dendrolight.lv/en/products/furniture-panel/> skatīts 01.05.2013.

¹⁸ <http://dendrolight.lv/en/products/core-material/core/> skatīts 12.05.2013.

pretestības rādītājiem no priedes masīvkoksnes, kuru noteikšana veikta saskaņā ar standarta LVS EN 320 metodiku. Literatūrā norādītie skrūvju izraušanas pretestības vidējie rādītāji no vidēja blīvuma kokšķiedru plātņu sānu malas ir robežās no 900 līdz 1100 N¹⁹, tie ir aptuveni trīs reizes augstāki nekā 1.17. tabulā apkopotie skrūvju izraušanas rādītāji no priedes KŠM.

KŠM fizikālās īpašības noteiktas, izmantojot plātņu materiāliem atbilstošās pārbaudes metodes, KŠM perpendikulārā virzienā. Pārbaudīti 52 mm biezi KŠM paraugi. Paraugu pārējie izmēri ir saskaņā ar saistīto standartu prasībām. Noteiktais KŠM vidējais blīvums saskaņā ar standartu LVS EN 323¹⁸ ir 291 kg m⁻³, kas ir par 62 % zemāks kā priedes koksnes blīvuma vidējā vērtība (Šķēle u.c., 2002). KŠM perpendikulārā virzienā raksturo 0.5 % uzbriešana biezumā pēc 24 stundu izturēšanas ūdenī. Iegūtā vērtība ir ievērojami zemāka, salīdzinot ar lielāko daļu koksnes plātņu materiālu uzbriešanas rādītājiem. Piemēram, OSB uzbriešana biezumā ir 15 %, savukārt PB var sasniegt pat 20 līdz 25 %²⁰ atkarībā no plātnes veida un izmantošanas²⁰.

SIA "Dendrolight Latvija" deklarētās trīs kārtu KŠM īpašības saskaņā ar plātņu materiālu testēšanas standartiem apkopotas 1.16. un 1.17. tabulā¹⁷. Materiāls veidots KŠM perpendikulārā virzienā (KŠM₉₀), abpusēji aplīmējot ar HDF. Pārbaudēm pakļautas plātnes ar ražošanā ieviesto minimālo biezumu 25 mm un maksimālo biezumu 60 mm.

1.15. tabula

Trīs kārtu KŠM plātņu fizikālās un mehāniskās īpašības plātnēm ar augsta blīvuma kokšķiedru plātnēm ārējās kārtās¹⁷

Īpašība	Virziens	Testēšanas standarts	Plātnes biezums	
Materiāla biezums, mm	-	-	25	60
Materiāla uzbūve HDF + KŠM ₉₀ + HDF, mm	-	-	4 + 17 + 4	4 + 52 + 4
Robežstiprība trīspunktu liecē, MPa	garenvirzienā	LVS EN	18.8	9.50
	šķērsvirzienā	310	17.0	8.70
Elastības modulis trīspunktu liecē, MPa	garenvirzienā	LVS EN	2390	1370
	šķērsvirzienā	310	2290	1240
Iekšējo slāņu atrašanās pretestība perpendikulāri plātnes plaknei, MPa	-	LVS EN 319	0.480	0.440
Skrūvju izraušanas pretestība, N	no plaknes	LVS EN	760	950
	no skaldnes	320	530	560

Kā redzams 1.15. tabulā, KŠM biezuma palielināšana pie vienāda ārējo kārtu materiāla biezuma būtiski samazina plātnes robežstiprību un elastības moduli trīspunktu statiskā liecē. Savukārt KŠM biezuma palielināšana neatstāj būtisku ietekmi uz plātņu materiāla robežstiprību statiskā stiepē perpendikulāri pret plātņu plakni, jo materiāla sagrāves vieta ir vērojama pa HDF. Pārbaudes rezultāti liecina, ka skrūvju izraušanas pretestības rādītāji ir krietni augstāki, pārbaudot materiāla plakni 60 mm biezajiem paraugiem nekā 25 mm biezajiem paraugiem. Skrūvju izraušanas pretestība no skaldnes nav atkarīga no materiāla biezuma.

Iepriekš minētās pārbaudes veiktas arī līdzīgas uzbūves un analogiska biezuma trīs kārtu priedes KŠM mēbeļu plātnēm, kuras abpusēji aplīmētas ar 4 mm bieziem bērza saplākšņiem (skat. 1.16. tabulu).

¹⁹ http://www.egger.com/downloads/bildarchiv/105000/1_105933_TD_EGGER_MDF-MBP-L_E1_EN.pdf, skatīts 01.06.2013.

²⁰ <http://www.en.mdb.swisskrono.pl/OSB-boards/Technical-Data>, skatīts 01.03.2015.

Trīs kārtu KŠM plātņu mehāniskās īpašības plātnēm ar bērza saplāksni ārējās kārtās¹⁷

Īpašība	Virziens	Testēšanas standarts	Plātnes biezums	
Materiāla biezums, mm	-	-	25	60
Materiāla uzbūve PW + KŠM + PW, mm	-	-	4 + 17 + 4	4 + 52 + 4
Robežstiprība trīspunktu liecē, MPa	garenvirzienā	LVS EN 310	41.0	21.1
	šķērsvirzienā		21.4	11.1
Elastības modulis trīspunktu liecē, MPa	garenvirzienā	LVS EN 310	7670	4540
	šķērsvirzienā		3290	1850
Iekšējo slāņu atraušanas pretestība perpendikulāri plātnes plaknei, MPa	-	LVS EN 319	0.980	0.760
Skrūvju izraušanas pretestība, N	no plaknes	LVS EN 320	1320	1290
	no skaldnes		580	600

Pārbaudēs noskaidrots, ka, ārējās kārtās izmantojot PW un paraugus pārbaudot garenvirzienā, iespējams iegūt aptuveni divas reizes augstākus robežstiprības rādītājus statiskajā liecē, savukārt plātnes šķērsvirzienā plātnēm ar PW un HDF ārējās kārtās robežstiprības rādītāji trīspunktu statiskajā liecē neatšķiras. Trīspunktu statiskās lieces elastības moduļa rādītāji abiem plātņu biezumiem un plātņu virzieniem ir augstāki plātnēm, izgatavotām ar PW ārējās kārtās. Iekšējo slāņu atraušanas pretestība ir ievērojami augstāka plātnēm ar PW ārējās kārtās, jo to slāņu atraušanas pretestība ir augstāka. HDF aizvietojo ar PW KŠM plātnes konstrukcijām, palielinās skrūvju izraušanas pretestības rādītāji no materiāla plaknes. Virsējās kārtas materiāls neietekmē skrūvju izraušanas pretestības rādītājus no plātnes skaldnes.

Ar HDF plātnēm aplīmētas KŠM plātnes robežstiprības un elastības rādītājus statiskajā liecē var salīdzināt ar būvniecībā plaši izmantotajiem PB un OSB plātņu robežstiprības rādītājiem, savukārt KŠM aplīmēšanā izmantojot bērza saplākšņus, iegūtie rādītāji mēbeļu plātnes garenvirzienā ir daudz augstāki.

KŠM abpusēju aplīmēšanu perpendikulārā virzienā ar plātņu materiāliem var uzskatīt par efektīvu līdzekli materiāla mehānisko īpašību uzlabošanai, jo mehāniskie rādītāji pieaug vairākas reizes. Kā negatīvu aspektu var minēt būtisko materiāla blīvuma un briešanas rādītāju pieaugumu.

Viršējo kārtu materiāla blīvums tieši ietekmē plātnes beigu blīvumu, piemēram, izmantojot bērza saplākšņus KŠM mēbeļu plātņu izgatavošanā (blīvums $\sim 600 \text{ kg m}^{-3}$), trīs kārtu mēbeļu plātnes vidējais blīvums ir no 385 līdz 477 kg m^{-3} , kas ir zemāks, nekā izmantojot HDF ar blīvumu $\sim 700 \text{ kg m}^{-3}$. Iegūtie mēbeļu plātņu vidējie blīvuma rādītāji ir robežās no 352 līdz 446 kg m^{-3} ²¹. Materiāla kopējais blīvums vairāk palielinās 25 mm biezām mēbeļu plātnēm nekā 60 mm biezām plātnēm, jo blīvums ir tieši atkarīgs no KŠM un viršējo kārtu materiāla attiecības plātnes šķēsgriezumā.

KŠM uzbriešanu biezumā pēc 24 stundu izturēšanas ūdenī raksturo 0.5 % uzbriešana, savukārt no HDF un PW izgatavotajām mēbeļu plātnēm rādītāji ir no 4 līdz pat 16 reizēm augstāki, attiecīgi - 3.6 līdz 8.2 % (ar HDF aplīmētām mēbeļu plātnēm) un 1.9 līdz 4.3 % (ar PW aplīmētām plātnēm). Līdzīgi kā blīvuma pieauguma gadījumā, arī uzbriešanas rādītāji ir augstāki 25 mm biezām KŠM mēbeļu plātnēm²¹.

Nemot vērā pārbaudēs izmantotās vienādās plātņu materiālu un KŠM mēbeļu plātņu pārbaudes metodes, iegūtos rādītājus var salīdzināt ar būvniecībā plaši izmantoto koksnes plātņu materiālu fizikālo un mehānisko īpašību rādītājiem.

Iepriekš minēto KŠM un trīs kārtu mēbeļu plātņu materiālu īpašību noteikšanai izmantoti maza izmēra paraugi, kā rezultātā minētie rādītāji nevar tikt attiecināti un izmantoti

liela izmēra KŠM būvkonstrukciju inženiertehniskajos aprēķinos un izstrādājumu mehānisko īpašību modelēšanā.

Pie KŠM siltumtehnisko un mehānisko īpašību modelēšanas jautājumiem strādājuši zinātnieki un studenti no Rīgas Tehniskās universitātes (RTU).

Kupča savā maģistra darbā veikusi KŠM mehānisko īpašību skaitlisko un eksperimentālo validāciju, izmantojot datorprogrammas ANSYS un ABAQUS galīgo elementu vidē (Kupča, 2012). Modeļu validācijai noteiktas materiālu īpašības laboratorijas apstākļos. Matemātiskie modeļi izstrādāti un pārbaudes veiktas KŠM ar lameles biezumiem 18 un 25 mm. Modeļu validācijai izmantoti KŠM spiedes paraugi, trīs kārtu *Dendrolight*[®] plātņu maza un liela izmēra lieces paraugi, kā arī KŠM paralēlā virziena paneļi, aplīmēti ar HDF. Eksperimentālajās pārbaudēs iegūti šādi KŠM robežstiprības rādītāji spiedē, skat. 1.17. tabulu.

1.17. tabula

Priedes KŠM aptuvenie robežstiprības un elastības moduļu rādītāji spiedē
(Kupča, 2012)

Rādītājs	KŠM ar lameles biezumu			
	18 mm		25 mm	
	paralēli	perpendikulāri	paralēli	perpendikulāri
Robežstiprība spiedē, MPa	1.75	2.15	1.40	0.90
Elastības modulis spiedē, MPa	50.0	110.0	50.0	50.0

Kā redzams tabulā, KŠM mehāniskajām īpašībām ir tendence samazināties, palielinoties lameles biezumam.

Pārbaudot 80 mm biezās trīs kārtu materiāla plātnes ar paralēlo KŠM orientāciju, noteikta paneļu robežstiprība liecē ir aptuveni no 620 līdz 650 MPa, elastības modulis liecē 1190 līdz 1250 MPa un elastības modulis bīdē 7 līdz 9 MPa. Salīdzinot šī paneļa robežstiprības liecē rādītājus ar KŠM ražotāja deklarētajiem rādītājiem²¹, nākas secināt, ka robežstiprības rādītāji liecē ir vairākus desmitus reižu lielāki nekā KŠM ražotāja deklarētie. Minēto atšķirību var skaidrot ar atšķirīgajām pārbaudes metodēm vai nepareizi norādītiem lielumiem vai mērvienībām.

Pētījuma rezultātā secināts, ka, izmantojot matemātiskās aprēķinu metodes, iespējams aprēķināt KŠM lieces un spiedes mehāniskos rādītājus ar maksimālo kļūdu līdz 30 %. Šāda aprēķinu precizitāte tiek uzskatīta par pietiekamu, jo būtisku ietekmi uz rādītājiem atstāj lielā koksnes materiāla rādītāju izkliede. Saskaņā ar "sendvičpaneļu" aprēķinu teoriju secināts, ka vislielāko ietekmi uz trīs kārtu paneļu izlieci atstāj virsējās kārtas materiāla elastības modulis un iekšējo kārtu materiāla bīdes elastības modulis. Iekšējās kārtas elastības moduļa ietekme ir neliela (Kupča, 2012). Galvenie pētījuma rezultāti ir publicēti (Labans un Kalnins, 2013).

Bikovs savā maģistra darbā apskatījis KŠM un tā trīs kārtu plātņu materiāla siltumtehniskās īpašības un to matemātiskās modelēšanas iespējas. Pētījumā aplūkots no 25 mm biezām priedes lamelēm izgatavots KŠM gan paralēlā, gan perpendikulārā virzienā. Apskatīta arī ar HDF pārklāta KŠM siltumpretestība. Aprēķinu modeļi validēti, izmantojot eksperimentāli iegūtos rādītājus (Bikovs, 2013).

Eksperimentālie rezultāti iegūti, paraugus pārbaudot ar "karstās" kastes metodi un saskaņā ar standartu LVS EN ISO 8990, kā arī ar kalorimetra metodi pēc standarta LVS EN 12667.

Pētījumā eksperimentāli noteiktie KŠM siltumvadītspējas koeficienti bija robežās no 0.078 līdz 0.13 W m⁻¹ K⁻¹, savukārt aprēķinu ceļā iegūtie - no 0.068 līdz 0.082 W m⁻¹ K⁻¹. Jāpiemin, ka eksperimentāli iegūtie rādītāji no aprēķinu ceļā iegūtajiem siltumvadītspējas koeficientu rādītājiem atšķiras no 5 līdz pat 48 %. Lielākā rādītāju atšķirība konstatēta materiālam ar perpendikulāro materiāla virzienu.

Pētījuma noslēgumā aprēķināts no KŠM izgatavotas sienas minimāli nepieciešamais biezums, lai izpildītu būvnormatīva LBN 002-01 prasības un panāktu sienas siltuma caurlaidības koeficienta vērtību vienādu ar $0.25 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$. Aprēķinā izmantoti šādi KŠM siltumvadītspējas koeficientu rādītāji - paralēlā virzienā $0.11 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ un perpendikulārā virzienā $0.083 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$. Aprēķinu rezultātā iegūti attiecīgi minimālie sienas biezumi 0.367 un 0.277 m, kuri nodrošina ārējām sienu konstrukcijām minimāli nepieciešamo siltumpretestības koeficientu. Tādiem tradicionāliem būvmateriāliem kā betonam, ķieģeļiem un “fibo” blokiem nepieciešams izmantot vairākas reizes biezākas sienas, lai panāktu būvnormatīviem atbilstošus siltumpretestības rādītājus (Bikovs, 2013).

Pētījumā secināts, ka ar galīgo elementu aprēķinu programmu ANSYS iespējams sekmīgi veikt termiskos aprēķinus sienas konstrukcijām, kuras veidotas no KŠM iekšējās kārtas. Analītiskajos aprēķinos iegūtie rezultāti vairāku slāņu KŠM sienu konstrukciju gadījumā minimāli atšķirās no pārbaužu rezultātiem. Galvenie pētījuma rezultāti ir publicēti (Labans u.c., 2012).

Arī LLU Kokapstrādes katedrā un SIA „Meža un koksnes produktu pētniecības un attīstības institūts” ir veikti vairāki nozīmīgi pētījumi par KŠM un tā trīs kārtu plātņu un būvelementu fizikālajām, mehāniskajām un fizikāli ķīmiskajām īpašībām.

2009. gadā uzsākot pētījumus par KŠM un tā izstrādājumu īpašībām, netika atrasta informācija par KŠM vai tā izstrādājumu skaņas izolācijas un absorbcijas īpašībām. Šī iemesla dēļ Strazdiņš savā maģistra darbā pievērsies KŠM un no tā izgatavoto plātņu materiālu skaņas absorbcijas īpašību izpētei (Strazdiņš, 2011). Pētījumā izmantoti gan abpusēji aplīmēti (ar 4 mm biezu bērza saplāksni vai augstam blīvuma kokšķiedru plātņi), gan neaplīmēti 25 un 60 mm biezi priedes KŠM paraugi. Kā materiālu skaņu absorbēšanas spēju raksturojošais rādītājs noteikts skaņas absorbcijas koeficients α saskaņā ar standarta LVS EN ISO 354 metodiku.

Minētajā pētījumā iegūtie rādītāji salīdzināti ar standartos LVS EN ISO 354 un LVS EN ISO 11654 izvirzītajām prasībām skaņas absorbējošiem materiāliem un būvniecībā plaši izmantoto koksnes plātņu materiālu skaņas absorbcijas rādītājiem. Darbā noskaidrots, ka visaugstākie skaņas absorbcijas koeficienta rādītāji visās frekvencēs, izņemot 250 Hz, ir iegūti neaplīmētam KŠM. Iegūtās skaņas absorbcijas koeficientu vērtības abiem paraugu biezumiem skaņas frekvenču diapazonā no 250 līdz 4000 Hz ir aptuveni robežās no 0.18 (60 mm bieziem paraugiem pie frekvences 250 Hz) līdz pat 0.67 (25 mm bieziem paraugiem pie skaņas frekvences 2000 Hz). Iegūtie skaņas absorbcijas rādītāji ļauj materiālu klasificēt kā D klases skaņu absorbējošu materiālu ar zemu skaņas absorbcijas spēju saskaņā ar standartu LVS EN ISO 11654:2000. Analizējot pētījumā iegūtos datus, var secināt, ka KŠM biezuma palielināšana būtiski neietekmē skaņas absorbcijas koeficientu un skaņas absorbcijas klasi (Strazdiņš, 2011).

KŠM aplīmēšana ar bērza saplāksni ievērojami samazina materiāla skaņas absorbēšanas spējas, kā rezultātā šāds materiāls klasificējams zemākā E klasē, savukārt KŠM aplīmēšanā izmantojot tāda paša biezuma, augsta blīvuma kokšķiedru plātnes, iegūtie rādītāji ir zemāki, un materiāls neizpilda minimālās skaņu absorbējošiem materiāliem izvirzītās prasības (Strazdiņš, 2011).

Saskaņā ar Strazdiņu neviens no pārbaudēs izmantotajiem koksnes plātņu materiāliem (kokskaidu plātne; OSB; PW) ar biezumu no 12 līdz 24 mm nav klasificējams kā skaņu absorbējošs materiāls (Strazdiņš, 2011).

Kūms savā maģistra darbā apskatījis KŠM ūdens tvaika pārvades raksturlielumus un no tā izgatavoto sienas panelu kondensācijas risku (Kūms, 2015). Pētījumam izmantoti 3 KŠM paraugi materiāla paralēlajā virzienā. Parauga kopējais biezums ir 50 mm, kas veidojas, savstarpēji kopā salīmējot 2 lameles ar biezumu 25 mm. Minēto KŠM abpusēji aplīmējot ar 25 mm biezu priedes masīvkoksnes kārtu, ir veidots sienas panelis ar kopējo biezumu 100 mm. Kondensācijas riska analīze veikta diviem sienu veidiem: 1) sienas panelim, papildinātam ar 150 mm biezu putupolistirolu un 5 mm polimērapmetumu; 2) sienas panelim, papildinātam ar 150 mm biezu minerālvati un 5 mm biezu polimērapmetumu.

Pētījuma secināts, ka KŠM paralēlā virzienā ūdens tvaika difūzijas pretestības koeficients ($\mu = 15.6$) būtiski atšķiras no masīvkoksnes parametriem ($\mu = 40$), kā arī KŠM ir raksturojams ar lielu ūdens tvaiku caurlaidību - līdzīgi kā māla, silikāta, gāzbetona un keramzīta būvblokiem (Kūms, 2015).

Maģistra darbā vienkāršotā veidā salīdzināti divu iepriekš minēto sienas paneļu konstrukciju kondensācijas risks, ņemot par pamatu LBN 002-01 25. punkta prasību, kura nosaka, ka būvelementam, tā savienojumiem un montāžas šuvēm, kas sastāv no dažādiem slāņiem, tā siltajā pusē esošo slāņu kopējam ūdens tvaika pretestības gaisa difūzijas ekvivalentam S_d ir jābūt vismaz piecas reizes lielākam par aukstajai pusei piegulošo slāņu kopējo ūdens tvaika pretestības gaisa difūzijas ekvivalentu S_d . Darbā (Kūms, 2015) secināts, ka, siltinot KŠM ārsienas prototipu ar minerālvati, tiek izpildīta LBN 002-01 25. punkta prasība, savukārt paneļa siltināšanai izmantojot putupolistirolu, pastāv kondensāta veidošanās risks, jo būvnormatīva prasība netiek izpildīta. Veiktais aprēķins pierādījis to, ka ārsienas konstrukcijas siltināšanas rezultātā, no ārpuses izvēloties siltumizolācijas materiālu ar augstāku ūdens tvaika difūzijas pretestības koeficientu nekā materiāliem konstrukcijas siltajā pusē, pastāv kondensāta veidošanās risks. Šī sakarība minēta arī literatūrā (Borodīņecs un Krēsliņš, 2007).

Jāpiemin, ka Kūma veiktajā pētījumā apskatīti tikai KŠM paralēlā virziena paraugi, kuri izgatavoti no divām lamelēm. Otrā atšķirīgā (perpendikulārā) virziena rādītāji netika noteikti, kā arī netika apskatīta materiālu kārtu skaits un biezuma ietekme uz ūdens tvaika pārvades raksturlielumiem. Tas ir būtiski, jo KŠM izgatavošanā tiek izmantotas dažāda biezuma lameles un materiāls var tikt veidots ar atšķirīgu lameļu skaitu KŠM bloka augstumā.

KŠM pasaules tirgū ir jauns produkts, tā ugunsdrošības īpašības līdz 2010. gadam nebija pētītas. Vienlaicīgi ar promocijas darba izstrādi ESF projekta „Inovātīvu pašnesošu paneļu un būvelementu izstrāde no šūnveida koksnes materiāla” ietvaros ir veikts pētījums par priedes KŠM ugunsdrošību un tās uzlabošanas iespējām. Pētījuma mērķis bija novērtēt KŠM ugunsreakcijas parametrus un to uzlabošanas iespējas - izmantošanai durvju izgatavošanā. Tika noteikti KŠM perpendikulārā virziena ugunsreakcijas parametri. Plaši analizēta dažādu antipirēnu un konstruktīvo risinājumu ietekme uz maza izmēra 100 mm gariem un 100 mm platiem KŠM paraugiem saskaņā ar standarta LVS ISO 5660-1 pārbaudes metodiku. Vairāku durvju prototipu ugunsreakcijas parametru indikatīvie testi veikti vienotās dedzināšanas iekārtās saskaņā ar standartu LVS EN 13823. Analizējot iegūtos rādītājus, iespējams secināt, ka pētījumā izmantotie antipirēni samazina KŠM maksimālo degšanas jaudu uz pusi. Antipirēnu savstarpējā atšķirības ietekme uz maksimālo degšanas jaudu nepārsniedz 30 %. Antipirēna izmantošana kavē uguns izplatību KŠM degšanas sākuma fāzē, tomēr materiāls saglabā degtspēju. Saistībā ar to, ka materiāls ir veidots no 3 līdz 4 mm plānām koksnes kārtām, apstrāde ar iemērksšanas paņēmieni ļauj to pilnībā impregnēt visā šķēsgriezumā. Masīvkoksnes gadījumā tiek impregnēta vienīgi koksnes ārējā kārta. Pētījumā analizēta gaisa piekļuves ietekme uz KŠM degšanas jaudas dinamiku, kā rezultātā ir gūti šādi secinājumi - no vienas materiāla puses ierobežojot gaisa pievadi impregnētam KŠM perpendikulārā virzienā, būtiski neatšķiras degšanas jaudas dinamika degšanas sākuma fāzē. Degšanai turpinoties, neventilētam paraugam degšanas jauda samazinās, savukārt paraugam ar papildu gaisa pievadi degšanas jauda pakāpeniski palielinās (Bukšāns u.c., 2013).

Ņemot vērā paraugu izmēra būtisko ietekmi uz koksnes materiālu ugunsreakcijas parametriem, līdztekus maza izmēra paraudziņiem atsevišķiem prototipiem vienotās dedzināšanas iekārtā ir pārbaudīti arī liela izmēra paraugi. Efektīvākais konstruktīvais risinājums ugunsreakcijas parametru uzlabošanai izrādījās materiāla aplīmēšana ar nedegošu neorganisku magnezīta plātni vai apmešana ar māla javu. Tika iegūtas ugunsgrēka attīstības ātruma indeksa vērtības FIGRA 6 un 16 W s^{-1} , kā arī tām atbilstošās kopējā siltuma izdalīšanās 600 s laikā vērtības THR₆₀₀ 0.2 un 2.0 MJ. Aplīmējot materiālu paralēlā virzienā ar vidēja blīvuma kokšķiedru plātni vai priedes masīvkoksni, ugunsreakcijas parametri ir ievērojami augstāki. Kā visatbilstošākais risinājums durvju izgatavošanai no KŠM

perpendikulārā virzienā tiek minēta gaisa spraugu aizvilkšana ar antipirēna, ūdens un skaidu maisījumu, papildus virsmu aplīmējot ar ugunsdrošu laminātu. Ugunsgrēka attīstības ātruma indekss šādam prototipam ir 63 W s^{-1} , un kopējā izdalītā siltuma daudzums 600 s laikā veido 9 MJ. Pētījuma rezultāti apkopoti publikācijā (Bukšāns u.c., 2013) un maģistra darbā (Rudzītis, 2013). Minētie pētījumi veikti tikai KŠM perpendikulārā virzienā, materiālu aplīmējot ar termiski plāniem neorganiskiem vai organiskiem materiāliem. Papildus veiktajam pētījumam ir jānoskaidro KŠM abu virzienu ugunsreakcijas parametri, ar mērķi klasificēt materiālu kādā no ugunsreakcijas klasēm, tāpat jāizpēta KŠM aplīmēšanas ar termiski biezu materiālu ietekme uz KŠM ugunsreakcijas parametriem, kā arī jānovērtē KŠM biezuma ietekme uz trīs kārtu materiāla ugunsreakcijas parametriem.

Pētījumus par KŠM fizikāli mehāniskajām īpašībām promocijas darba autors ir veicis, vadot Ing. Edija Ješauska diplomdarbu un Mr.sc.ing. Viļņa Jakovļeva maģistra darbu. Kopīgi ņemta dalība vairākos pētniecības projektos, veikti pētījumi un iesniegtas publikācijas par KŠM rukšanas un briešanas rādītājiem, apskatītas KŠM aplīmēšanas iespējas ar dažādiem koksnes materiāliem, novērtēti skrūvju izraušanas pretestību ietekmējošie faktori un ģeometrisko izmēru ietekme uz KŠM mehāniskajām īpašībām. Minēto pētījumu galvenie rezultāti atspoguļoti trijās promocijas darba autora publikācijās (Iejavs un Jakovļevs, 2012; Iejavs u.c. 2013; Iejavs un Ješauskis, 2014).

1.6. Nodaļas secinājumi

1. Koksne un no tās izgatavotie materiāli ir higroskopiski un anizotropiski - to īpašības un īpašību ietekmējošie faktori ir jāņem vērā pie jaunu koksnes produktu izstrādes un īpašību modelēšanas.
2. KŠM pēc savas uzbūves un izgatavošanas tehnoloģijas ir unikāls koksnes materiāls, kuram nav analoga visā pasaulē. Izmantojot tikai divus materiālus (koksni un līmi), jaunas, inovatīvas koksnes apstrādes operācijas un līmēšanas tehnoloģiju, tiek iegūts no klasiskajiem koksnes materiāliem kardināli atšķirīgs izejmateriāls, jaunu produktu un izstrādājumu izgatavošanai.
3. Nevienš no iepriekš veiktajiem pētījumiem neatklāj visaptverošu informāciju par neaplīmēta KŠM īpašībām un tās ietekmējošiem faktoriem. Lielākajā daļā pētījumu apskatīts tikai viens no abiem atšķirīgajiem materiāla virzieniem, visbiežāk aplūkojot atsevišķi kādu no materiāla fizikālajām, mehāniskajām vai fizikāli-ķīmiskajām īpašībām.
4. KŠM un tā izstrādājumu īpašību noteikšanai rekomendējams izmantot citu, pēc pielietojuma, līdzīgu materiālu standartizētās pārbaudes metodes. Tādējādi iegūtie rādītāji novērtējami un salīdzināmi citu materiālu rādītājiem un būvnormatīvu prasībām.
5. Materiālu konstruktīvās uzlabošanas efektivitāte ir pierādīta gan krustām līmēto konstrukciju kokmateriālu, gan KŠM mēbeļu plātņu gadījumā, tādēļ KŠM īpašību uzlabošanai lietderīgi ir izmantot konstruktīvās uzlabošanas paņēmieni, materiālu aplīmējot vai papildinot ar koksnes un citiem materiāliem.

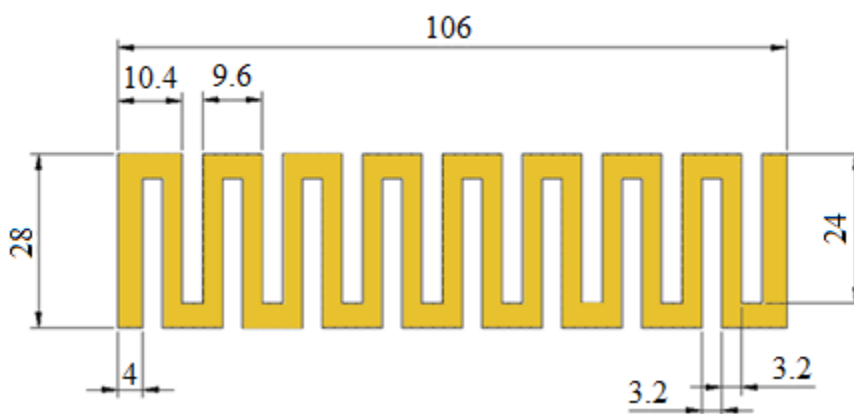
2. PĒTĪJUMU VISPĀRĒJĀ METODIKA

2.1. Koksnes šūnveida materiāla izgatavošanas tehnoloģija

Pētījumam paredzēto KŠM izgatavošanai izmantoti priedes (*Pinus Sylvestris* L.) zāģmateriāli. To nominālie izmēri: biezums 32 mm, platums 112 mm un garums 4200 mm. KŠM izgatavošana veikta rūpnieciski, automatizētā ražošanas līnijā, uzņēmumā SIA „Dendrolight Latvija”. No zāģmateriāliem izzāģēti trupējuši, daļēji saauguši zari, metāla ieslēgumi un plaisas. Pēc defektu izzāģēšanas veikta zāģmateriālu līmēšana garumā. Zāģmateriāli līmēti garumā, izmantojot ķīļtapu savienojumu, ko raksturo šādi parametri: ķīļtapas garums 11 mm, tapas solis 4 mm un pielaide tapu galos 1 mm. Pie ķīļtapu savienojuma līmēšanas piecas sekundes nodrošināts gala spiediens 12 MPa. Salīmējamo sagatavju vidējais mitrums ir 12 %. Sagatavju līmēšanai garumā un šūnveida materiāla bloku līmēšanas procesos izmantota vienkomenta D3 grupas ūdens bāzes polivinilacetāta (PVA) līme *Cascol* 3353. Saistībā ar karsto līmēšanas tehnoloģiju un specializēto līmes uzklāšanas iekārtu citu līmju izmantošana rūpnieciskai KŠM ražošanai nav iespējama. Līme izmantojama koksnes līmēšanai ar mitrumu no 5 līdz 15 %. Optimālais līmes patēriņš ir robežās no 60 līdz 200 g m⁻². Atvērtais izturēšanas laiks 5 un slēgtais izturēšanas laiks 8 minūtes. Optimālais presēšanas spiediens līmēšanai plaknē 0.1 līdz 1.0 MPa un ķīļtapu līmēšanai 15 MPa. Presēšanas laiks plaknē no 30 līdz 60 min. un ķīļtapām no 2 līdz 6 s. Viskozitāte pēc Brukfilda ir 8000 m Pa s. Līmes blīvums 1080 kg m⁻³ un pH skaitlis 2.5 līdz 3.5.

Ķīļtapu savienojumi redzami sagatavju platajā skaldnē. Lai nodrošinātu nepieciešamo kvalitāti un nemainīgu koksnes mitrumu visos šūnveida materiāla izgatavošanas procesa posmos, ražotnē tiek nodrošināts telpu mikroklimats 65±5 % relatīvā mitruma un 20±3 °C temperatūra. Pēc ķīļtapu savienojumu līmes sacietēšanas veikta garumā saudzēto sagatavju garenfrēzēšana, izmantojot četrpusīgo garenfrēzmašīnu, iegūstot sagataves ar nominālajiem šķērsriezuma izmēriem - biezumu 28 mm, platumu 106 mm un garumu 2010 mm.

Pēc sagatavju garenfrēzēšanas abpusēji pa sagatavju garumu iefrēzētas 8 rievas (skat. 2.1. att.). Iestrādāto rievu dziļums ir 24 mm, abpusējais rievu solis 6.4 mm, rievas platums 3.2 mm.



2.1. att. Priedes dēļa šķērsriezums ar iestrādātām rievām:

izmēri milimetros.

Šūnveida materiāla bloku līmēšana biezumā veikta, izmantojot nepārtrauktas darbības apsildāmo presi. Šūnveida materiāls saklāts četrās kārtās, katru nākamo kārtu orientējot attiecībā pret iepriekšējo 90° leņķi. Līme *Casco adhesive* 3353 saklātajām kārtām uznesta caur dīzi ar oscilācijas paņēmienu, nodrošinot vidējo līmes patēriņu no 200 līdz 300 g m⁻². Presēšanas cikla ilgums pie 60 līdz 75 °C un 0.2 MPa spiediena nodrošināts 6 minūtes. Iegūtā šūnveida materiāla bloku izmēri: biezums 112 mm, platums 1350 mm un garums 2500 mm.

Par pamatu pētījumos izmantots KŠM, kas izgatavots no 28 mm bieziem priedes dēļiem, savukārt lai novērtētu izejmateriāla biezuma ietekmi uz atsevišķām KŠM fizikālajām, fizikāli ķīmiskajām un mehāniskajām īpašībām, papildus izgatavots KŠM no dēļiem ar biezumu 18 vai 25 mm. Gadījumā, ja pētījumā izmantotā KŠM dēļu biezums atšķiras no 28 mm, tas minēts attiecīgajā „Materiāli un metodes” nodaļā.

Saskaņā ar saistītajiem pētījumiem ātraudzīgo plantāciju koku sugu eikalipta (*Eucalyptus grandis* W. Hill) un radiata priedes (*Pinus radiata* D. Don) izmantošana KŠM materiāla un tā paneļu ražošanai var tikt izskatīta kā alternatīva priedes (*Pinus sylvestris* L.) koksnes izmantošanai gan balstoties uz šo izejmateriālu mehāniskajām īpašībām, gan salīmēšanas iespējām (Iejavs u.c., 2021; Iejavs u.c., 2022).

2.2. Materiāla izvēle, paraugu pārbaudes un aprēķinu metodes

Promocijas darbā apkopoti vairāki KŠM īpašību pētījumi ar noteiktiem mērķiem. Konkrētu mērķu sasniegšanai izgatavoti atbilstoši paraugi, izstrādātas KŠM pārbaudēm piemērotas pārbaudes metodes, kas aprakstītas katras pētījuma nodaļas sākumā.

KŠM īpašību pētījumiem izmantots rūpnieciski un saskaņā ar 2.1. nodaļā aplūkoto tehnoloģiju ražots KŠM, kā izejmateriālu izmantojot 28 mm biezas lameles (atsevišķos gadījumos 18 un 25 mm biezas lameles), ko sazāgē vai salīmē pētījumiem nepieciešamajos izmēros. KŠM trīs kārtu plātņu paraugu un paneļu prototipu izgatavošanā izmantoti dažādi koksnes materiāli ar attiecīgajās nodaļās norādītajām izgatavošanas tehnoloģijām.

Veikts pētījums ar mērķi novērtēt KŠM mitrumu atkarībā no gaisa relatīvā mitruma (plānotajās ekspluatācijas mitruma robežās). Novērtēšana veikta pie konstantas gaisa temperatūras. KŠM mitruma novērtēšanai izmantota svēršanas-žāvēšanas metode saskaņā ar standarta LVS EN 13183-1 metodiku. Pētījumā izmantotas 4 paraugu grupas ar kopējo paraugu skaitu 120 gab.

Pētījums ir veikts ar mērķi novērtēt KŠM blīvumu atkarībā no gaisa relatīvā mitruma un KŠM mitruma, pie konstantas gaisa temperatūras. Blīvums noteikts, attiecinot paraugu masu pret tilpumu. Blīvuma aprēķināšana veikta saskaņā ar standarta ISO 3131 7.1. punkta metodiku. Paraugu izturēšanai pie dažādiem gaisa relatīvā mitruma līmeņiem izgatavotas 4 paraugu grupas ar kopējo paraugu skaitu 120 gab.

Novērtēti KŠM rukšanas un briešanas rādītāji atkarībā no gaisa relatīvā mitruma pie konstantas gaisa temperatūras. Rukšanas un briešanas rādītāji izmantojami dažādu KŠM konstrukciju sēžu un pielaižu aprēķināšanai, kā arī jaunu produktu izstrādē, materiālu savstarpējās savienošanas novērtēšanai. Rukšanas un briešanas rādītāju aprēķināšanai izstrādāta pārbaudes metodika, kura balstīta uz standarta LVS EN 318 pārbaudes un standarta DIN 52184 aprēķinu metodiku. Katram no 3 KŠM virzieniem izgatavoti 20 paraugi izturēšanai pie 3 dažādiem gaisa relatīvā mitruma līmeņiem. Kopējais pārbaudēm pakļauto paraugu skaits 60 gab.

Veiktas pārbaudes ar mērķi noteikt KŠM ūdens tvaika pārvades raksturlielumus un novērtēt lameļu biezuma un salīmēto kārtu skaita ietekmi uz materiāla ūdens tvaika pārvades raksturlielumiem. Ūdens tvaika pārvades raksturlielumi izmantojami būvkonstrukciju kondensācijas riska novērtēšanai. Rādītāji noteikti saskaņā ar standarta LVS EN 12086 metodiku 6 paraugu grupām ar kopējo paraugu skaitu 18 gab.

Lai novērtētu KŠM kā siltumizolācijas materiālu, būvkonstrukciju izgatavošanai un dažādu konstrukciju siltumpretestības aprēķināšanai noteikti materiāla siltumvadītspējas koeficienti saskaņā ar standarta LVS EN 12667 pārbaudes metodiku. Kopā pārbaudīti 4 paraugi, pa 2 materiāla paralēlajam un perpendikulārajam virzienam.

KŠM klasificēšanai ugunsreakcijas klasē un ugunsreakcijas parametru novērtēšanai izgatavoti 6 lielizmēra paraugi pa 3 paraugiem materiāla paralēlajam un perpendikulārajam virzienam. Pārbaude veikta vienotās dedzināšanas iekārtā saskaņā ar standarta LVS EN 13823

D ugunsreakcijas klasei atbilstošo pārbaudes metodiku. Papildus izgatavoti un pārbaudīti 9 maza izmēra paraugi pārbaudei ar atsevišķa liesmas avota testu saskaņā ar standarta LVS EN ISO 11925-2 pārbaudes metodiku.

Veikti vairāki pētījumi, lai noteiktu KŠM nozīmīgākās mehāniskās īpašības un novērtētu to ietekmējošos faktorus.

Izmantojot 16 paraugu grupas, kā arī standartu LVS EN 408+A1:2012 un ASTM C 273-00 pārbaudžu metodes 132 paraugiem materiāla paralēlā un perpendikulārā virzienā, ir noteikti robežstiprības un elastības moduļu rādītāji liecē, spiedē, stiepē un bīdē. Projektēšanas vajadzībām un mehānisko rādītāju salīdzināšanai ar citu materiālu mehāniskajiem rādītājiem aprēķinātas 5 % kvantiļa raksturlielumu vērtības saskaņā ar standartu LVS EN 14358. Paplašinot iepriekš minēto pētījumu metodiku, tika novērtēta KŠM ģeometrisko izmēru ietekme uz mehāniskajiem rādītājiem materiāla paralēlajā virzienā. Pētījumā izmantotas 23 paraugu grupas ar kopējo paraugu skaitu 150 gab.

Koksnes materiālu un izstrādājumu savstarpējai savienošanai visplašāk tiek izmantoti divi paņēmieni - izmantojot mehāniskos stiprinājumus jeb skrūves un fizikālo jeb salīmēšanas paņēmieni. Šī iemesla dēļ pētījums ir veikts ar mērķi novērtēt mehānisko stiprinājumu jeb skrūvju noturību KŠM. Papildus noteiktajiem rādītājiem analizēti skrūvju noturību ietekmējošie faktori. Eksperimentālā pētījuma metodika balstīta uz modificētu standarta LVS EN 320 pārbaudes metodiku. Pārbaudei izgatavotas 10 paraugu grupas ar kopējo paraugu skaitu 180 gab. Inženiertehnisko aprēķinu veikšanai atsevišķu paraugu grupu rādītājiem aprēķinātas skrūvju izraušanas pretestības raksturlielumu vērtības saskaņā ar standarta LVS EN 14358 metodiku.

Jaunu koksnes kompozītmateriālu un izstrādājumu veidošanai veikts pētījums par KŠM un citu koksnes materiālu līmēto savienojumu stiprību. Pētījumā izmantotas poliuretāna un emulsipolimērizocianāta līmes, kā arī seši dažādi koksnes materiāli (osis, priede, bērza saplāksnis, termomehāniski modificēts baltalksnis, orientēto kokskaidu plātne un kokšķiedru plātne). Pārbaudītas 12 paraugu grupas ar kopējo paraugu skaitu 158 gab. - saskaņā ar standarta LVS EN 319 metodiku.

KŠM tiek veidots, salīmējot kopā vairākas koksnes kārtas, tādēļ novērtēta līmētā savienojuma mehāniskā izturība. Pārbaude veikta, līmes šuvi slogojot bīdē pēc standartā LVS EN 392 noteiktā pārbaudes principa. Pārbaudēm pakļauti 30 līmētie savienojumi, kuru stiprības rādītāji salīdzināti ar 90 KŠM rādītājiem, kas noteikti, slogojot materiālu trīs dažādās zonās.

Noskaidrots, ka lielākā daļa KŠM īpašību ir ar zemākiem rādītājiem nekā plātņu materiāliem, masīvkoksnei un būvniecības paneļiem, tādēļ KŠM izmantošanai būvniecībā ir pētītas KŠM konstruktīvās uzlabošanas iespējas.

Izstrādātas piecas dažādas KŠM sienu paneļu konstrukcijas, kurām veikti teorētiski aprēķināti siltuma caurlaidības koeficientu noteikšanai saskaņā ar standarta LVS EN ISO 6946 metodiku. Iegūtie rādītāji salīdzināti ar krustām līmēto kokmateriālu un konstruktīvi izolēto paneļu siltuma caurlaidības koeficientiem un būvnormatīva LBN 002-01 prasībām.

Izstrādāti divi durvju vērtņu konstruktīvie risinājumi un trīs sienu paneļu konstruktīvie risinājumi, kuriem veikta lielizmēra paraugu izgatavošana un skaņas gaisā izolācijas indeksu novērtēšana saskaņā ar standartu LVS EN ISO 140-3, LVS EN ISO 140-1, LVS EN ISO 717-1 un standartu LVS EN ISO 10140-(1-5) metodiku. Novērtēta durvju paneļa biezuma un sienu paneļu konstruktīvā risinājuma ietekme uz skaņas gaisā izolācijas indeksu. Iegūtie rādītāji salīdzināti ar būvnormatīva reglamentētajām durvju un sienu konstrukciju skaņas gaisā izolācijas indeksu robežvērtībām.

Ar mērķi noteikt KŠM ugunsreakcijas rādītāju uzlabošanas iespējas, īstenojot konstruktīvus paņēmienus, ir izgatavoti un pārbaudīti trīs KŠM prototipi. Divi veidoti, KŠM perpendikulārā virzienā aplīmējot ar termiski plānu (4 mm) augsta blīvuma kokšķiedru plātņi, tie paredzēti izmantošanai kā vieglas konstrukcijas norobežojošās starpsienas vai durvis. Savukārt trešajam prototipam KŠM paralēlā virzienā aplīmēts ar 18 mm biezu priedes

masīvkoksni - izmantošanai nesošās sienu un pārsegumu paneļu konstrukcijās. Novērtēta termiski plāna un bieza materiāla ietekme uz potenciālā būvniecības paneļu ugunsreakcijas parametriem. Visu trīs paneļu prototipu ugunsreakcijas pārbaudes veiktas, izmantojot D ugunsreakcijas klasei atbilstošo standarta LVS EN 13823 vienotās dedzināšanas iekārtas (SBI) pārbaudes metodi. Kopumā 3 prototipiem pārbaudīti 5 paraugi.

Lai noteiktu KŠM uzlabošanas iespējas ar konstruktīvajiem paņēmieniem, ir izstrādāti seši pārsegumu paneļu prototipi. Ir novērtēta ārējo kārtu materiāla, KŠM virziena un ielīmēto „ribu” ietekme uz 3 materiāla mehāniskajām īpašībām: robežstiprību, elastības moduli liecē un robežstiprību spiedē. Pētījumā izmantotas standarta LVS EN 408+A1 pārbaudes metodes. Analizētas 18 paraugu grupas ar kopējo paraugu skaitu 144 gab. Iegūtie rādītāji salīdzināti ar līmēto konstrukciju kokmateriālu un krustām līmēto kokmateriālu paneļu mehāniskajiem rādītājiem.

Eksperimentālie pētījumi veikti saskaņā ar standartu metodēm. Ņemot vērā atsevišķu lielizmēra paraugu augstās izgatavošanas un pārbaudes izmaksas, daļā pētījumu izmantotas maza apjoma paraugu kopas ar paraugu skaitu no 1 līdz 3. Atsevišķos gadījumos ieviestas atkāpes no standartu prasībām - specifisko pētījumu mērķu sasniegšanai.

2.3. Datu statistiskās apstrādes metodes

Datu statistiskā apstrāde veikta, izmantojot datorprogrammas *SPSS 13.0.* un *MS Excel 2010*, kuru praktiskās izmantošanas iespējas analizējušas profesores Arhipova un Bāliņa (Arhipova un Bāliņa, 2006).

Atkarībā no pārbaudes mērķa un nosakāmās īpašības paraugu kopām ar paraugu skaitu lielāku par 1, ir noteikti visi vai daļa no šādiem aprakstošās statistikas rādītājiem: vidējā aritmētiskā vērtība $\bar{x}_{vid}$, standartnovirze *SD*, variācijas koeficients *VAR* un vidējās vērtības ticamības intervāls *CON*.

Gadījumos, kad paraugkopas dati atbilst normālajam sadalījumam, salīdzināmo paraugkopu rādītāji ir kvantitatīvi un paraugu skaits ir lielāks par 10, divu nesaistītu paraugkopu vidējās vērtības salīdzinātas, izmantojot Stjūdenta (*Student's*) *t*-testu ar *p*-vērtības pieeju, pie 95 % ticamības līmeņa.

Pāru korelācijas un regresijas analīzes izmantotas ar mērķi noteikt sakarības, kas veidojas starp faktoriālo un rezultātīvo pazīmi, kā arī sakarības ciešumu. Ja sakarība starp pazīmēm ir lineāra, t.i., faktoriālās pazīmēs izmaiņām atbilst proporcionāli vienādas rezultātīvās pazīmes izmaiņas, tad šīs sakarības ciešumu nosaka lineārā korelācija. Ja sakarība nav lineāra, to var aprakstīt ar eksponenciālām, logaritmiskām vai polinomiālām sakarībām. Sakarība ar augstāko determinācijas koeficientu precīzāk apraksta pastāvošo sakarību. Pēc korelācijas koeficienta novērtēšanas tiek veikta regresijas analīze, lai iegūtu vienādojumu, pēc kura var prognozēt, kā mainās rezultātīvā pazīme, izmainoties faktoriālajai pazīmei.

Projektēšanas un mehānisko rādītāju salīdzināšanas vajadzībām daļai KŠM mehānisko rādītāju aprēķinātas zemākās 5 % kvantiļa raksturlielumu vērtības saskaņā ar standarta LVS EN 14358 metodiku. Zemākā 5 % kvantiļa raksturlieluma vērtība tiek definēta kā rādītāju izkliedes zemākā robeža ar 95 % ticamības līmeni.

Gadījumos, kad paraugkopas paraugu skaits ir mazāks par 10, paraugkopu vidējo vērtību salīdzināšanai izmantots vidējās vērtības 95 % ticamības intervāls. Ja vidējās vērtības ticamības intervāls salīdzinātajām paraugkopām nepārklājas, darbā pieņemts, ka paraugkopu vidējie rādītāji atšķiras būtiski. Ja vidējo vērtību ticamības intervāli pārklājas, pieņemts, ka paraugkopu vidējie rādītāji būtiski neatšķiras. Ja maza apjoma paraugkopu vidējie rādītāji jāsalīdzina ar literatūrā doto rādītāju vidējām vērtībām, kam nav zināmi aprakstošās statistikas rādītāji, salīdzināšana notiek, attiecinot vidējos rādītājus vienu pret otru, bet atšķirību izsakot reizēs vai procentos.

3. KOKSNES ŠŪNVEIDA MATERIĀLA ĪPAŠĪBAS

3.1. Materiāli un metodes fizikālo īpašību noteikšanai

3.1.1. Mitrums

KŠM mitruma noteikšanai izmantota standarta LVS EN 13183-1 metodika, kurā mitruma noteikšanai tiek izmantots svēršanas un žāvēšanas paņēmieni. Pārbaudei no KŠM bloka izgatavoti kvadrātveida paraugi ar malas garumu 112 mm, kas ir vienāds ar KŠM bloka biezumu. Pēc uzbūves KŠM sastāv aptuveni no 96 % koksnes un 4 % līmes, kas atsevišķos gadījumos var ietekmēt materiāla mitrumu. Minētajā pārbaudē izmantotais KŠM izgatavots, izmantojot polivinilacetāta līmi, kopā salīmējot četras koksnes kārtas. Mitruma noteikšanai pārbaudīti 60 kubveida KŠM paraugi pēc kondicionēšanas standarta atmosfērā (relatīvais gaisa mitrums 65 ± 5 % un gaisa temperatūra 20 ± 2 °C). Līdztekus šiem paraugiem izmantojot 3.2.3. nodaļā noteiktos 60 KŠM paraugu mitruma rādītājus, kas izturēti atbilstošos gaisa relatīvā mitruma apstākļos 30, 65 un 85 %, iespējams noteikt sakarību starp relatīvo gaisa mitrumu un atbilstošu koksnes līdzsvara mitrumu pie vienas un tās pašas 20 ± 2 °C temperatūras.

3.1.2. Blīvums

KŠM blīvuma noteikšana veikta, attiecinot KŠM masu pret tilpumu. Blīvuma aprēķināšana veikta saskaņā ar standarta ISO 3131 7.1. punkta blīvuma aprēķina metodiku. KŠM blīvumu var ietekmēt vairāki faktori, bet svarīgākie no tiem ir koku suga, tās blīvums un mitrums, kā arī salīmēto lameļu un to iezāģējumu ģeometriskie izmēri. Pārbaudei pakļauti 60 KŠM kubveida blīvuma paraugi. To izmērs visos virzienos ir 112 mm, kas ir vienāds ar KŠM bloka biezumu. Pārbaudes veiktas pēc paraugu kondicionēšanas standarta atmosfērā pie relatīvā gaisa mitruma 65 ± 5 % un gaisa temperatūras 20 ± 2 °C.

Izmantojot 3.2.3. nodaļā noteiktos 60 KŠM masas un izmēru rādītājus paraugiem ar nominālajiem izmēriem - platumu, garumu 56 mm un biezumu 300 mm, kā arī izmantojot iepriekš minēto metodiku, pie noteikta gaisa relatīvā mitruma līmeņa 35, 65 un 85 % ir noteikta sakarība, kas veidojas starp relatīvo gaisa mitrumu un KŠM blīvumu pie 20 ± 2 °C temperatūras. Minētajiem paraugiem noteikta arī sakarība, kas veidojas starp KŠM mitrumu un blīvumu.

3.1.3. Rukšana un briešana

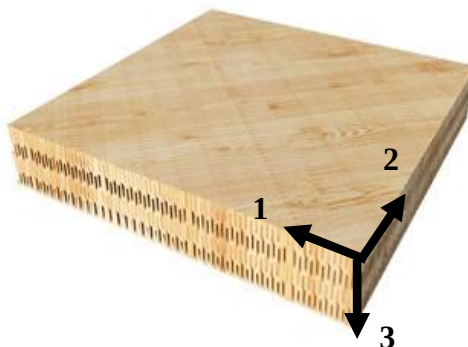
Koksnei un tās materiāliem palielinoties vai samazinoties mitrumam piemīt īpašība mainīt dimensijas jeb uzbriest un/vai sarukt. Koksnes un koksnes materiālu rukšana un briešana ir svarīgs faktors, kas jāņem vērā, izstrādājot jaunus materiālus, mehāniski savienojot vai līmējot kopā materiālu ar dažādām fizikālajām un mehāniskajām īpašībām. Koksnes mitrumu galvenokārt nosaka gaisa temperatūra un gaisa relatīvais mitrums vietā, kurā minētie materiāli tiek izmantoti. Palielinoties gaisa relatīvajam mitrumam, koksnes mitrums pakāpeniski palielinās, samazinoties - samazinās. Ilgāku laiku uzglabājot koksnes materiālus pie konstanta gaisa relatīvā mitruma un temperatūras, koksne ieņem tās līdzsvara mitrumu, attiecīgi rukšanas vai briešanas process tiek apturēts, līdz brīdim, kamēr tiek izmainīti apkārtējās vides parametri. Koksnes rukšanu izraisa koksnes mitruma samazinājums koksnes šūnās, savukārt mitruma palielināšanās koksnes šūnās izraisa koksnes briešanu. Koksnes rukšana un briešana notiek pie koksnes mitruma no 0 (absolūti sausā stāvokļa) līdz aptuveni

30 % (pie kokšķiedru piesātinājuma punkta). Klasiski koksnes rukšanas koeficientu %⁻¹ aprēķina pēc šādas sakarības (Kokins un Staprāns, 1984)

$$k_r = \frac{\Delta I}{D_m} \cdot 100, \quad (3.1.)$$

kur: ΔI - koksnes izmēru izmaiņas, mainoties koksnes mitrumam no šķiedru piesātinājuma mitruma (~30 %) līdz absolūti sausam stāvoklim 0 % pēc koksnes žāvēšanas;
 D_m - koksnes izmērs pie kokšķiedru piesātinājuma mitruma (~30 %).

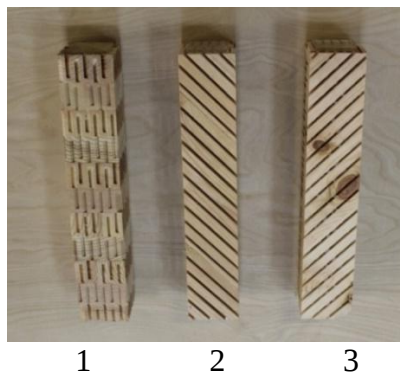
Briešanas koeficienta k_b aprēķināšanai iespējams izmantot 3.1. formulu, aizstājot koksnes izmēru pie kokšķiedru piesātinājuma punkta D_m ar koksnes izmēru absolūti sausā stāvoklī D_0 . Inovatīvais šūnveida materiāls ir unikāls ar to, ka saklātās masīvkoka kārtas divos šūnveida materiāla virzienos orientētas viena pret otru 90° grādu leņķī un attiecībā pret šūnveida materiāla ražošanas virzienu 45° grādu leņķī, tādējādi šūnveida materiāla garuma un platuma rukšanas un briešanas parametrus nosaka koksnes garenvirziena izmaiņu komponente. Savukārt šūnveida materiāla augstumā rukšanas un briešanas koeficientus nosaka masīvkoksnes radiālā un tangenciālā virziena komponentes. Šūnveida materiāla virzieni parādīti 3.1. att.



3.1. att. **Koksnes šūnveida materiāla dimensijas¹:**

1 - garums (sakrīt ar KŠM līmēšanas preses padeves virzienu); 2 - platums (deviņdesmit grādu leņķī pret līmēšanas preses padeves virzienu); 3 – augstums (to nosaka saklāto kārtu biezumu summa).

No KŠM bloka visos trīs virzienos izzāgēti taisnstūra prizmas paraugi ar nominālajiem izmēriem 56 mm un garumu 300 mm. Katram materiāla virzienam pārbaudēm izgatavoti 20 paraugi. Paraugu galu nelīdzenumi un gropes novērstas materiāla galus aplīmējot stikla plāksnēm (skat. 3.2. att.).



3.2. att. **Paraugi izmēru izmaiņu noteikšanai:**

1 - augstumam; 2 - platumam; 3 - garumam.

¹ <http://dendrolight.lv/en/products/core-material/core/>, skatīts 01.06.2013

KŠM lineāro un tilpuma izmaiņu noteikšanas metodika balstīta uz standarta LVS EN 318 pārbaudes metodiku un standarta DIN 52184 aprēķinu metodiku.

Trīs dažādi paraugu izturēšanas apstākļi (attiecīgi: 30 ± 5 %, 20 ± 2 °C; 65 ± 5 %, 20 ± 2 °C un 85 ± 5 %, 20 ± 2 °C) tika izmantoti, lai novērtētu KŠM lineārās un tilpuma izmaiņas. Dimensiju un masas mērījumi tika veikti pēc tam, kad materiāls noteiktos izturēšanas apstākļos ieguvis nemainīgu masu. Pie minētajiem izturēšanas apstākļiem tiek nodrošināts KŠM mitrums robežās no 6 līdz 18 %. Paraugu lineārie izmēri noteikti ar digitālo indikatoru *Mahr 1082* un masa izmantojot svarus *Sartorius CP 3202S-OCE*. Minēto iekārtu izšķirtspēja attiecīgi 0.001 mm un 0.01 g.

Rukšanas vai briešanas koeficientu k_r vai k_b saskaņā ar standartu DIN 52184 aprēķina pēc šādas sakarības:

$$k = \frac{\Delta I}{\Delta W} \cdot D \cdot 100, \quad (3.2.)$$

kur: k - rukšanas k_r vai briešanas k_b koeficients, % %⁻¹

ΔI - vidējās izmēru izmaiņas, mainoties materiāla mitrumam no 18 līdz 6 %, mm;

ΔW - vidējās mitruma izmaiņas, mainoties materiāla mitrumam no 18 līdz 6 %, %;

D - vidējais izmērs pie materiāla mitruma 18 % (k_r aprēķināšanas gadījumā) vai izmērs pie materiāla mitruma 6 % (k_b aprēķināšanas gadījumā), mm.

KŠM uzbūve (izgatavošanā izmantota PVA līme) neļauj praktiski novērtēt materiāla rukšanas un briešanas rādītājus materiālam absolūti sausā stāvoklī un virs šķiedru piesātinājuma mitrumu. Materiālu izturot ūdenī vai žāvējot augstā temperatūrā, līmei šķīstot ūdenī vai kūstot, var būtiski tikt izmainīta materiāla uzbūve, tādēļ absolūtās lineārā un tilpuma rukšanas un briešanas vērtības iegūtas aprēķinu ceļā.

Izmantojot noteiktās KŠM vidējo izmēru vērtības, ir aprēķināta teorētiskā KŠM kubveida parauga, ar garumu, platumu un augstumu 300 mm, tilpuma V vērtība m³ pie noteikta gaisa relatīvā mitruma līmeņa pēc sakarības:

$$V = I_G \cdot I_P \cdot I_A, \quad (3.3.)$$

kur: I_G - vidējais izmērs materiāla garumā, m;

I_P - vidējais izmērs materiāla platumā, m;

I_A - vidējais izmērs materiāla augstumā, m.

Izmantojot iegūtās KŠM kubveida parauga teorētiskās vidējās tilpuma vērtības pie noteikta gaisa relatīvā mitruma līmeņa, aprēķina teorētisko vidējo tilpuma rukšanas koeficientu k_{rv} % %⁻¹ pēc modificētas 3.4. sakarības.

$$k_{rv} = \frac{\Delta V}{\Delta W} \cdot Dv \cdot 100, \quad (3.4.)$$

kur: ΔV - vidējā tilpuma izmaiņas, mainoties materiāla mitrumam no 18 līdz 6 %, m³;

ΔW - mitruma izmaiņas, mainoties materiāla mitrumam aptuveni no 18 līdz 6 %, %;

Dv - vidējais tilpums pie materiāla mitruma 18 % (k_{rv} koeficienta aprēķināšanas gadījumā), m³.

KŠM absolūto tilpuma rukumu R_{vr} % %⁻¹ aprēķina pēc sakarības 3.5. (Kokins un Staprāns, 1984).

$$R_{vr} = \frac{V_{28} - V_0}{V_0} \cdot 100, \quad (3.5.)$$

kur: V_{28} - maksimālais parauga tilpums pie šķiedru piesātinājuma mitruma 28 %, m³;

V_0 - parauga tilpums absolūti sausā stāvoklī, m³.

Pēc paraugu izturēšanas noteiktos apstākļos, izmēru un masas noteikšanas, paraugi pilnībā izžāvēti. Izmantojot iepriekš noteiktos paraugu izmēru un masas rādītājus pie katra no

izturēšanas apstākļiem un absolūti sausā stāvoklī aprēķināts paraugu mitrums. Paraugi žāvēti krāsnīnā *Memmert ULE500* un pēc žāvēšanas nosvērti izmantojot svarus *Sartorius CP 3202S-OCE*. Katram gaisa relatīvā mitruma līmenim atbilstošo koksnes mitrumu $W\%$ noteikts un aprēķināts saskaņā ar standartu LVS EN 13183-1 pēc sakarības:

$$W = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \cdot 100, \quad (3.6.)$$

kur: m_1 - paraugu masa pēc paraugu kondicionēšanas pie atbilstošā gaisa relatīvā mitruma līmeņa (30, 65 vai 85 %), g;

m_0 - parauga masa absolūti sausā stāvoklī, g.

3.1.4. Ūdens tvaika caurlaidība

Uzsākot pētījumus, veiktajā literatūras analīzē netika atrasta informācija par KŠM ūdens tvaika pārvades raksturlielumiem, tādēļ tika veiktas pārbaudes ar mērķi noteikt KŠM ūdens tvaika pārvades raksturlielumus. Materiālu ūdens tvaika pārvades raksturlielumu noskaidrošana dod iespēju veikt aprēķinus būvkonstrukciju kritiskā virsmas mitruma un iekšējās kondensācijas riska novērtēšanai.

KŠM ūdens tvaika pārvades raksturlielumi noteikti un aprēķināti saskaņā ar standarta LVS EN 12086 metodiku. Paraugi analizēti pēc A shēmas pie šādiem testēšanas apstākļiem - 23-0/50, kur gaisa temperatūra ir 23 ± 1 °C; sausais klimats ar relatīvo gaisa mitrumu RH 0 % un mitrais klimats ar relatīvo gaisa mitrumu RH 50 ± 3 %. Sausā klimata radīšanai izmantots CaCl_2 absorbents. Temperatūras un mitrā klimata nodrošināšanai izmantota kondicionēšanas telpa ar iekārtu *Emmerson S04OA*. Paraugu svēršanai izmantoti svari *Sartorius* ar svēršanas precizitāti 0.01 g.

Analizējot KŠM uzbūvi, varam secināt, ka materiāls perpendikulārā virzienā ir ar nenoslēgtu struktūru jeb caurejošiem kanāliem, kas izraisa netraucētu ūdens tvaika pārvadi pa materiāla biezumu. Pamatojoties uz šo informāciju, varam apgalvot, ka KŠM perpendikulārā virzienā ir ar augstu ūdens tvaika vadītspēju, kuru raksturo zems ūdens tvaika difūzijas pretestības koeficients. Minētā koeficienta vērtībai vajadzētu būt nedaudz augstākai par gaisa ūdens tvaika difūzijas pretestības koeficientu 1, jo laukums, caur kuru ūdens tvaiks var brīvi plūst cauri koksnes materiālam, ir samazināts.

KŠM paralēlā virzienā veido vairākas koksnes kārtas bez savstarpēji savienotiem kanāliem pa materiāla biezumu, tai pašā laikā ar necaurejošiem iezāģējumiem, kas būtiski samazina materiāla faktisko biezumu. Tādējādi iespējams prognozēt, ka KŠM paralēlā virziena ūdens tvaika difūzijas pretestības koeficients μ būs robežās no 1 (gaisam) līdz 50 (koksnei šķērsām šķiedrām) saskaņā ar standartu LVS EN ISO 10456.

Ar mērķi noteikt KŠM paralēlā un perpendikulārā virziena ūdens tvaika pārvades raksturlielumu faktiskās vērtības un novērtēt KŠM uzbūves ietekmi uz ūdens tvaika pārvades raksturlielumiem ir izgatavoti sešu veidu paraugi. Katram paraugu veidam pārbaudīti trīs paraugi, kuru apraksts un nominālie izmēri iekļauti 3.1. tabulā.

Lai nodrošinātu to, ka KŠM perpendikulārā virzienā notiek brīva gaisa plūsma pa materiāla kanāliem, paraugi izgatavoti ar palielinātu parauga diametru 140 mm. Paralēlā virziena ūdens tvaika caurlaidības paraugu diametrs ir 70 mm.

Pirms pārbaudes uzsākšanas visi paraugi bez testēšanas aprīkojuma kondicionēti pie temperatūras 23 ± 1 °C un relatīvā gaisa mitruma 50 ± 3 % līdz konstantai masai. Pēc kondicionēšanas noteikti paraugu aktuālie ģeometriskie izmēri un materiāla blīvums.

Ūdens tvaika pārvades raksturlielumu noteikšanai izmantotie paraugi parādīti 3.3.att.

Paraugu specifikācija koksnes šūnveida materiāla ūdens tvaika pārvades raksturlielumu noteikšanai

Paraugu marķējums	Materiāla orientācija	Materiāla uzbūves apzīmējums	Saklāto kārtu skaits, gab.	Vienas kārtas biezums, mm	Kopējais KŠM biezums, mm	KŠM nominālais diametrs, mm
1-1 līdz 1-3	0	2-25	2	25	50	74
1-4 līdz 1-6	0	4-18	4	18	72	74
1-7 līdz 1-9	0	4-28	4	28	112	74
2-1 līdz 2-3	90	2-25	4	25	50	140
2-4 līdz 2-6	90	4-18	4	18	72	140
2-7 līdz 2-9	90	4-28	2	28	112	140



1



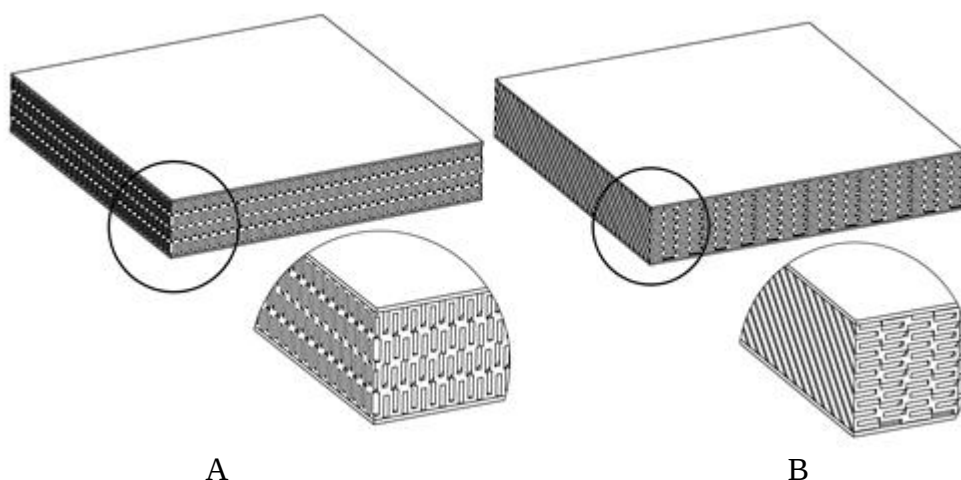
2

3.3. att. Paraugi ūdens tvaika pārvades raksturlielumu noteikšanai:

1 - materiāla paralēlā virzienā un 2 - materiāla perpendikulārā virzienā.

3.1.5. Siltumvadītspēja

KŠM termisko īpašību noteikšanai izmantots KŠM no 28 mm biezām profilētām priedes (*Pinus Sylvestris* L.) koksnes lamelēm. KŠM izgatavošanas tehnoloģija aprakstīta 2.1. nodaļā. Lai noteiktu abu KŠM virzienu siltumvadītspējas koeficientu λ , pārbaudēm izgatavoti divu veidu paraugi - A un B (skat. 3.4 att.). A veida paraugs izgatavots ar KŠM paralēlo virzienu pret siltuma plūsmu, savukārt B veida paraugs ar KŠM perpendikulāro virzienu pret siltuma plūsmu. KŠM abiem virzieniem pie nosakāmās īpašības piešķirti šādi indeksi: 0 (parauga veidam A ar paralēlo materiāla virzienu) un 90 (parauga veidam B ar perpendikulāro materiāla virzienu). Abu paraugu veidu gadījumā KŠM abpusēji pārklāts ar 4 mm biezu augsta blīvuma kokšķiedru plātni (HDF), veidojot noslēgtu konstrukciju siltuma plūsmas virzienā. HDF blīvums saskaņā ar ražotāja norādīto specifikāciju ir 800 kg m^{-3} , savukārt aprēķinos izmantotais siltumvadītspējas koeficients saskaņā ar standartu EN 13986 ir $\lambda_{\text{HDF}} = 0.14 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$. KŠM vidējais blīvums $\rho_{\text{KŠM}}$ ir 302 kg m^{-3} un vidējais mitrums 12.1 %. Siltumvadītspējas koeficientu noteikšanai abu veidu paraugiem izgatavoti paraugi ar nominālo garumu, platumu 600 mm un biezumu 120 mm. Paraugu veidi parādīti 3.4 att.



3.4. att. **Siltumvadītspējas koeficientu noteikšanas paraugi:**

A - ar paralēlo koksnes šūnveida materiāla virzienu un B - ar perpendikulāro koksnes šūnveida materiāla virzienu.

Sagatavoto paraugu siltumvadītspējas un siltuma caurlaidības koeficienti noteikti saskaņā ar standarta LVS EN 12667 metodiku. Kopā izgatavoti četri ar HDF plātnēm aplīmēti paraugi, katram materiāla veidam pa 2 paraugiem. Pārbaude veikta ar karsto plātņu siltumvadītspējas noteikšanas iekārtu *Fox 600*, kura atbilst standartā ISO 8301 izvirzītajām prasībām.

KŠM siltumvadītspējas koeficientu λ ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$) vairākkārtu plātnēm ar vienāda materiāla un vienāda biezuma ārējām kārtām izsaka no sakarības 3.7. un aprēķina pēc sakarības 3.8. (Borodiņecs un Krēsliņš, 2007).

$$U_{\text{parauga}} = \frac{1}{R_0} \rightarrow R_0 = \frac{1}{U_{\text{parauga}}}, \quad (3.7.)$$

kur: U_{parauga} - parauga kopējais siltuma caurlaidības koeficients, $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$;
 R_0 - parauga kopējā siltumpretestība, $\text{m}^2 \text{K W}^{-1}$.

$$R_0 = 2 \cdot \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} \rightarrow \lambda_2 = \frac{d_2 \lambda_1}{R_0 \cdot \lambda_1 - 2 \cdot d_1}, \quad (3.8.)$$

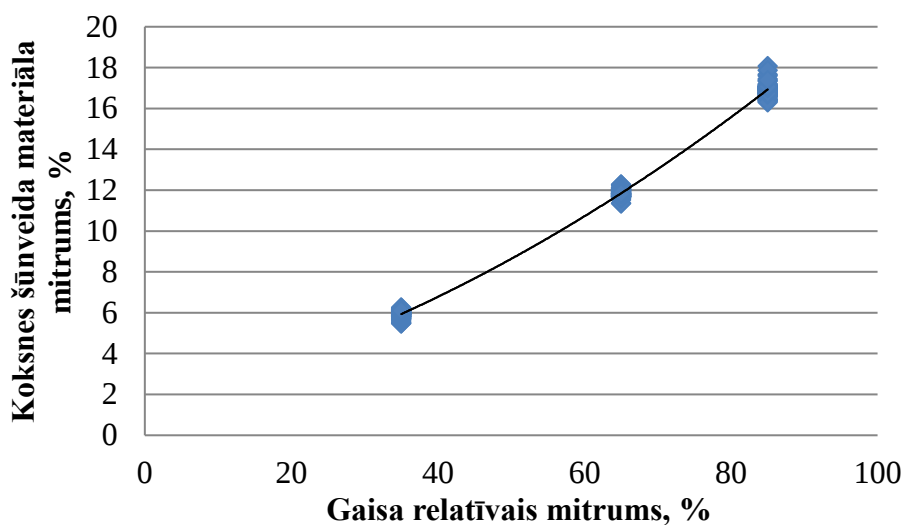
kur: d_1 - virsējo kārtu materiāla biezums, mm;
 d_2 - KŠM biezums, mm;
 λ_1 - virsējo kārtu materiāla siltumvadītspējas koeficients, $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$;
 λ_2 - KŠM siltumvadītspējas koeficients, $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$.

3.2. Rezultāti un diskusija fizikālo īpašību noteikšanai

3.2.1. Mitruma

Pētījumā iegūtais vidējais KŠM mitrums ir 12.5 %, *SD* 0.337 % un *VAR* 3 %. Saskaņā ar literatūru priedes masīvkoksnes mitrums pēc kondicionēšanas standarta atmosfērā atkarībā no koksnes īpašībām ieņem mitrumu 12.0 % (*DIN* 68100). Ņemot vērā kondicionēšanas telpā pieļaujamās gaisa relatīvā mitruma robežas no 60 līdz 70 %, tiek aprēķinātas priedes koksnes līdzsvara mitruma robežas no 11.1 līdz 13.0 %. Tādējādi iespējams secināt, ka priedes KŠM vidējais mitrums pēc kondicionēšanas standarta atmosfērā būtiski neatšķiras no priedes koksne mitruma saskaņā ar literatūru. Rezultātā koksnes līdzsvara mitruma diagramma ir izmantojama arī KŠM mitruma prognozēšanai atkarībā no tā, kādos ekspluatācijas apstākļos

paredzēts izmantot konkrēto materiālu. Sakarība starp gaisa relatīvo mitrumu un koksnes līdzsvara mitrumu pie 20 ± 2 °C temperatūras parādīta 3.5. att.



3.5. att. **Gaisa relatīvā mitruma ietekme uz koksnes šūnveida materiāla līdzsvara mitrumu pie gaisa temperatūras 20 ± 2 °C.**

Kā redzams 3.5. attēlā, gaisa relatīvajam mitrumam robežās no 30 līdz 85 % pie konstantas gaisa temperatūras 20 ± 2 °C ir būtiska ietekme uz KŠM mitrumu. Veidojas daļa no adsorbcijas līknes. KŠM mitrumu atkarībā no relatīvā gaisa mitruma var aprēķināt pēc otrās pakāpes polinomiālās sakarības

$$W = 0.0011RH^2 + 0.0838RH + 1.61, \quad (3.9.)$$

kur: W - KŠM mitrums, %;
 RH - gaisa relatīvais mitrums, %.

Šo ciešo pozitīvo sakarību raksturo korelācijas koeficients $r = 1.00$. Pēc standartā DIN 68100 norādītajām priedes koksnes līdzsvara mitruma vērtībām tiek aprēķināts līdzsvara mitrums pie temperatūras 20 °C un dažādiem relatīvā gaisa mitruma līmeņiem. Pie 30 % gaisa relatīvā mitruma priedes koksnes līdzsvara mitrums ir 5.8 %, savukārt pie 65 % 12 % un 85 % tas veido 15.6 %. Pēc kondicionēšanas pie relatīvā gaisa mitruma līmeņa 30 un 65 % KŠM mitrums būtiski neatšķiras no literatūrā norādītajiem priedes koksnes līdzsvara mitruma rādītājiem. Savukārt pie relatīvā mitruma līmeņa 85 % KŠM mitruma rādītāji ir par 1.3 % augstāki nekā priedes masīvkoksnei saskaņā ar literatūrā paustajiem datiem. Minēto atšķirību var izskaidrot ar augstāku faktisko gaisa relatīvā mitruma līmeni kondicionēšanas telpā nekā iestatītā nominālā vērtība.

Secinājumi

1. KŠM mitrums ir tieši atkarīgs no relatīvā gaisa mitruma.
2. Pēc kondicionēšanas standarta atmosfērā (65 ± 5 %; 20 ± 2 °C) divos pētījumos noteikts priedes KŠM vidējais mitrums 12.5 %, robežās no 11.9 līdz 13.6 % un 11.9 %, robežās no 11.4 līdz 12.3 %. Abos pētījumos KŠM vidējā mitruma vērtība būtiski neatšķiras no priedes koksnes mitruma vērtības 12 % saskaņā ar literatūru.
3. Pēc kondicionēšanas pie relatīvā gaisa mitruma 35 vai 85 %, pie gaisa temperatūras 20 °C, iegūtas KŠM vidējās mitruma vērtības 5.9 un 16.9 %.
4. Starp KŠM mitrumu un gaisa relatīvo mitrumu pie gaisa temperatūras 20 ± 2 °C pastāv cieša otrās pakāpes polinomiālā sakarība $W = 0.0011RH^2 + 0.0838RH + 1.61$.
5. Koksnes līdzsvara mitruma diagramma ir izmantojama arī KŠM mitruma prognozēšanai atkarībā no relatīvā gaisa mitruma un temperatūras.

3.2.2. Blīvums

Pētījumā iegūts šūnveida materiāla kubveida paraugu vidējais blīvums 307 kg m^{-3} , SD 12 kg m^{-3} un VAR 4% . Noteiktais šūnveida materiāla blīvums ir robežās no 277 līdz 332 kg m^{-3} . Blīvuma raksturlieluma vērtība aprēķināta saskaņā ar standarta LVE EN 14358:2007 prasībām un ir 285 kg m^{-3} . Literatūrā ir norādīts, ka Latvijā augušas priedes koksnes vidējais blīvums pie 12% mitruma ir no 492 līdz 505 kg m^{-3} (Šķēle u.c., 2002; Kalniņš un Liepiņš, 1933), kas ir par 38 līdz 39% augstāks, salīdzinot ar noteikto priedes KŠM blīvumu.

Sešdesmit KŠM paraugu blīvuma rādītāji pēc materiāla izturēšanas pie relatīvā gaisa mitruma 30 , 65 vai 85% un gaisa temperatūras $20 \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ apkopoti 3.2. tabulā.

3.2. tabula

Koksnes šūnveida materiāla blīvuma noteikšanas rezultāti atkarībā no gaisa relatīvā mitruma

Rādītājs	Blīvums, kg m^{-3}		
	20 $^{\circ}\text{C}$, 35 %	20 $^{\circ}\text{C}$, 65 %	20 $^{\circ}\text{C}$, 85 %
Vidējā vērtība (SD ; VAR , %)	293 (16; 5)	308 (16; 5)	321 (17; 5)
Min.	261	277	290
Maks.	323	341	356

Šajā tabulā redzams, ka KŠM zemākā blīvuma vērtība pēc paraugu izturēšanas pie 30% relatīvā gaisa mitruma ir 261 kg m^{-3} , savukārt augstākā noteiktā KŠM blīvuma vērtība pēc paraugu izturēšanas pie 85% relatīvā gaisa mitruma ir 356 kg m^{-3} . KŠM blīvuma rādītāju izkliedi visiem trīs relatīvā gaisa mitruma līmeņiem raksturo zems variācijas koeficients 5% . Tas izskaidrojams ar materiāla uzbūvi. Materiāls veidots no vairākām lamelēm ar dažādu blīvumu, kuru vidējā blīvuma vērtība ir faktiskais materiāla blīvuma rādītājs.

Salīdzinot standarta atmosfērā kondicionētu paraugu vidējās blīvuma vērtības kubveida paraugiem ar malu izmēriem 112 mm un taisnleņķa paralēlskalda paraugiem ar izmēriem platumu, garumu 56 mm un biezumu 300 mm ar Stjudenta t-testa metodi, varam secināt, ka iegūtie vidējie blīvuma rādītāji abām paraugu grupām būtiski neatšķiras, jo Stjudenta t-testa p vērtība > 0.05 .

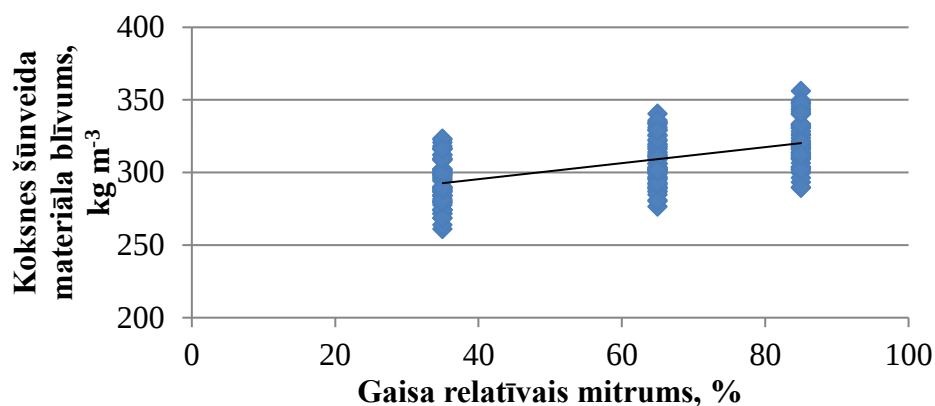
Starp KŠM blīvumu un gaisa relatīvo mitrumu pie gaisa temperatūras $20 \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ pastāv vidēji cieša lineāra sakarība

$$\rho = 0.522RH + 273, \quad (3.10.)$$

kur: ρ - KŠM blīvums, kg m^{-3} ;

RH - gaisa relatīvais mitrums, %.

Kā parādīts 3.6. attēlā, gaisa relatīvajam mitrumam pie gaisa temperatūras $20 \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ir būtiska ietekme uz KŠM blīvumu. Iegūtā lineārā sakarība ir funkcionāli pozitīva, vidēji cieša, ko raksturo korelācijas koeficients $r = 0.58$.



3.6. att. Gaisa relatīvā mitruma ietekme uz KŠM blīvumu.

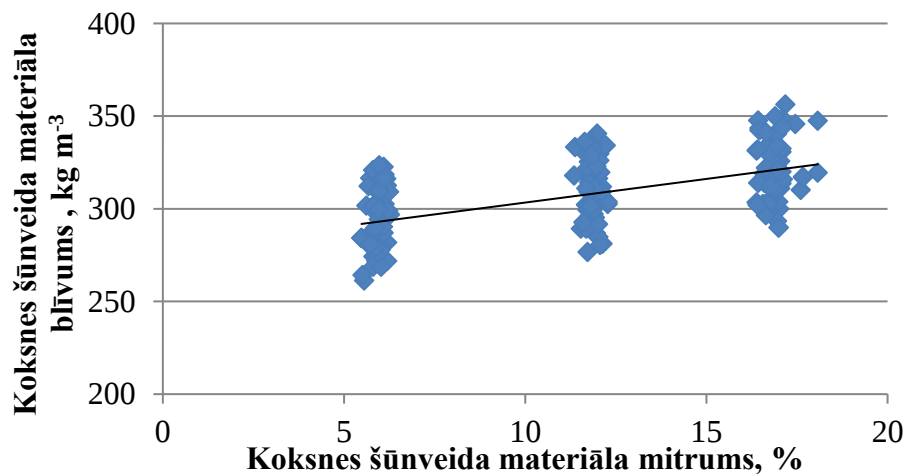
Gaisa relatīvā mitruma paaugstināšanās palielina KŠM blīvumu. Savukārt gaisa relatīvā mitruma samazināšanās būtiski samazina KŠM blīvumu.

KŠM mitruma ietekme uz blīvumu parādīta 3.7. attēlā. Kā redzams, pieaugot KŠM mitrumam, palielinās arī materiāla blīvums. Iegūta lineārā sakarība

$$\rho = 2.55W + 277.86, \quad (3.11.)$$

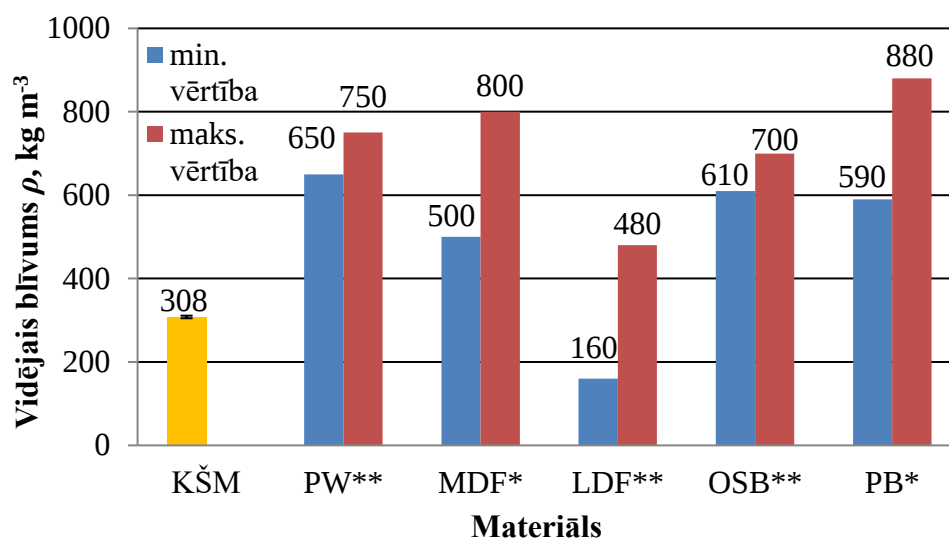
kur: ρ - KŠM blīvums, kg m^{-3} ;
 W - KŠM mitrums, %.

Šī sakarība ir funkcionāli pozitīva, vidēji cieša, ko raksturo korelācijas koeficients $r = 0.58$. Materiāla mitruma paaugstināšanās mikroklimata ietekmē būtiski palielina KŠM blīvumu. Savukārt gaisa relatīvā mitruma samazināšanās blīvumu samazina.



3.7. att. Koksnes šūnveida materiāla mitruma W ietekme uz blīvumu ρ .

Priedes KŠM vidējā blīvuma rādītāja salīdzinājums ar plātņu materiālu vidējā blīvuma robežām saskaņā ar literatūru parādīts 3.8. att.



3.8. att. KŠM un koksnes plātņu materiālu vidējo blīvuma vērtību salīdzinājums:

*Bowyer u.c., 2003; **Lūsiņa u.c., 2007.

KŠM blīvums ir zemāks nekā lielākajai daļai koksnes plātņu materiālu. Iegūtā materiāla blīvuma vērtība ir salīdzināma ar zema blīvuma kokšķiedru plātņu blīvumu, kas tiek izmantotas kā siltumizolācijas materiāls ēku siltināšanā.

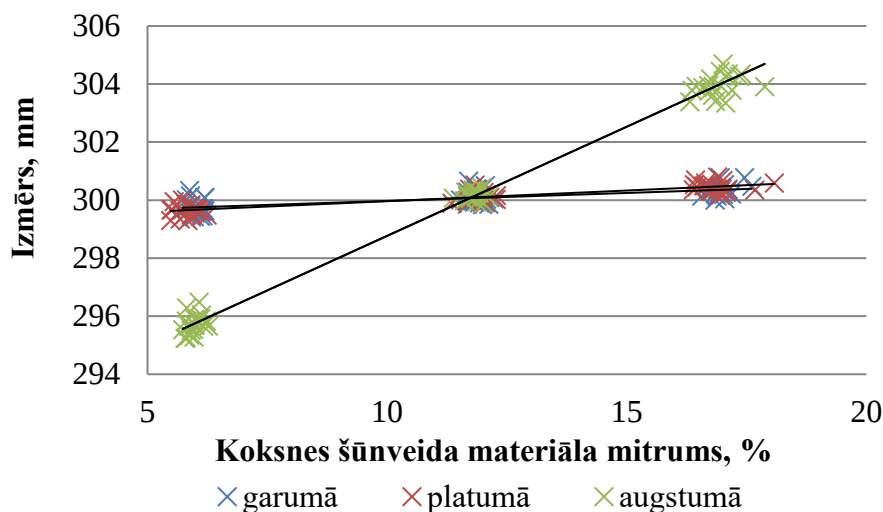
Nemot vērā ievērojami zemākos KŠM blīvuma rādītājus kā masīvkoksnei, tā arī lielākajai daļai plātņu materiālu, konstrukcijas un izstrādājumi no KŠM būs ar mazāku masu un blīvumu.

Secinājumi

1. KŠM blīvums ir atkarīgs no relatīvā gaisa mitruma un materiāla mitruma.
2. Pēc kondicionēšanas standarta atmosfērā ($65 \pm 5\%$; $20 \pm 2^\circ\text{C}$) noteikts priedes KŠM kubveida paraugu vidējais blīvums 308 kg m^{-3} , robežās no 277 līdz 332 kg m^{-3} . Aprēķinātā blīvuma 5% kvantiļa raksturlieluma vērtība ir 285 kg m^{-3} .
3. Starp KŠM blīvumu un gaisa relatīvo mitrumu pie gaisa temperatūras $20 \pm 2^\circ\text{C}$ pastāv vidēji cieša lineāra sakarība $\rho = 0.522RH + 273$.
4. Starp KŠM blīvumu un mitrumu pie gaisa temperatūras $20 \pm 2^\circ\text{C}$ pastāv vidēji cieša lineāra sakarība $\rho = 2.55W + 277.86$.
5. Salīdzinot blīvuma vidējās vērtības paraugiem ar izmēriem $50 \times 50 \times 300 \text{ mm}$ un paraugiem ar izmēriem $112 \times 112 \times 112 \text{ mm}$, netika konstatēta būtiska blīvuma rādītāju atšķirība. Tādējādi iespējams secināt, ka KŠM blīvums nav atkarīgs no paraugu izmēriem.
6. Materiāla vidējā blīvuma vērtība ir par 38% zemāka nekā literatūrā norādītais priedes koksnes blīvuma rādītājs un vairāk nekā par 38% zemāka, salīdzinot kokskaidu plātņu, vidēja blīvuma kokšķiedru plātņu un saplākšņa blīvuma minimālās vērtības. Iegūtie materiāla blīvuma rādītāji ir salīdzināmi ar zema blīvuma kokšķiedru plātņu blīvuma rādītājiem.
7. Pēc kondicionēšanas pie relatīvā gaisa mitruma 35% vai 85% , pie gaisa temperatūras 20°C ir iegūtas KŠM vidējās blīvuma vērtības 293 un 321 kg m^{-3} .

3.2.3. Rukšana un briešana

KŠM mitruma izmaiņu ietekme uz šūnveida materiāla izmēriem parādīta 3.9. attēlā.



3.9. att. Sakarības starp koksnes šūnveida materiāla mitruma un izmēru izmaiņām.

Analizējot 3.9. att. iekļautos rādītājus, varam secināt, ka, KŠM mitrumam palielinoties no 6 līdz 18 %, materiāla garums palielinās. Starp mitruma un garuma izmaiņām pastāv vidēji cieša lineāra sakarība

$$g = 0.0549W + 299, \quad (3.12.)$$

kur: g - garums, mm;
 W - mitrums, %.

Sakarību 3.12. raksturo korelācijas koeficients $r = 0.73$. Aprēķinātais KŠM rukšanas koeficients materiāla garumā k_{rg} ir $0.0182 \% \%^{-1}$, savukārt briešanas koeficients k_{bg} ir $0.0183 \% \%^{-1}$. Sareizinot priedes kokšķiedru piesātinājuma mitruma vērtību 28 % (Kūliņš, 2004) ar iegūto rukšanas koeficientu pa materiāla garumu, aprēķina materiāla maksimālo rukumu materiāla garumā R_{rg} 0.510 %.

KŠM mitrumam robežās no 6 līdz 18 % ir būtiska ietekme uz šūnveida materiāla platumu izmaiņām. Starp mitruma un platumu izmaiņām pastāv cieša lineāra sakarība

$$p = 0.0736W + 299, \quad (3.13.)$$

kur: p - platums, mm;
 W - mitrums, %.

Šo sakarību raksturo korelācijas koeficients $r = 0.89$. Aprēķinātais KŠM rukšanas koeficients materiāla platumā k_{rp} ir $0.0245 \% \%^{-1}$, savukārt briešanas koeficients k_{bp} ir $0.0246 \% \%^{-1}$. Sareizinot priedes kokšķiedru piesātinājuma mitruma vērtību 28 % ar iegūto rukšanas koeficientu pa materiāla platumu, aprēķina materiāla maksimālo rukumu materiāla platumā R_{rp} 0.686 %.

Lai arī šūnveida materiāla struktūra materiāla garumā un platumā vizuāli ir līdzīga, iegūtie rukšanas un briešanas koeficienti abiem virzieniem būtiski atšķiras ($p < 0.05$). Minētā atšķirība skaidrojama ar to, ka saklātās KŠM kārtas savstarpēji veido aptuveni 86° leņķi 90° leņķa vietā, tādējādi veidojot asimetrisku materiāla uzbūvi, kura izraisa atšķirīgus rukšanas un briešanas koeficientus materiāla garumā un platumā. Pēc KŠM izgatavošanas vizuāli nav iespējams atšķirt materiāla garumu no platumu, tādēļ praktiskiem aprēķiniem tiek rekomendēts izmantot abu virzienu vidējo rukšanas un briešanas koeficienta vērtību $0.0214 \% \%^{-1}$.

KŠM mitrumam robežās no 6 līdz 18 % ir visnozīmīgākā ietekme uz šūnveida materiāla augstuma izmaiņām. Starp mitruma un augstuma izmaiņām pastāv cieša lineāra sakarība

$$a = 0.752W + 291, \quad (3.14.)$$

kur: a - augstums, mm;
 W - mitrums, %.

Sakarību raksturo korelācijas koeficients $r = 1$. Aprēķinātais KŠM rukšanas koeficients materiāla augstumā k_{ra} ir $0.248 \% \%^{-1}$ mitruma, savukārt briešanas koeficients k_{ba} veido $0.255 \% \%^{-1}$ mitruma. Sareizinot priedes kokšķiedru piesātinājuma mitruma vērtību 28 % ar iegūto rukšanas koeficientu pa materiāla augstumu, aprēķina materiāla maksimālo rukumu materiāla augstumā R_{ra} 6.94 %.

Paraugu teorētiski aprēķinātie vidējie tilpuma rādītāji un tiem atbilstošie mitruma rādītāji pie noteiktajiem gaisa relatīvā mitruma līmeņiem apkopoti 3.3. tabulā.

3.3. tabula

Koksnes šūnveida materiāla teorētiskās tilpuma un mitruma izmaiņas

Rādītāji pie noteiktiem kondicionēšanas apstākļiem					
20 °C, 35 %		20 °C, 65 %		20 °C, 85 %	
Tilpums, m ³	Mitrums, %	Tilpums, m ³	Mitrums, %	Tilpums, m ³	Mitrums, %
0.0266	6.0	0.0270	11.9	0.0274	16.9

Kā redzams 3.3. tabulā, teorētiski aprēķinātās KŠM tilpuma vērtības pieaug, mainoties relatīvā gaisa mitrumam robežās no 35 līdz 85 % un koksnes mitrumam no 6 līdz 17 %. Izmantojot 3.4. sakarību un 3.3 tabulas rādītājus, tiek aprēķināts KŠM tilpuma rukšanas koeficients k_{rv} , kas veido $0.275 \% \%^{-1}$.

Teorētisko KŠM tilpuma izmaiņu atkarībā no materiāla mitruma iespējams aprakstīt ar ciešu otrās pakāpes polinomiālo sakarību 3.15., kas izmantojama materiāla mitruma robežās no 6 līdz 16.9 %.

$$V = 10^{-6} \cdot W^2 + 5 \cdot 10^{-5} \cdot W + 0.0263, \quad (3.15.)$$

kur: V - KŠM tilpums, m³;
 W - KŠM mitrums, %.

Izmantojot 3.15. sakarību, aprēķināta KŠM teorētiskā tilpuma vērtība 0.0263 m³ pie materiāla mitruma 0 % un 0.0285 m³ pie KŠM mitruma 28 %. Izmantojot 3.5. sakarību, aprēķināta KŠM absolūtā tilpuma rukuma vērtība R_{vr} , 8.30 %, kura ir aptuveni vienāda ar visu trīs dimensiju absolūto rukumu summu 8.14 %. Aprēķinu ceļā iegūtā KŠM absolūtā tilpuma rukuma vērtība ir par 1.9 % augstāka nekā eksperimentālā ceļā iegūtā.

Salīdzinot iegūtos rukšanas un briešanas koeficientus dažādos šūnveida materiāla virzienos, redzams, ka lielākās materiāla izmēru izmaiņas norisinās, materiālam rūkot un briešot materiāla augstumā, ko var izskaidrot ar masīvkoksnes radiālo un tangenciālo novietojumu šūnveida materiālā. Apskatot šūnveida materiāla uzbūves struktūru materiāla augstumā, varam secināt, ka tajos aptuveni vienādā daudzumā sastopama kā radiālā, tā tangenciālā koksne, kā arī pusradiālā koksne, kas izskaidro tuvu rukšanas koeficienta vērtību masīvkoksnes tangenciālā un radiālā rukšanas koeficienta vidējai vērtībai $0.22 \% \%^{-1}$ (rukšanas koeficients radiālajā virzienā $0.15 \% \%^{-1}$; rukšanas koeficients tangenciālajā virzienā $0.29 \% \%^{-1}$) saskaņā ar literatūrā pieejamajiem datiem, skat 3.4. tabulu.

Priedes koksnes un priedes koksnes šūnveida materiāla rukšanas koeficienti

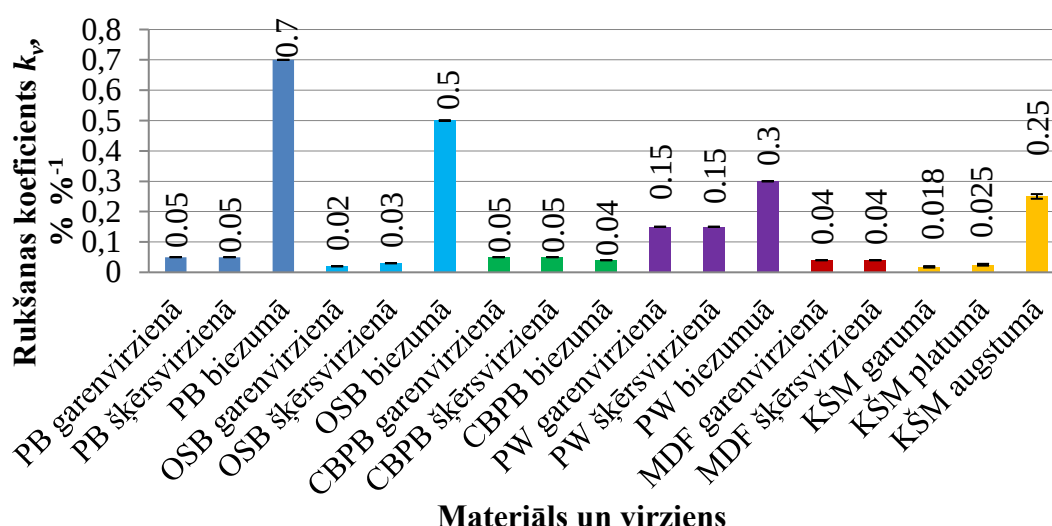
Literatūras avots	Priedes masīvkoksne				KŠM			
	tangen- ciāli	radiāli	aksiāli	tilpumā	garumā	platumā	augstumā	tilpumā
	k_{rt} , % % ⁻¹	k_{rr} , % % ⁻¹	k_{rak} , % % ⁻¹	k_{rv} , % % ⁻¹	k_{rg} , % % ⁻¹	k_{rp} , % % ⁻¹	k_{ra} , % % ⁻¹	k_{rv} , % % ⁻¹
Kūlinš, 2004	0.28	0.14	-	0.43	0.0182	0.0245	0.2480	0.2750
Wagenfuhr, 1996	0.29	0.14	0.010	0.42				
Dinwoodie, 2000	0.28	0.19	0.006	-				
Rijsdijk u.c., 1994	0.30	0.14	0.006	-				
Vidēji	0.29	0.15	0.007	0.43				

Koksnes šūnveida materiāla izmēru izmaiņas materiāla garumā un platumā ir aptuveni 10 reizes mazākas, salīdzinot ar šūnveida materiāla izmēru izmaiņām materiāla augstumā. Salīdzinājumam - iegūtais šūnveida materiāla rukšanas koeficients materiāla garumā un platumā ir aptuveni četras reizes lielāks, kas skaidrojams ar visu trīs masīvkoksnes virzienu komponentu kombinēto ietekmi uz šūnveida materiāla izmēru izmaiņām materiāla garumā un platumā.

Salīdzinot iegūtos KŠM tilpuma rukšanas koeficientus, varam secināt, ka KŠM tilpuma izmaiņas ir par 36 % mazākas nekā priedes koksnei.

Pētījumā iegūtie priedes KŠM lineārie rukšanas koeficienti ir līdzīgi egles koksnes krustām līmēto kokmateriālu paneļu (CLT) rukšanas un briešanas koeficientiem garumā, platumā 0.02 % %⁻¹ un biezumā 0.24 % %⁻¹ ²¹. Tas izskaidrojams ar izmantoto koku sugas līdzīgajiem rukšanas rādītājiem un līdzīgo materiāla uzbūvi.

KŠM rukšanas koeficientu salīdzinājums ar būvniecībā plaši izmantoto plātņu materiālu rukšanas koeficientiem parādīts 3.10. attēlā.



3.10. att. Koksnes šūnveida materiāla un plātņu materiālu rukšanas koeficientu salīdzinājums (LVS CEN/TS 12872:2007):

PB - kokskaidu plātne; OSB - orientēto kokskaidu plātne; CBPB - cementa kokskaidu plātne; PW - saplāksnis; MDF - sausā procesa kokšķiedru plātne un KŠM - koksnes šūnveida materiāls.

²¹ https://online.tugraz.at/tug_online/voe_main2.getVollText?pDocumentNr=469350&pCurrPk=73130, skatīts 01.03.2015.

Kā redzams 3.10. attēlā, KŠM rukšanas koeficienti materiāla garumā $0.018\ \%^{-1}$ un platumā $0.025\ \%^{-1}$ ir zemāki, salīdzinot lielāko daļu plātņu materiālu rukšanas koeficientiem plātņu garenvirzienā un šķērsvirzienā. Līdzīgus rādītājus atspoguļo vienīgi cementa kokšķiedru plātnes. Salīdzinot iegūto KŠM rukšanas koeficientu materiāla augstumā $0.25\ \%^{-1}$, tas ir zemāks nekā tādiem plātņu materiāliem kā saplāksnim, kokskaidu plātnēm un orientēto kokskaidu plātnēm biežumā. Aptuveni sešas reizes zemāks rukšanas koeficients ir dots cementa kokskaidu plātnēm, rūkot biežumā. Pētījuma rezultāti apkopoti autora publikācijā (Iejavs u.c., 2013). Papildus augstāk minētajiem rādītājiem atsevišķā pētījumā novērtēta arī KŠM formas stabilitāte un briešanas spēks (Spulle u.c., 2017).

Secinājumi

1. KŠM mitruma izmaiņas robežās no 6 līdz 18 % būtiski ietekmē šūnveida materiāla izmēru izmaiņas. Paaugstinoties vai samazinoties KŠM mitrumam, lineāri palielinās vai samazinās šūnveida materiāla izmēri.
2. Lielākās izmēru izmaiņas, mainoties koksnes mitrumam, notiek KŠM augstumā, ko raksturo lineārā sakarība $a = 0.752W + 291$. Aprēķinātais vidējais šūnveida materiāla rukšanas koeficients pa materiāla augstumu ir $0.248\ \%^{-1}$, savukārt briešanas koeficients $0.255\ \%^{-1}$. Priedes KŠM augstuma izmaiņas var salīdzināt ar priedes masīvkoksnes radiālā un tangenciālā rukšanas koeficienta vidējo vērtību $0.22\ \%^{-1}$. Koeficientu atšķirība skaidrojama ar lielāku tangenciālo dēļu klātbūtni pa šūnveida materiāla augstumu nekā radiālo.
3. KŠM izmēru izmaiņas materiāla platumā un garumā ir aptuveni desmit reizes mazākas nekā izmaiņas materiāla augstumā. Lai arī šūnveida materiāla uzbūve materiāla garumā un platumā vizuāli ir līdzīga, iegūtie rukšanas un briešanas koeficienti abiem virzieniem, salīdzinot statistiski, būtiski atšķiras. Aprēķinātais vidējais KŠM rukšanas koeficients materiāla garumā ir $0.0182\ \%^{-1}$, savukārt briešanas koeficients $0.0183\ \%^{-1}$. Atbilstošie koeficienti materiāla platumā - rukšanas $0.0245\ \%^{-1}$ un briešanas $0.0246\ \%^{-1}$.
4. Pēc KŠM bloka malu apzāģēšanas vizuāli nav iespējams atšķirt materiāla garumu no platuma, tādēļ praktiskiem aprēķiniem tiek rekomendēts izmantot abu virzienu vidējo rukšanas un briešanas koeficienta vērtību $0.0214\ \%^{-1}$.
5. KŠM izmaiņas garumā un platumā ir 12 līdz 16 reizes mazākas nekā priedes koksnei radiālā virzienā un 6 līdz 8 reizes mazākas nekā tangenciālā virzienā. Materiāla rukšanas koeficients augstumā $0.248\ \%^{-1}$ ir salīdzināms ar priedes koksnes radiālā un tangenciālā virziena rukšanas koeficienta vidējo vērtību $0.22\ \%^{-1}$.
6. Priedes KŠM tilpuma izmaiņas ir 1.6 reizes jeb par 36 % mazākas nekā priedes koksnei.
7. KŠM lineārie rukšanas koeficienti visos trīs materiāla virzienos ir krietni zemāki, salīdzinot ar lielāko daļu koksnes plātņu materiālu rukšanas koeficientiem.

3.2.4. Ūdens tvaika caurlaidība

Kā papildu rādītājs KŠM ūdens tvaika pārvades raksturlielumu noteikšanai ir aprēķināts materiāla blīvums. Biezākajiem 112 mm paraugiem noteikts vidējais blīvums $311\ \text{kg m}^{-3}$. Paraugiem ar biezumu 72 mm vidējais blīvums ir $304\ \text{kg m}^{-3}$, savukārt no divām kārtām izgatavotajiem paraugiem noteikta augstākā vidējā blīvuma vērtība $335\ \text{kg m}^{-3}$.

KŠM ūdens tvaika pārvades raksturlielumi, noteikti saskaņā ar standarta LVS EN 12086 metodiku, apkopoti 3.5. un 3.6. tabulā. Pārbaudei pakļauti seši dažādu veidu (biezuma, kārtu skaita un virziena) KŠM paraugi. Katram KŠM veidam pārbaudīti trīs paraugi, materiālu orientējot kā paralēlā, tā perpendikulārā virzienā.

Noteiktie KŠM ūdens tvaika pārvades raksturlielumi, materiālu pārbaudot paralēlā virzienā, apkopoti 3.5. tabulā.

Kā redzams 3.5. tabulā, materiālu pārbaudot paralēlā virzienā, zemākā ūdens tvaika difūzijas pretestības koeficienta vidējā vērtība μ 14.4 iegūta, KŠM paraugus izgatavojot no divām 25 mm biezām lamelēm ar kopējo KŠM biezumu 50 mm. Augstākā μ vērtība 21.1 iegūta KŠM, kurš izgatavots no četrām 18 mm biezām lamelēm, kas veido KŠM ar nominālo biezumu 72 mm. KŠM, kurš veidots no četrām 28 mm biezām lamelēm ar kopējo nominālo materiāla biezumu 112 mm, raksturo ūdens tvaika difūzijas pretestības koeficienta vidējā vērtība 15.5. Salīdzinot trīs paraugu veidu vidējo μ vērtību ticamības intervālus, varam pieņemt, ka iegūtie rādītāji visiem trīs paraugu veidiem būtiski neatšķiras un konstrukciju kritiskā virsmas mitruma un iekšējās kondensācijas riska novērtēšanai var izmantot visu deviņu paraugu ūdens tvaika difūzijas pretestības koeficienta vidējo vērtību 17.0.

3.5. tabula

Koksnes šūnveida materiāla paralēlā virziena ūdens tvaika pārvades raksturlielumi

Paraugu veids	Parauga Nr.	Iedarbei pakļautā parauga laukuma diametrs, mm	Parauga biezums, mm	Ūdens tvaika caurlaidība δ , $\text{mg m}^{-1} \text{h}^{-1} \text{Pa}^{-1}$	Ūdens tvaika difūzijas pretestības koeficients μ	Ūdens tvaika pretestības difūzijas ekvivalents gaisa slāņa biezums S_d , m
2-25	1-1	73.7	48.4	0.0465	15.3	0.74
	1-2	73.2	48.3	0.0590	12.0	0.58
	1-3	73.5	48.4	0.0446	15.9	0.77
	Vidējā vērtība				14.4	0.70
	SD				2.1	0.10
	VAR, %				15	15
	CON				9.2-19.6	0.44-0.95
4-18	1-4	74.2	72.9	0.0329	21.6	1.57
	1-5	73.9	72.6	0.0481	14.8	1.07
	1-6	74.3	72.7	0.0264	26.9	1.95
	Vidējā vērtība				21.1	1.53
	SD				6.1	0.44
	VAR, %				29	29
	CON				6.0-36.2	0.43-2.63
4-28	1-7	73.9	110.3	0.0528	13.4	1.48
	1-8	73.6	110.4	0.0461	15.4	1.70
	1-9	74.3	110.1	0.0398	17.8	1.96
	Vidējā vērtība				15.5	1.71
	SD				2.2	0.24
	VAR, %				14	14
	CON				10.0-21.0	1.11-2.31

Paraugu veidam 4-18 novērota būtiska μ rādītāju izkliede, kuru raksturo variācijas koeficients 29 %. Lai novērtētu cēloni, kas izraisījis būtisko rādītāju izkliedi, konkrētās grupas paraugiem veikta vizuālā novērtēšana. Pārbaudē konstatēts, ka parauga Nr. 5 iedarbei pakļautās ārējās un iekšējās virsmas ir veidotas no divām blakus novietotām lamelēm, starp kurām veidojas gaisa spraugas. Pa tām var notikt straujāka ūdens tvaika pārvade nekā paraugam Nr. 6, kuram abas iedarbei pakļautās virsmas ir veidotas no vienas lameles, kā rezultātā ūdens tvaika pārvade norisinās lēnāk. Paraugu konstruktīvo atšķirību skatīt 3.11. attēlā.



3.11. att. **Ūdens tvaika pārvades raksturlielumu noteikšanas paraugu virsmu atšķirība:**
1 - ar divām blakus novietotām lamelēm; 2 - ar vienu lameli iedarbei pakļautā laukuma platumā.

Šo rādītāju izkliedi iespējams samazināt, pārbaudei pakļaujot paraugus ar lielāku diametru, kuru ārējās kārtas veido vismaz divas blakus novietotas lameles. Šāda parauga diametram jāpārsniedz vienas lameles platums jeb 106 mm.

KŠM konstruktīvais risinājums (ar vai bez gaisa spraugas iedarbei pakļautajās ārējās vai iekšējās materiāla virsmās) būtiski ietekmē ūdens tvaika pārvades raksturlielumus. Četru kārtu koksnes šūnveida materiāla kārtu biezumam robežās no 18 līdz 28 mm netika konstatēta būtiska ietekme uz difūzijas pretestības koeficienta vidējo vērtību. Salīdzinot ūdens tvaika pretestības difūzijas ekvivalentā gaisa slāņa biezumu S_d divu kārtu koksnes šūnveida materiālam (biezums 50 mm) ar četru kārtu koksnes šūnveida materiālu (biezums 112 mm), S_d vērtība pieaug būtiski jeb 2.5 reizes - no 0.697 līdz 1.71 m. Šo ievērojamo atšķirību var pamatot ar vidējās S_d vērtības ticamības intervālu nepārklāšanos.

Noteiktie KŠM ūdens tvaika pārvades raksturlielumi, materiālu pārbaudot perpendikulārā virzienā, apkopoti 3.6. tabulā.

3.6. tabula
Koksnes šūnveida materiāla perpendikulārā virziena ūdens tvaika pārvades raksturlielumi

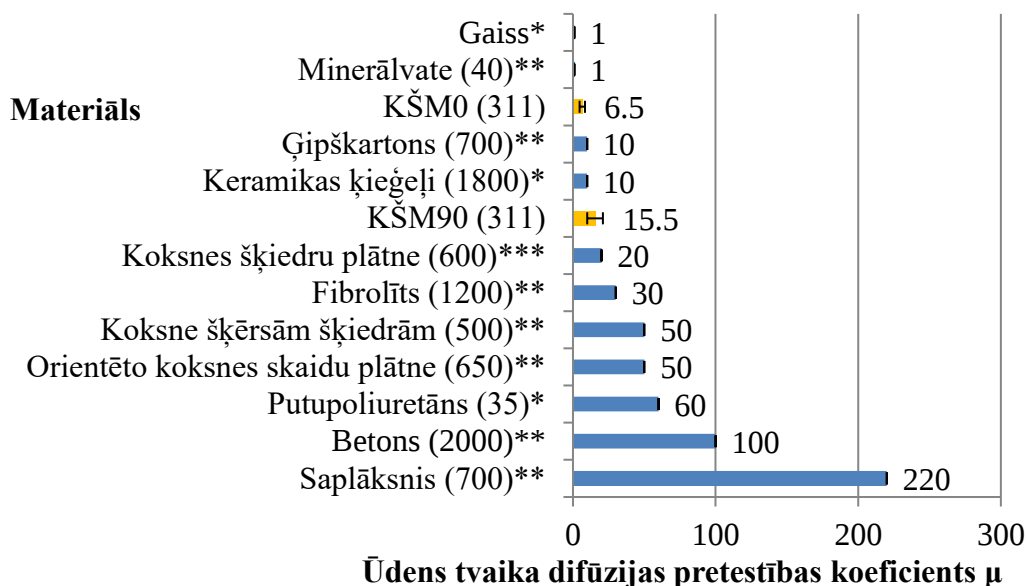
Paraugu veids	Parauga Nr.	Iedarbei pakļautā parauga laukuma diametrs, mm	Parauga biezums, mm	Ūdens tvaika caurlaidība δ , $\text{mg m}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$	Ūdens tvaika difūzijas pretestības koeficients μ	Ūdens tvaika pretestības difūzijas ekvivalents gaisa slāņa biezums S_d , m
2-25	2-1	141.1	50.3	0.150	4.73	0.24
	2-2	143.3	50.7	0.121	5.87	0.30
	2-3	141.2	50.7	0.124	5.71	0.29
	Vidējā vērtība				5.44	0.28
	SD				0.62	0.03
	VAR, %				11	11
	CON				3.91-6.97	0.20-0.36
4-18	2-4	142.7	71.9	0.165	4.31	0.31
	2-5	143.2	72.3	0.176	4.05	0.29
	2-6	142.8	72.5	0.156	4.56	0.33
	Vidējā vērtība				4.31	0.31
	SD				0.26	0.02
	VAR, %				6	6
	CON				3.68-4.94	0.26-0.36

3.6. tabulas noslēgums

Paraugu veids	Parauga Nr.	Iedarbei pakļautā parauga laukuma diametrs, mm	Parauga biezums, mm	Ūdens tvaika caurlaidība δ , $\text{mg m}^{-1} \text{h}^{-1} \text{Pa}^{-1}$	Ūdens tvaika difūzijas pretestības koeficients μ	Ūdens tvaika pretestības difūzijas ekvivalents gaisa slāņa biezums S_d , m
4-28	2-7	142.1	112.6	0.114	6.21	0.70
	2-8	143.1	112.2	0.096	7.40	0.83
	2-9	143.1	112.5	0.119	5.98	0.67
	Vidējā vērtība				6.53	0.73
	SD				0.76	0.08
	VAR, %				12	12
	CON				4.64-8.42	0.52-0.94

Kā redzams 3.6. tabulā, materiālu pārbaudot perpendikulārā virzienā, zemākā ūdens tvaika difūzijas pretestības koeficienta vidējā vērtība μ 4.31 iegūta KŠM paraugiem ar biezumu 72 mm, kuru izgatavošanā izmantotas 18 mm biezās lameles. Augstākā vidējā μ vērtība 6.53 iegūta KŠM ar faktisko biezumu 112 mm, kas izgatavots no četrām 28 mm biezām lamelēm. Visu trīs paraugu veidu vidējo μ un S_d vērtību ticamības intervāli pārklājas, tādējādi varam pieņemt, ka iegūtie rādītāji visiem trīs paraugu veidiem būtiski neatšķiras un konstrukciju kritiskā virsmas mitruma un iekšējās kondensācijas riska novērtēšanai var izmantot visu deviņu paraugu ūdens tvaika difūzijas pretestības koeficienta vidējo vērtību 5.42, savukārt materiāla raksturošanai var izmantot vidējo ūdens tvaika pretestības difūzijas ekvivalentā gaisa slāņa biezumu 0.448 m.

KŠM, kurš izgatavots no 28 mm biezām lamelēm, ūdens tvaika difūzijas pretestības koeficientu salīdzinājums ar būvniecībā plaši izmantotu materiālu μ vērtībām parādīts 3.12. att.



3.12. att. Koksnes šūnveida materiāla un citu būvniecības materiālu ūdens tvaika difūzijas pretestības koeficientu salīdzinājums:

iekavās materiāla blīvums ρ kg m^{-3} . (Borodiņš un Krēslīšs, 2007*; LVS EN ISO 10456:2007**; LVS EN 13986:2005***).

Kā redzams 3.12. attēlā, KŠM ūdens tvaika difūzijas pretestības koeficienta vērtība ir 2.4 reizes zemāka materiāla perpendikulārā virzienā nekā paralēlā virzienā. Neskatoties uz

caurejošajiem gaisa kanāliem KŠM perpendikulārā virzienā, materiālam ir krietni augstāki ūdens tvaika pārvades raksturlielumi nekā nekustīgam gaisa slānim. Attiecīgi literatūrā norādītā nekustīga gaisa slāņa μ vērtība ir 1, tāpat kā siltumizolācijas minerālvatei. KŠM paralēlā virziena μ vērtība 15.5 ir par 23 % zemāka nekā vidējā blīvuma kokšķiedru plātnes μ vērtība 20. Salīdzinot ar masīvkoksnes ūdens tvaika difūzijas pretestības koeficienta vērtību šķērsām šķiedrām, KŠM paralēlā virziena μ vērtība ir 3.2 reizes zemāka, bet perpendikulārā virziena vērtība attiecīgi 7.7 reizes zemāka. Fibrolītam, orientēto kokskaidu plātnēm, putupoliuretānam un saplāksnim μ vērtība ir no 1.9 līdz 14.2 reizēm augstāka nekā KŠM paralēlā virzienā un no 4.6 līdz 33.7 reizēm augstāka nekā KŠM perpendikulārā virzienā.

Iegūtie KŠM ūdens tvaika pārvades raksturlielumi ir izmantojami no KŠM izgatavotu konstrukciju iekšējās kondensācijas riska novērtēšanai. Rādītāji ļauj siltumtehiski pareizi veidot materiālu izvietošanu konstrukcijās, materiālus ar mazāku ūdens tvaika caurlaidību novietojot konstrukcijas siltajā pusē, savukārt ar lielāku ūdens tvaika caurlaidību - konstrukcijas aukstajā pusē.

Secinājumi

1. KŠM virzienam ir būtiska ietekme uz ūdens tvaika pārvades raksturlielumiem. Pētījumā noteikta KŠM ūdens tvaika difūzijas pretestības koeficientu vērtība 6.53 materiāla perpendikulārā virzienā un 2.4 reizes augstāka vērtība 15.5 materiāla paralēlā virzienā. Atšķirība skaidrojama ar brīvo gaisa plūsmu cauri KŠM tā perpendikulārā virzienā.
2. KŠM uzbūvei (kārtu skaitam un kārtu biezumam) nav būtiskas ietekmes uz materiāla paralēlā virziena ūdens tvaika difūzijas pretestības koeficientu. Pieaugot KŠM paralēlā virziena kārtu skaitam 2 reizes un materiāla biezumam 2.2 reizes (no 50 uz 112 mm), KŠM ūdens tvaika pretestības difūzijas ekvivalentā gaisa slāņa biezums palielinās ievērojami jeb 2.5 reizes (no 0.697 līdz 1.71 m).
3. KŠM uzbūve būtiski neietekmē materiāla perpendikulārā virziena ūdens tvaika difūzijas pretestības koeficientu un tam atbilstošo ūdens tvaika pretestības difūzijas ekvivalento gaisa slāņa biezumu.
4. Noteiktā KŠM ūdens tvaika pretestība ir krietni zemāka, salīdzinot ar būvniecībā plaši izmantoto plātņu materiālu un masīvkoksnes ūdens tvaika pretestību.
5. Iegūtie KŠM ūdens tvaika pārvades raksturlielumi ir izmantojami no KŠM izgatavotu konstrukciju iekšējās kondensācijas riska novērtēšanai. Rādītāji ļauj siltumtehiski pareizi veidot materiālu izvietošanu konstrukcijās, materiālus ar mazāku ūdens tvaika caurlaidību novietojot konstrukcijas siltajā pusē, savukārt ar lielāku ūdens tvaika caurlaidību - konstrukciju aukstajā pusē.

3.2.5. Siltumvadītspēja

KŠM paraugu siltumvadītspējas un siltuma caurlaidības koeficienti, kas noteikti saskaņā ar standarta EN 12667 metodiku un aprēķināti saskaņā ar 3.7. un 3.8. vienādojumu, apkopoti 3.7. tabulā. Aprēķini veikti katram paraugam atsevišķi, lai izvērtētu iespējamo rezultātu izkliedi.

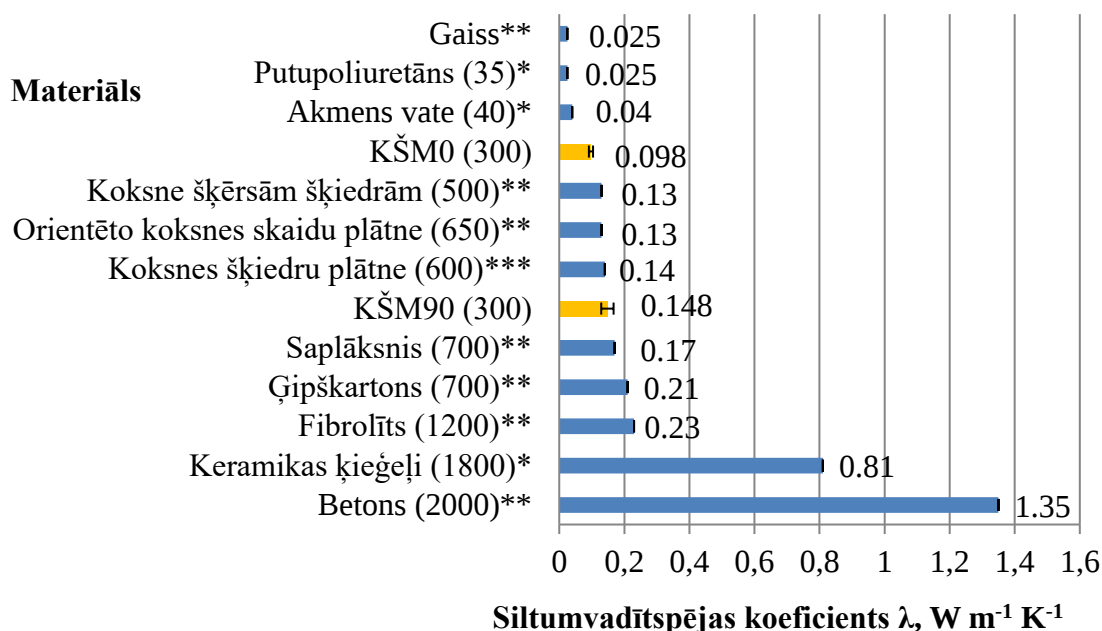
**Koksnes šūnveida materiāla siltumvadītspējas un siltuma caurlaidības koeficientu
noteikšanas rezultāti**

Parauga veids un Nr.	Biezums, mm	Siltumvadītspējas koeficients (KŠM ar plātnēm) $\lambda, W m^{-1} K^{-1}$	Siltuma caurlaidības koeficients (KŠM ar plātnēm) $U, W m^{-2} K^{-1}$	Siltumvadītspējas koeficients (plātnēm) $\lambda_p, W m^{-1} K^{-1}$	Siltumvadītspējas koeficients (KŠM) $\lambda_{KŠM}, W m^{-1} K^{-1}$	Vidējais siltumvadītspējas koeficients KŠM (ticamības intervāls) $\lambda_{KŠM, vid, W m^{-1} K^{-1}}$	Standartnovirze	Variācijas koeficients, %
A1	121.0	0.101	0.835	0.14	0.098	0.098		
A2	120.9	0.100	0.827	0.14	0.097	(0.091-0.104)	$7.1 \cdot 10^{-4}$	0.73
B1	121.6	0.148	1.22	0.14	0.146	0.148		
B2	121.6	0.151	1.24	0.14	0.149	(0.129-0.167)	$21.2 \cdot 10^{-4}$	1.43

Iegūtie rezultāti parāda, ka KŠM vidējais siltumvadītspējas koeficients ir būtiski jeb par 34 % augstāks paraugiem ar perpendikulāro KŠM virzienu (B veids) salīdzinājumā ar paraugiem, kuros izmantots KŠM ar paralēlo virzienu (A veids).

No minētā aprēķina izriet, ka no siltumtehnikajām īpašībām, piemēram, būvkonstrukciju izgatavošanai, izdevīgāk izmantot KŠM ar paralēlo virzienu.

KŠM siltumvadītspējas koeficientu salīdzinājums ar citu būvniecībā izmantoto materiālu siltumvadītspējas koeficientiem saskaņā ar literatūru parādīts 3.13. att.



3.13. att. Koksnes šūnveida materiāla un citu būvniecības materiālu siltumvadītspējas koeficientu salīdzinājums:

iekavās norādīts materiāla blīvums ρ kg m⁻³ (Borodiņecs un Krēsliņš, 2007*; LVS EN ISO 10456:2007**; LVS EN 13986:2005***).

Kā redzams 3.13. attēlā, KŠM virziens ietekmē siltumvadītspējas koeficientu. Tas izskaidrojams ar ievērojami augstāko koksnes siltumvadītspēju šķiedru virzienā nekā šķērsām

šķiedrām. Piemēram, egles koksnei šķērsām šķiedrām raksturīgs siltumvadītspējas koeficients $0.11 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, bet šķiedru virzienā uz pusi lielāks $0.22 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ (Niemz, 1993). KŠM paralēlā virzienā nodrošina 1.3 līdz 2.3 reizes zemāku siltumvadītspējas koeficientu nekā būvniecībā plaši izmantotajiem plātņu materiāliem un koksnei šķērsām šķiedrām, savukārt iegūtais rādītājs ir 2.5 līdz 4 reizes augstāks, salīdzinot ar akmens vates un putupoliuretāna siltumvadītspējas koeficientu. KŠM perpendikulārā virzienā noteiktais siltumvadītspējas koeficients ir salīdzināms ar kokšķiedru plātņu un saplākšņu siltumvadītspējas koeficientu, tai pašā laikā tas ir par 13% augstāks nekā masīvkoksnes un kokšķiedru plātnes siltumvadītspējas koeficienti. Salīdzinot ar akmens vates un putupoliuretāna siltumvadītspējas koeficientu, KŠM rādītājs ir 3.8 līdz 6 reizes augstāks.

Pamatojoties uz iegūtajiem siltumvadītspējas rādītājiem, iespējams secināt, ka KŠM paralēlā virzienā var tikt klasificēts kā siltumizolācijas materiāls ar augstu siltumvadītspējas koeficientu, jo tā siltumvadītspējas koeficients $0.098 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1} < 0.1 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$. KŠM perpendikulārā virzienā par 48 % pārsniedz siltumvadītspējas koeficienta robežvērtību $0.1 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, kā rezultātā nav klasificējams kā siltumizolācijas materiāls saskaņā ar standartu DIN 4108-2. Iegūtās siltumvadītspējas koeficienta vērtības ir izmantojamas KŠM konstrukciju siltumtehnikajos aprēķinos. Pētījuma rezultāti apkopoti autora publikācijā (Rozins un Iejavs, 2014).

Secinājumi

1. KŠM paralēlā virzienā raksturo siltumvadītspējas koeficients λ $0.098 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, savukārt materiāla perpendikulārā virzienā λ $0.148 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$. KŠM siltumvadītspējas koeficients paralēlā virzienā ir par 34 % zemāks nekā KŠM siltumvadītspējas koeficients perpendikulārā virzienā.
2. Vērtējot materiāla termiskās īpašības, var apgalvot, ka KŠM paralēlā virzienā ir daudz efektīvāks būvkonstrukciju izgatavošanai, salīdzinot ar materiālu perpendikulārā virzienā.
3. KŠM siltumvadītspējas koeficients paralēlā virzienā ir par 25 % zemāks nekā koksnei šķērsām šķiedrām, savukārt perpendikulārā virzienā par 14 % augstāks nekā koksnei šķērsām šķiedrām (λ koksnei šķērsām šķiedrām $0.13 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$). KŠM siltumvadītspēja paralēlā virzienā ir zemāka nekā lielākajai daļai būvniecībā izmantotajiem koksnes plātņu materiāliem, kuru blīvums pārsniedz 500 kg m^{-3} .
4. KŠM paralēlā virzienā var tikt klasificēts kā siltumizolācijas materiāls ar augstu siltumvadītspējas koeficientu. Koksnes šūnveida materiāls perpendikulārā virzienā nav klasificējams kā siltumizolācijas materiāls. Iegūtās KŠM siltumvadītspējas koeficientu vērtības ir izmantojamas nasegtu KŠM konstrukciju siltumtehnikajos aprēķinos, piemēram, trīskārtu paneļu siltumtehnikajiem aprēķiniem, kuros KŠM tiek abpusēji aplīmēts ar citu materiālu.

3.3. Materiāli un metodes fizikāli-ķīmisko īpašību noteikšanai

Koksnes šūnveida materiāls no citiem koksnes materiāliem atšķiras ar tā uzbūvi. Koksnes šūnveida materiālā iekšējās un ārējās kārtās ir mehāniski izveidoti, aptuveni 40 % gaisa ieslēgumi, kuri palielina degšanas laukumu un skābekļa piekļuvi degšanas vietai. Pēc savas uzbūves KŠM var definēt kā termiski plānu, jo, neskatoties uz pārbaudei pakļautā materiāla faktisko biezumu, materiālu veido 3-5 mm plāni koksnes elementi. Minētie apstākļi ļauj KŠM prognozēt sliktākus ugunsreakcijas parametrus nekā priedes masīvkoksnei. Pētījuma mērķis ir noskaidrot KŠM virziena ietekmi uz materiāla uguns reakcijas parametriem un ugunsreakcijas klasi. Visiem materiāliem, kurus vēlas izmantot būvniecībā, jāveic ugunsreakcijas parametru noteikšana un klasifikācija kādā no ugunsreakcijas klasēm.

Iegūtie KŠM ugunsreakcijas rādītāji salīdzināti ar literatūrā norādītajiem masīvkoksnes un plātņu materiālu ugunsreakcijas rādītājiem.

Ugunsreakcijas pārbaudes veiktas KŠM abos virzienos, izmantojot D ugunsreakcijas klasei atbilstošās standarta pārbaudes metodes: LVS EN 13823 vienotās dedzināšanas iekārtas (SBI) testu un LVS EN ISO 11925-2 atsevišķa liesmas avota testu.

SBI pārbaudēs izmantoti divdaļīgi lielizmēra paraugi, kas, saskrūvēti kopā 90° leņķī, veido stūri. Mazākās daļas izmēri ir 500 un 1500 mm, lielākās daļas izmēri ir 1000 un 1500 mm. Pārbaudot materiālu paralēlā virzienā, tiek izmantots divu kārtu KŠM ar kopējo biezumu 56 mm (atsevišķas kārtas biezums 28 mm). Savukārt materiāls perpendikulārā virzienā veidots no 56 mm biezām KŠM kārtām ar caurejošu struktūru, skat. 3.14. att.



3.14. att. Koksnes šūnveida materiāla virziens vienotās dedzināšanas pārbaudes iekārtā:

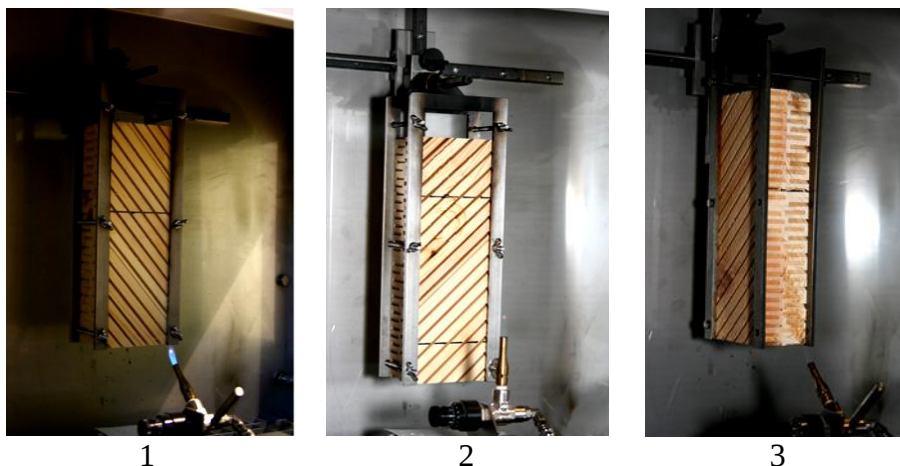
1 - paralēlais un 2 - perpendikulārais.

Katram materiāla virzienam izgatavoti 3 paraugi. Pirms testu veikšanas abu virzienu paraugi tika kondicionēti standarta atmosfērā pie 23 °C temperatūras un 50 % relatīvā gaisa mitruma saskaņā ar standarta LVS EN 13238 prasībām līdz konstantai masai. Pēc paraugu kondicionēšanas ar svēršanas uz dimensiju uzmērīšanas paņēmieni tika noteikts paraugu vidējais blīvums. Paraugi montēti pārbaudes iekārtā bez papildu pamatnes ar 80 mm gaisa spraugu starp KŠM un kalcija silikāta aizmugures plātnēm saskaņā ar standarta LVS EN 13823 5.2.2 punkta montāžas shēmu. Lai materiālu klasificētu D ugunsreakcijas klasē, ir jāvērtē pārbaudēs iegūtās ugunsgrēka attīstības ātruma indeksa (FIGRA) vērtības. FIGRA vērtībām jābūt mazākām par $\leq 750 \text{ W s}^{-1}$. Papildus jāvērtē dūmu un liesmojošu pilienu daļiņu veidošanās. Ja iegūtās ugunsgrēka attīstības ātruma indeksa vērtības ir $\leq 250 \text{ W s}^{-1}$, materiālam ir potenciāls tikt klasificētam augstākā ugunsreakcijas klasē nekā tikai D.

Atsevišķa liesmas avota pārbaudei saskaņā ar standartu LVS EN ISO 11925-2 izgatavoti 9 paraugi, katram materiāla virzienam 3. Trīs paraugi pārbaudīti, liesmu pieliekot materiāla virsmai, trīs - liesmas pieliekot apakšējai šķautnei, un trīs - liesmas pieliekot apakšējai sānu šķautnei. Izgatavoto paraugu izmēri: biezums 56 mm, platums 90 mm un garums 250 mm. Paraugiem, kas paredzēti liesmu pielikšanai to virsmai, tika veiktas kontrolzīmes 40 un 190 mm attālumā no parauga apakšējās malas, savukārt paraugiem, paredzētiem liesmu pielikšanai apakšējai šķautnei un apakšējai sānu šķautnei, tika veikta kontrolzīme 150 mm attālumā no apakšējās šķautnes.

Visi paraugi pirms pārbaudes veikšanas tika kondicionēti standarta atmosfērā pie 23 °C temperatūras un 50 % relatīvā gaisa mitruma saskaņā ar standarta LVS EN 13238 prasībām līdz konstantai masai.

KŠM montāža pārbaudes iekārtā parādīta 3.15. att.



3.15. att. Koksnes šūnveida materiāla montāža atsevišķas liesmas avota pārbaudes iekārtā atkarībā no liesmas pielikšanas veida:

1 - liesmu pieliekot apakšējais šķautnei, 2 - liesmu pieliekot materiāla virsmai un 3 - liesmu pieliekot apakšējais sānu šķautnei.

Iepriekš aprakstītie montāžas paņēmieni ļauj novērtēt atsevišķa liesmas avota ietekmi uz KŠM gan paralēlā, gan perpendikulārā materiāla virzienā. Liesmas iedarbības novērtēšanai saskaņā ar standartu LVS EN 13501-1+A1 izmanto D ugunsreakcijas klasei atbilstošo liesmas pielikšanas laiku 30 s un kopējo pārbaudes laiku 60 s. Liesmas iedarbības novērtēšanas kritērijs ir 150 vai 190 mm kontrolzīmes sasniegšana 60 s laikā. Ja degoša liesma sasniedz kontrolzīmi, materiāls neizpilda D ugunsreakcijas klasei izvirzītās prasības attiecībā uz liesmas iedarbību, un to ir iespējams klasificēt zemākā ugunsreakcijas klasē. Sešdesmit sekunžu laikā nesasniedzot kontrolzīmi, materiāls izpilda D ugunsreakcijas klases materiāliem izvirzītās prasības.

3.4. Rezultāti un diskusija fizikāli-ķīmisko īpašību noteikšanai

Vienotās dedzināšanas iekārtā pārbaudīti četri KŠM paraugi. Trīs materiāla paralēlajā virzienā un viens paraugs materiāla perpendikulārajā virzienā. Perpendikulārā virziena parauga KŠM₉₀₋₁ pārbaude pārtraukta 381 s pēc testa sākuma, paraugam sasniedzot SBI iekārtā maksimāli atļauto degšanas jaudu 350 kW. Turpmāka pārbaudes veikšana varētu izraisīt būtiskus iekārtas bojājumus. Pārbaudes laikā iegūtais ugunsgrēka attīstības ātruma indekss FIGRA ir 1426 W s⁻¹, savukārt kopējā siltuma izdalīšanās 600 s laikā THR_{600s} 108 MJ. Iegūtā vērtība par 90 % pārsniedz D ugunsreakcijas klases ugunsgrēka attīstības ātruma indeksa robežvērtību 750 W s⁻¹. Iegūtā ugunsgrēka attīstības ātruma indeksa vērtība, KŠM pārbaudot perpendikulārā virzienā, neļauj to klasificēt D ugunsreakcijas klasē. Lai arī D ugunsreakcijas klases kritērijus perpendikulārais materiāla virziens neiztur, papildus ir analizēta iegūtās dūmu palielināšanās ātruma SMOGRA vērtība 127 cm² s⁻² un TSP 600 s laikā TSP_{600s} 63 m². Tādējādi iespējams secināt, ka iegūtās vērtības nesasniedz dūmu veidošanās indeksa s₂ robežvērtības: SMOGRA 180 m² s⁻² un TSP_{600s} 200 m². Pēc dūmu izdalīšanās rakstura KŠM perpendikulārā virzienā var piešķirt dūmu veidošanās indeksu s₂. Sešsimt sekunžu laikā no pārbaudes sākuma netika novērota liesmojošu pilienu vai daļiņu veidošanās, kas ļauj materiālam piešķirt liesmojošo pilienu un daļiņu indeksu d₀.

Lai materiālu ar konkrēto virzienu klasificētu zemākā E ugunsreakcijas klasē, tas jāpārbauda ar atsevišķa liesmas avota pārbaudes metodi. Saistībā ar pārāk augsto materiāla degšanas jaudu pārējie divi SBI pārbaudei sagatavotie perpendikulārā virziena paraugi netika izmantoti materiāla ugunsreakcijas klasificēšanai D ugunsreakcijas klasē.

KŠM 3 paraugu pārbaudes rezultāti SBI iekārtā, materiālu pakļaujot liesmas iedarbībai paralēlā virzienā, apkopoti 3.8. tabulā.

3.8. tabula

Koksnes šūnveida materiāla ugunsreakcijas parametri paralēlā virzienā

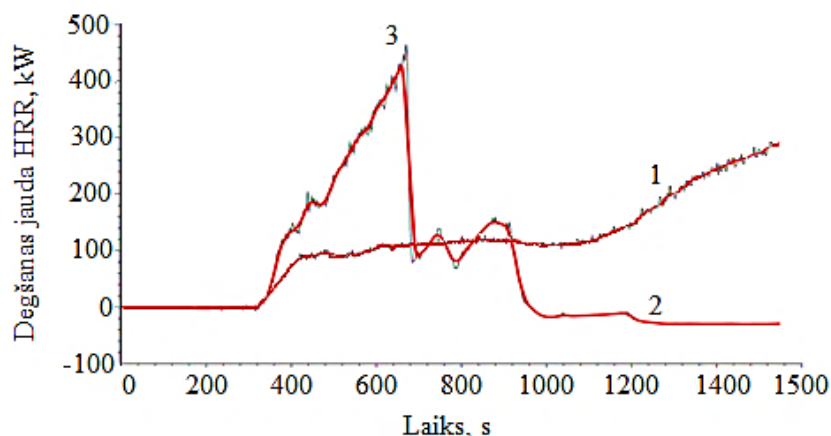
Parauga marķējums	FIGRA, W s^{-1}	THR _{600s} , MJ	SMOGR, $\text{m}^2 \text{s}^{-2}$	TSP _{600s} , m^2
KŠM ₀ -1	669	67	21.1	84.3
KŠM ₀ -2	741	56	17.6	37.0
KŠM ₀ -3	679	52	73.4	84.4
Vidējā vērtība	696	58	37.4	68.6
SD	39	8	31.3	27.3
VAR, %	6	13	84	40

Aprēķinātā ugunsgrēka attīstības ātruma indeksa FIGRA vidējā vērtība ir par 7 % zemāka (696 W s^{-1}) par D ugunsreakcijas klasei pieļaujamo robežvērtību 750 W s^{-1} . KŠM paralēlā virziena FIGRA vērtība par 117 % pārsniedz literatūrā minēto priedes koksnes ugunsgrēka attīstības ātruma indeksa vērtību 321 W s^{-1} (Mayes and Oksanen, 2003). Šī atšķirība skaidrojama ar būtiski lielāku uguns ietekmei pakļauto materiāla laukumu, KŠM salīdzinot ar masīvkoksni. Degšanas procesu veicina arī KŠM uzbūve, liesmai iedarbojoties ne tikai uz materiāla virsmu, bet arī šķautnēm, kas izveidojušās rievu iezāgēšanas vietās. Neskatoties uz to, ka uguns iedarbībai pakļautais laukums KŠM ir lielāks nekā masīvkoksnes gadījumā, SBI iekārtā noteiktās ugunsgrēka attīstības ātruma indeksa vidējās vērtības ļauj materiālu klasificēt D ugunsreakcijas klasē. Nevienam no trim pārbaudītajiem paraugiem FIGRA vērtība nepārsniedz šīs klases robežvērtību.

Analizējot pārbaudes papildu rādītājus dūmu palielināšanās ātruma SMOGRA vidējo vērtību $37 \text{ cm}^2 \text{s}^{-2}$ un kopējo dūmu izdalīšanos 600 s laikā TSP_{600s} 69 m^2 , var secināt, ka iegūtās vērtības pārsniedz dūmu veidošanās indeksa s1 robežvērtības SMOGRA $30 \text{ m}^2 \text{s}^{-2}$ un TSP_{600s} 50 m^2 , bet nesasniedz indeksa s2 robežvērtības SMOGRA $180 \text{ m}^2 \text{s}^{-2}$ un TSP_{600s} 200 m^2 . Pēc dūmu izdalīšanās rakstura KŠM perpendikulārā virzienā var piešķirt dūmu veidošanās indeksu s2. Liesmojošu pilienu vai daļiņu veidošanās netika novērota 600 s laikā no pārbaudes sākšanas, kas ļauj materiālam piešķirt liesmojošo pilienu un daļiņu indeksu d0.

KŠM abu virzienu degšanas jaudas HRR salīdzinājums parādīts 3.16. attēlā. Salīdzinot degšanas dinamiku abiem KŠM virzieniem, gan pārbaudes sākumā, gan pārbaudes gaitā materiāla perpendikulārā virzienā var novērot ievērojami augstāku degšanas jaudu nekā paralēlā virzienā. Tas saistīts ne tikai ar lielāku uguns iedarbībai pakļauto materiāla laukumu materiāla perpendikulārajā virzienā, bet arī ar papildu skābekļa pieplūdi pa materiāla kanāliem no parauga aizmugurējās daļas.

Lai veiktu materiāla klasificēšanu D ugunsreakcijas klasē, tas līdzās SBI testam jāpārbauda ar atsevišķa liesmas avota pārbaudes metodi - saskaņā ar standartu LVS EN ISO 11925-2. Pārbaudēm tika pakļauti 9 paraugi: 3 paraugi, liesmu pieliekot materiāla virsmai, 3 paraugi, liesmu pieliekot apakšējai šķautnei, un 3 paraugi, liesmu pieliekot apakšējai sānu šķautnei. Šie montāžas paņēmieni ļauj novērtēt atsevišķa liesmas avota ietekmi uz koksnes šūnveida materiālu gan paralēlā, gan perpendikulārā materiāla virzienā.



3.16. att. Koksnes šūnveida materiāla degšanas jaudas HRR dinamika:

1 - materiāls paralēlā virzienā, 2 - materiāls perpendikulārā virzienā un 3 - pārsniedzot degšanas jaudu 350 kW, perpendikulārā virziena parauga pārbaude pārtraukta.

Atsevišķa liesmas avota pārbaudes rezultāti apkopoti 3.9. tabulā.

3.9. tabula

Koksnes šūnveida materiāla atsevišķa liesmas avota pārbaudes rezultāti

Parauga Nr.	Parauga virziens	Liesmas pielikšanas vieta	Liesmas pielikšanas laiks, s	Liesma sasniedz 150 mm atzīmi - laiks, s	Liesmas radītais bojājums, mm	Filtrpapīra aizdegšanās, jā/nē
1	KŠM ₀	virsmā	30	-	120	nē
2	KŠM ₀	virsmā	30	-	100	nē
3	KŠM ₀	virsmā	30	-	110	nē
4	KŠM ₀	apakšējā šķautne	30	-	80	nē
5	KŠM ₀	apakšējā šķautne	30	-	100	nē
6	KŠM ₀	apakšējā šķautne	30	-	80	nē
7	KŠM ₉₀	sānu šķautne	30	54	170	nē
8	KŠM ₉₀	sānu šķautne	30	50	190	nē
9	KŠM ₉₀	sānu šķautne	30	57	170	nē

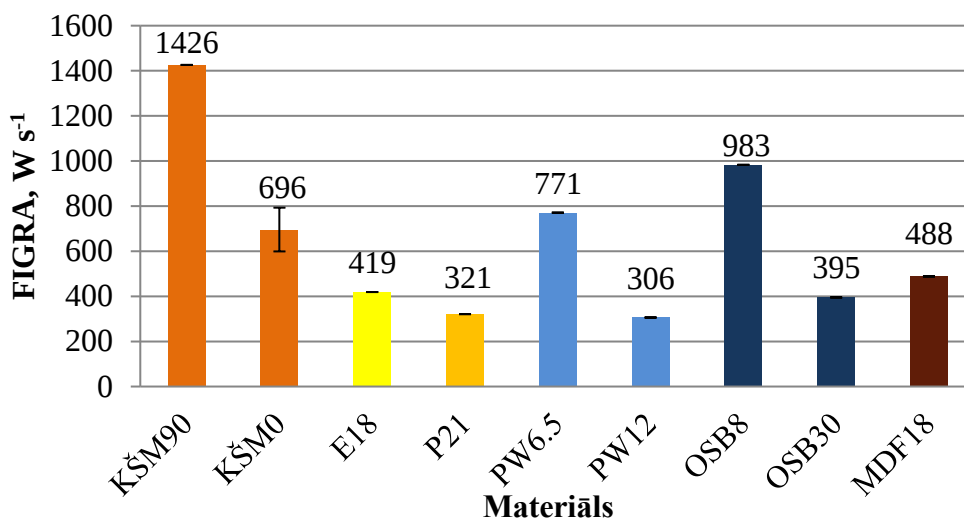
Pārbaudes laikā pieliekot liesmu gan virsmā, gan sānu šķautnei, novērota parauga aizdegšanās aptuveni 4-8 s laikā.

Analizējot 3.9. tabulas rezultātus, varam secināt, ka pārbaudītie paralēlā virziena paraugi, liesmu pieliekot materiāla virsmā un apakšējai šķautnei, izpilda D ugunsreakcijas klases prasības, jo liesma 60 s laikā nerasniedz kontrolatzi un filtrpapīrs neaizdegas. Pēc degļa noņemšanas 60 s pēc pārbaudes sākuma paraugi turpina degt, un tie tiek nodzēsti manuāli.

Perpendikulārā virziena paraugiem liesmu pieliekot apakšējai šķautnei, 150 mm kontrolatzi tiek sasniegta 50-57 s laikā, tādējādi KŠM perpendikulārā virzienā neiztur D ugunsreakcijas klases materiāliem izvirzītās prasības. Ņemot vērā vidējo laiku, kurā perpendikulārā virziena paraugiem tiek sasniegta 150 mm kontrolatzi un E ugunsreakcijas klases materiāliem liesmas iedarbības ilgumam samazinātās prasības 15 s, veicot papildu pārbaudes materiāla perpendikulārā virziena virsmā, materiālam tiek prognozēta E ugunsreakcijas klase.

KŠM virziens atstāj būtisku ietekmi uz materiāla ugunsreakcijas parametriem. KŠM perpendikulārā virziena FIGRA vērtība (1426 W s^{-1}) par 105 % pārsniedz materiāla paralēlā virziena FIGRA vērtību (696 W s^{-1}).

KŠM abu virzienu ugunsgrēka attīstības ātruma indeksu un kopējā siltuma izdalīšanās 600 s laikā salīdzinājums ar literatūrā norādītajiem masīvkoksnes un plātņu materiālu rādītājiem parādīts 3.17. un 3.18. attēlā.

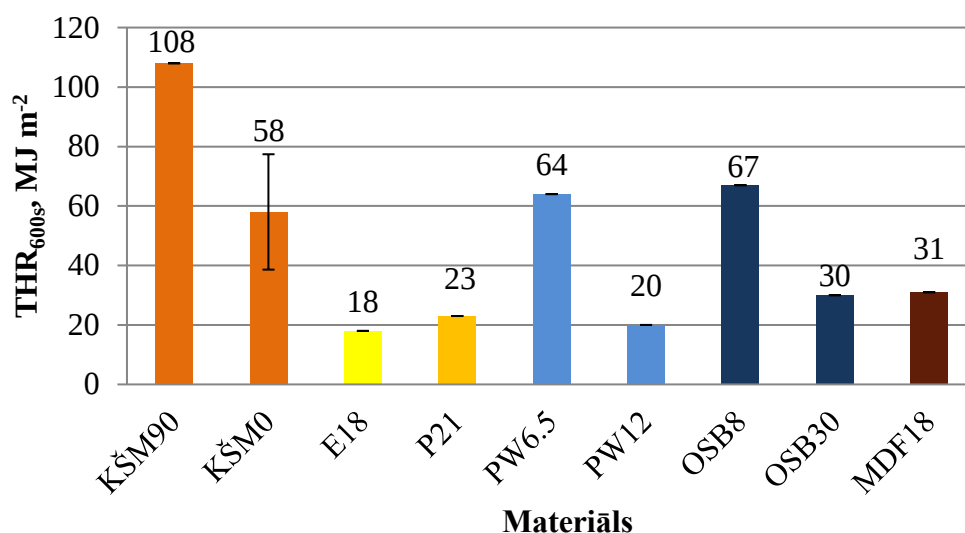


3.17. att. Ugunsgrēka attīstības ātruma indeksa FIGRA salīdzinājums koksnes šūnveida materiālam, masīvkoksnei un plātņu materiāliem:

KŠM₉₀ - koksnes šūnveida materiāls perpendikulārā virzienā, KŠM₀ - koksnes šūnveida materiāls paralēlā virzienā, E18 - egles koksne (biezums 18 mm), P21 - priedes koksne (21 mm), PW6.5 - bērza saplāksnis (6.5 mm), PW12 - bērza saplāksnis (12 mm), OSB8 - orientēto skaidu plātne (8 mm), OSB30 - orientēto skaidu plātne (30 mm) un MDF18 - vidēja blīvuma kokšķiedru plātne (18 mm). (Bukšāns, 2010; Mayes, 2003; Reaction to, 2009).

Kā redzams 3.17. un 3.18. attēlā, KŠM virzienam un plātņu materiālu biezumam ir būtiska ietekme uz ugunsreakcijas parametriem. Materiāla biezumam samazinoties, ugunsreakcijas parametri vienam un tam pašam materiālam būtiski palielinās. KŠM perpendikulārajā virzienā noteiktā FIGRA vērtība 1426 W s⁻¹ ir par 45 līdz 366 % augstāka nekā priedes, egles koksnei un plaši būvniecībā izmantotajiem plātņu materiāli. Tas izskaidrojams ar konstruktīvi veidotiem kanāliem pa materiāla biezumu, kuri palielina degšanas laukumu un skābekļa piegādi degšanas zonā.

Paralēlā virzienā noteiktais KŠM ugunsgrēka attīstības ātruma indekss 696 W s⁻¹ ir 43 līdz 127 % augstāks par termiski biezu koksnes materiālu (biezums > 10 mm) FIGRA vērtību. Savukārt tas ir par 10 līdz 29 % zemāks, salīdzinot ar termiski plānu bērza saplāksni un orientēto kokskaidu plātņi. To var izskaidrot ar materiāla degšanas līdzību termiski plāniem materiāliem un KŠM. Termiski plāni materiāli salīdzinoši ātri izdeg, un to degšanas procesā iesaistās uguns iedarbībai sākotnēji nepakļautā parauga puse, tādējādi palielinot degšanas laukumu. Vienlaikus degšanas zonā pa izdegušo caurumu piekļūst skābeklis, kas veicina materiāla degšanu. KŠM paralēlā virzienā jau sākotnēji ir veidots no termiski plānām materiāla daļām un iezāģējumiem, kuri veicina papildu skābekļa piegādi degšanas zonā.



3.18. att. **Kopējā siltuma izdalīšanās 600 s laikā THR_{600s} salīdzinājums koksnes šūnveida materiālam, masīvkoksnei un plātņu materiāliem:**

apzīmējumus skat. 3.17. att.

Līdzīgas rādītāju proporcijas iespējams novērot, salīdzinot KŠM, masīvkoksnes un plātņu materiālu kopējo siltuma izdalīšanos 600 s laikā. KŠM perpendikulārajam virzienam noteiktā THR_{600s} vērtība ir par 86 % augstāka nekā paralēlajam virzienam. KŠM perpendikulārā virziena THR_{600s} vērtība 108 MJ ir par 61 līdz 500 % augstāka nekā pārējiem koksnes materiāliem. Savukārt paralēlā virziena THR_{600s} vērtība 58 MJ ir par 87 līdz 222 % augstāka, salīdzinot ar termiski biezu plātņu materiālu THR_{600s}, un par 9 līdz 13% zemāka, salīdzinot ar termiski plānu bērza saplākšņu un orientēto kokskaudu plātņu THR_{600s}.

Secinājumi

1. KŠM virzienam ir būtiska ietekme uz materiāla ugunsreakcijas parametriem. KŠM degšanas jauda, ugunsgrēka attīstības ātruma indekss un liesmas izplatīšanās rādītāji ir augstāki materiāla perpendikulārajam virzienam, salīdzinot ar materiāla paralēlo virzienu.
2. KŠM perpendikulārā virziena ugunsgrēka attīstības ātruma indeksa vērtība ir (1426 W s^{-1}) par 105 % lielāka nekā materiāla paralēlā virzienā (696 W s^{-1}), un kopējā siltuma izdalīšanās 600 s laikā ir (108 MJ) par 86 % lielāka nekā materiāla paralēlajā virzienā (58 MJ).
3. Koksnes šūnveida materiālam paralēlā virzienā pēc vienotās dedzināšanas iekārtas un atsevišķa liesmas avota pārbaudēm tiek prognozēta D ugunsreakcijas klase, piešķirot dūmu veidošanās indeksu s1, liesmojošo pilienu un daļiņu indeksu d0.
4. KŠM perpendikulārā virzienā neizpilda D ugunsreakcijas klases kritērijus ne pēc vienotās dedzināšanas iekārtas pārbaudes, ne pēc atsevišķa liesmas avota pārbaudēm. Ņemot vērā iegūtos rādītājus atsevišķa liesmas avota pārbaudēs, KŠM tiek prognozēta E ugunsreakcijas klase.
5. KŠM perpendikulārā virzienā ugunsreakcijas parametri būtiski pārsniedz masīvkoksnes un plātņu materiālu ugunsreakcijas parametrus. KŠM uzbūve paralēlā virzienā nodrošina līdzīgus ugunsreakcijas parametrus - kā termiski plāniem koksnes plātņu materiāliem.
6. Ņemot vērā būtisko atšķirību starp KŠM un termiski biezu materiālu ugunsreakcijas parametriem, būvniecības vajadzībām tiek rekomendēta materiāla ugunsreakcijas īpašību uzlabošana ar konstruktīvajiem paņēmieniem.

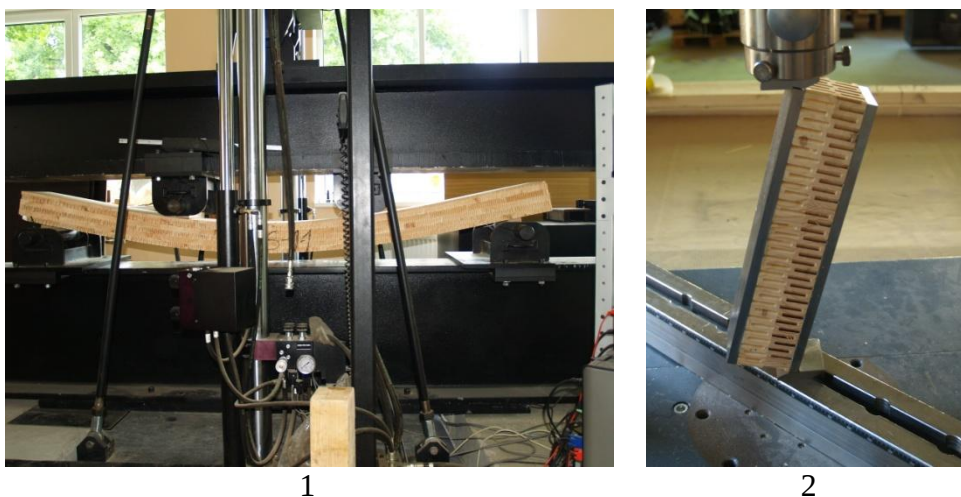
3.5. Materiāli un metodes mehānisko īpašību noteikšanai

3.5.1. Robežstiprība un elastības modulis liecē, spiedē, stiepē un bīdē

Promocijas darba izstrādes gaitā priedes KŠM noteiktas šādas mehāniskās īpašības: robežstiprība un lokālais elastības modulis statiskajā liecē; robežstiprība un elastības modulis statiskajā spiedē; robežstiprība un elastības modulis statiskajā stiepē; robežstiprība un elastības modulis statiskajā bīdē. Tā kā pētījuma mērķis ir iegūt projektēšanas un modelēšanas vajadzībām nepieciešamās šūnveida materiāla mehānisko īpašību raksturlielumu vērtības, materiālu testēšanā izmantotas konstrukciju kokmateriālu un līmēto konstrukciju kokmateriālu testēšanas standarta LVS EN 408+A1 pārbaudes metodes. Apstrādājot testēšanas gaitā iegūtos rādītājus saskaņā ar standarta LVS EN 14358 aprēķinu metodiku, iegūtas mehānisko rādītāju raksturlielumu vērtības projektēšanas vajadzībām.

KŠM bloka uzbūve platumā un garumā ir vienāda, tādējādi mehāniskās īpašības jānosaka tikai diviem tā virzieniem ar atšķirīgu uzbūvi un elementu orientāciju. Materiāla platumā vai garumā, kas tiek definēta kā paralēlais virziens (indekss pie mehāniskās īpašības apzīmējuma - 0) un materiāla biezumā, kas tiek definēts kā perpendikulārais virziens (indekss pie mehāniskās īpašības apzīmējuma - 90).

Visi mehānisko īpašību noteikšanas paraugi pirms pārbaudēm kondicionēti standarta atmosfērā pie relatīvā gaisa mitruma 65 ± 5 % un temperatūras 20 ± 2 °C līdz konstantai masai saskaņā ar testēšanas standarta LVS EN 408+A1 prasībām. Līdzīgi kā masīvkoksnei, KŠM mehāniskās īpašības būtiski ietekmē materiāla mitrums un blīvums. Pētījumā izmantotajam materiālam raksturīgs vidējais koksnes mitrums 12.5 % un blīvums 307 kg m^{-3} , skat. 3.2.2. nodaļu. Lai noteiktu KŠM robežstiprību f_m un lokālo elastības moduli $E_{m,l}$ četrpunktu liecē, statiskās lieces tests tika veikts, izmantojot Instron 600 kN materiālu testēšanas iekārtu. Pārbaude tika veikta saskaņā ar standarta LVS EN 408+A1 9. un 19. punkta metodiku (skat. 3.19. att.).



3.19. att. Koksnes šūnveida materiāla slogošanas princips
materiāla paralēlajā virzienā:

1 - četrpunktu lieces pārbaude un 2 - bīdes pārbaude.

Katram materiāla virzienam, lieces pārbaudei izmantoti 8 lielizmēra KŠM paraugi ar biezumu 136 mm, platumu 280 mm un garumu 2500 mm. Saistībā ar ierobežoto lieces paraugu garumu apakšējo balstu attālums samazināts no 18 parauga biezumiem līdz 16 paraugu biezumiem, un tas bija 2176 mm. Lai noteiktu robežstiprību spiedē f_c , stiepē f_t un atbilstošos elastības modulius spiedē E_c un stiepē E_t statiskās spiedes un stiepes pārbaudes tika veiktas, izmantojot Zwick Z100 materiālu pārbaudes iekārtu. Stiepes un spiedes pārbaudes veiktas saskaņā ar standarta LVS EN 408+A1 16. un 17. punkta prasībām. Lai noteiktu KŠM

robežstiprību spiedē abiem materiāla virzieniem, izgatavoti 30 kubveida paraugi ar malas garumu 112 mm. Lai noteiktu KŠM robežstiprību stiepē f_t , elastības moduli stiepē E_t un elastības moduli spiedē E_c , abiem paraugu veidiem un katrai īpašībai izgatavoti astoņi paraugi ar garumu un platumu 112 mm un augstumu 224 mm. Abiem materiāla virzieniem bīdes robežstiprība f_v un bīdes elastības modulis G noteikts, izmantojot standarta LVS EN 408+A1 18. punkta pārbaudes principu, no iegūtajiem spēka un pārvietojuma grafikiem saskaņā ar standarta ASTM C 273-00 8.2. punkta metodiku aprēķinātas bīdes elastības moduļa vērtības. Robežstiprības un elastības moduļa noteikšanai izmantoti 8 paraugi ar garumu 300 mm un šķērsriezuma izmēriem 56 mm (skat 3.19. att.).

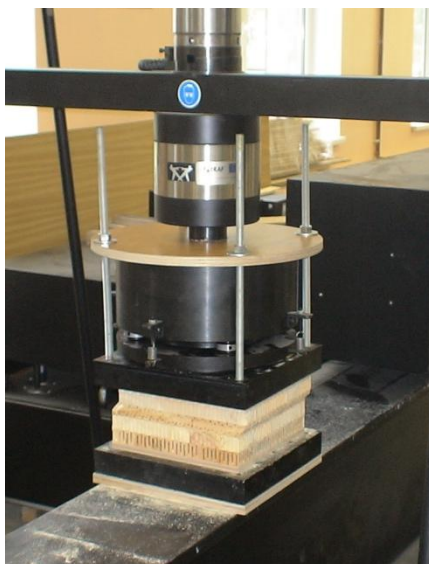
Visās iepriekš minētajās pārbaudēs ir nodrošināts tāds sloģošanas ātrums, lai materiāla pilnīga sagrāve notiktu 300 ± 120 s robežās. Katrai mehāniskajai īpašībai aprēķinātas vidējās vērtības un standartnovirzes. Lai salīdzinātu abu materiāla virzienu iegūtos rādītājus liela izmēra paraugkopām ($n > 10$), vidējās vērtības salīdzinātas izmantota neatkarīgu paraugkopu t -testa metodi ar p -vērtības pieeju pie ticamības līmeņa 95 %. Mazu paraugkopu gadījumā salīdzināti vidējo vērtību ticamības intervāli. Projektēšanas vajadzībām aprēķinātas visu mehānisko rādītāju 5 % kvantiļa raksturlielumu vērtības saskaņā ar standarta LVS EN 14358 aprēķinu metodiku. 5 % kvantiļa raksturlieluma vērtības tiek definētas kā rādītāju izkliedes zemākās 5 % kvantiļa raksturlieluma vērtības, kas noteiktas paraugiem pie koksnē līdzsvara mitruma 12 %.

3.5.2. Ģeometrisko izmēru ietekme uz mehāniskajām īpašībām

Pamatojoties uz iepriekš veiktajiem pētījumiem par KŠM mehāniskajām īpašībām (Iejavs un Spulle, 2013^b) un KŠM izgatavošanas tehnoloģiju, šajā nodaļā apskatīta KŠM ģeometrisko izmēru un laukuma ietekme uz materiāla mehāniskajām īpašībām, slogojot to paralēlā virzienā. KŠM paralēlā virziena izmantošana trīskārtu būvniecības paneļu izgatavošanā tiek uzskatīta par ekonomiski izdevīgāko risinājumu saistībā ar mazāku izgatavošanas operāciju skaitu, salīdzinot ar perpendikulāro virzienu.

Pētījumā tika noteikta KŠM izmēru un laukuma ietekme uz sešām KŠM mehāniskajām īpašībām: robežstiprību un elastības moduli statiskajā četrpunktu liecē; robežstiprību un elastības moduli statiskajā spiedē, kā arī robežstiprību un elastības moduli statiskajā bīdē. Visi paraugi pirms izmēru un mehānisko īpašību noteikšanas tika kondicionēti līdz konstantai masai pie relatīvā gaisa mitruma 65 ± 5 % un temperatūras 20 ± 2 °C. Robežstiprība statiskajā liecē $f_{m,0}$ un lokālais lieces elastības modulis $E_{l,m,0}$ noteikts, slogojot KŠM četrpunktu liecē, izmantojot iekārtas Instron 600 kN un Zwick Z100 ar deformāciju mērīšanas indikatoriem. Pārbaude balstīta uz standarta LVS EN 408+A1 9. un 19. punkta pārbaudes principu.

Robežstiprība $f_{c,0}$ un elastības modulis $E_{c,0}$ statiskajā spiedē noteikts, izmantojot iekārtas Instron 600 kN un Zwick Z100 ar deformāciju mērīšanas indikatoriem. Pārbaude balstīta uz standarta LVS EN 408+A1 16. un 17. punkta pārbaudes un aprēķinu metodiku. Robežstiprības spiedē noteikšanas princips parādīts 3.20. attēlā.



3.20. att. Robežstiprības spiedē noteikšanas princips iekārtā *Instron 600 kN*.

Robežstiprības bīdē $f_{v,0}$ noteikšana balstīta uz standarta LVS EN 408+A1 18. punkta pārbaudes un aprēķinu metodiku, savukārt bīdes elastības moduļa G_0 aprēķins balstīts uz standarta ASTM C 273-00 8.2. punkta aprēķinu metodiku, izmantojot pēc standarta LVS EN 408+A1 18. punkta iegūtos slodzes pārvietojuma grafikus. Pārbaudei izmantoti divu un četru kārtu KŠM paraugi ar biezumu 56 mm un 112 mm, kuri ielīmēti starp divām metāla plāksnēm.

Robežstiprības un elastības moduļu rādītāju liecē, spiedē un bīdē noteikšanai izmantoti 150 paraugi, kuru izmēri, saklāto kārtu skaits un pārbaudīto paraugu skaits katrai īpašībai norādīts 3.10. tabulā.

3.10. tabula

Paraugi robežstiprības un elastības moduļu noteikšanai

Rādītājs	Nr.p.k.	Parauga augstums, mm	Parauga platums, mm	Parauga garums, mm	Saklāto kārtu skaits, gab.	Paraugu skaits, gab.
Robežstiprība $f_{m,0}$ un lokālais elastības modulis $E_{l,m,0}$ liecē	1	56	112	1120	2	4
	2		280			4
	3		600			2
	4	112	112	2240	4	4
	5		280			4
	6		600			2
Robežstiprība spiedē $f_{c,0}$	1	56	56	56	2	10
	2		112	112		8
	3		280	280		6
	4	112	56	56	4	8
	5		112	112		30
	6		280	280		4
	7	224	56	56	8	8
	8		112	112		8
	9		280	280		6

3.10. tabulas noslēgums

Rādītājs	Nr.p.k.	Parauga augstums, mm	Parauga platums, mm	Parauga garums, mm	Saklāto kārtu skaits, gab.	Paraugu skaits, gab.
Elastības modulis spiedē $E_{c,0}$	1	224	112	112	8	6
	2		280	280		8
Robežstīprība bīdē $f_{v,0}$ un bīdes elastības modulis G_0	1	56	28	300	2	8
	2		56	300		8
	3		112	300		8
	4	112	28	520	4	4
	5		56	520		4
	6		112	520		4

Visās pārbaudēs spēks tika pielikts ar konstantu slogošanas galvas padeves ātrumu - tā, lai paraugu sagrāve notiktu 300 ± 120 s laikā. Visi paraugi tika slogoti līdz pilnīgai sagrāvei. KŠM ģeometrisku izmēru ietekmes novērtēšanai uz KŠM mehāniskajām īpašībām izmantotas šādas metodes: korelācijas, regresijas un dispersijas analīzes metode. Tika noteikti paraugu grupu vidējie ģeometrisku izmēru un laukuma rādītāji, kā arī tika noteiktas KŠM sešu stīprības un elastības rādītāju vidējās vērtības. Vidējo vērtību salīdzināšanai izmantota Stjudenta t-testa metode ar p -vērtības (ticamības līmenis 95 %) pieeju.

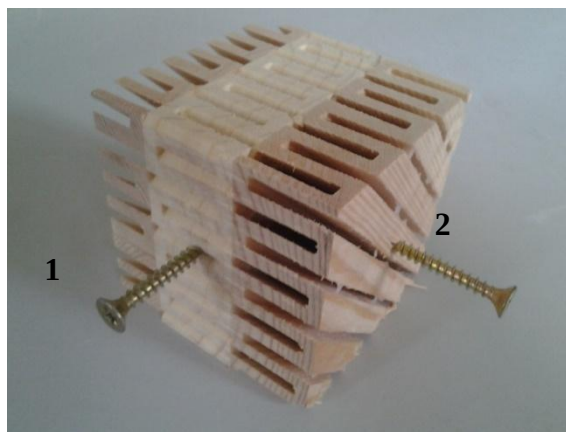
3.5.3. Mehānisko stiprinājumu - kokskrūvju izraušanas pretestība

KŠM savstarpējās savienošanas iespēju izpētei novērtēta skrūves ieskrūvēšanas vietas, dziļuma, skrūves diametra un ieskrūvēšanas veida ietekme uz skrūves izraušanas pretestību.

Eksperimentālā pētījuma metodika balstīta uz modificētu standarta LVS EN 320 pārbaudes metodiku. Skrūvju izraušanas pretestība tiek noteikta, izmērot spēku, kas nepieciešams, lai noteiktā dziļumā ieskrūvētu skrūvi paralēli asij izvilkto no parauga. Skrūvju izraušanas pretestības noteikšanai atkarībā no skrūves ieskrūvēšanas dziļuma un ieskrūvēšanas vietas KŠM izgatavoti 120 kubveida paraugi ar malas garumu 75 mm. Skrūvju izraušanas pretestība novērtēta divām atšķirīgām šūnveida materiāla plāknēm, katrā skrūvi ieskrūvējot 3 dažādos dziļumos (14, 42 un 70 mm). Pētījumā izmantota standarta kokskrūve SPEC17, kuru raksturo šādi parametri: skrūves garums 120 mm; vītnes garums 70 mm; vītnes ārējais diametrs 6 mm; vītnes iekšējais diametrs 3.7 mm; kāta diametrs 4.2 mm; vītnes solis 2.6 mm. Minētajai skrūvei nav aizurbšanas rievas. SPEC17 skrūve raksturo mazumtirdzniecības tīklā pieejamo kokskrūvju kvalitāti. Minētās skrūves tiek izplatītas bez atbilstības deklarācijas izmantošanai slodzi nesošās konstrukcijās.

Skrūves ieskrūvēšanas virzieni KŠM parādīti 3.21. att.

Katram šūnveida materiāla skrūves ieskrūvēšanas virzienam un dziļumam, skrūves izraušanas pretestības noteikšanai izmantoti vismaz 20 paraugi, no kuriem 10 paraugos skrūve ieskrūvēta šūnveida materiālā tā, lai panāktu maksimālo iespējamo skrūvju izraušanas pretestību, savukārt pārējiem 10 paraugiem tā, lai panāktu minimāli iespējamo skrūves izraušanas pretestību. Minētajās vietās ieskrūvējot skrūves, iespējams iegūt lielāko maksimāli iespējamo skrūvju izraušanas pretestības izkriedi, lai precīzi raksturotu nosakāmos skrūvju izraušanas pretestības rādītājus.



3.21. att. **Skrūves ieskrūvēšanas virzieni koksnes šūnveida materiālā:**

1 - ieskrūvēšanas virziens, materiālu orientējot perpendikulāri; 2 - ieskrūvēšanas virziens, materiālu orientējot paralēli pret skrūves simetrijas asi.

Lai iegūtu konstantu masu, arī skrūvju izraušanas šūnveida materiāla paraugi tiek kondicionēti pie vidējā relatīvā gaisa mitruma $65 \pm 5 \%$ un temperatūras $20 \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ tik ilgi, kamēr divu atkārtotu svēršanu starpība 24 stundu laikā neatšķiras vairāk par 0.1% no parauga masas.

Skrūve tiek ieskrūvēta paraugā ar pilnu vītņu daļu 14, 42 un 70 mm ar ieskrūvēšanas precizitāti $\pm 0.5 \text{ mm}$. Skrūves izraušanas pretestības noteikšanai izmantota iekārta Zwick Z100.

Visos gadījumos paraugu slogošana veikta ar konstantu slogošanas galvas padeves ātrumu 10 mm min^{-1} , līdz sasniegts maksimālais iespējamais spēks.

Skrūvju izraušanas pretestība tiek noteikta kā katra virziena un ieskrūvēšanas dziļuma visu 20 maksimālo spēku vidējā vērtība ar paraugkopu raksturojošajiem statistiskajiem rādītājiem: standartnovirzi (*SD*) un variācijas koeficientu (*VAR*).

Lai salīdzinātu skrūvju izraušanas pretestības rādītājus no KŠM ar skrūvju izraušanas pretestības rādītājiem no priedes masīvkoksnes, pēc iepriekš minētās metodikas pārbaudīti arī masīvkoksnes paraugi. Izgatavoto masīvkoksnes paraugu nominālie izmēri: garums šķiedru virzienā 112 mm, platums 60 mm un biezums (šķērsām šķiedrām) 80 mm. Skrūves masīvkoksnē ieskrūvētas šķērsām šķiedrām attiecīgi 14, 42 un 70 mm dziļumā. Katram ieskrūvēšanas dziļumam pārbaudīti 20 paraugi un aprēķinātas skrūvju izraušanas pretestību vidējās vērtības un to statistiskie rādītāji.

Skrūvju izraušanas pretestības noteikšanai atkarībā no skrūves diametra un ieskrūvēšanas veida (ar vai bez aizurbšanas) no KŠM izgatavoti 60 kvadrātveida paraugi ar malas garumu 75 mm. Pētījuma metodika balstīta uz jau iepriekš minēto pētījuma metodiku ar šādām atšķirībām - skrūvju izraušanas pretestība novērtēta, KŠM orientējot perpendikulāri skrūvju neizturīgākajā vietā (vietā ar mazāko koksnes daudzumu uz vītnes), skrūvi ieskrūvējot ar pilnu vītnes garumu 70 mm dziļumā. Pētījumā izmantotas kokskrūves HBS6220 un HBS8280. HBS tipa skrūve raksturo vairumtirdzniecībā pēc pasūtījuma pieejamo kokskrūvju kvalitāti. Minētās skrūves tiek izplatītas ar ražotāja atbilstības deklarāciju, izmantošanai slodzes nesošās būvkonstrukcijās. Skrūvju parametri apkopoti 3.11. tabulā.

Skrūvju ieskrūvēšanas vieta perpendikulārā KŠM virzienā parādīta (3.21. att. 1) attēlā. Katram skrūves diametram izgatavoti 15 paraugi ar aizurbšanas paņēmieni un 15 paraugi bez aizurbšanas paņēmiena skrūvju izraušanas pretestības noteikšanai. Skrūves HBS6220 aizurbšanai izmantots koka urbis ar diametru 3.5 mm un aizurbšanas dziļumu 70 mm, savukārt skrūves HBS8280 aizurbšanai izmantots urbis ar diametru 5 mm un aizurbšanas dziļumu 70 mm. Lai iegūtu konstantu masu, skrūvju izraušanas KŠM paraugi pirms pārbaudes tiek kondicionēti pie relatīvā gaisa mitruma $65 \pm 5 \%$ un temperatūras $20 \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ tik ilgi, kamēr divu atkārtotu paraugu svēršanu starpība 24 stundu laikā neatšķiras vairāk par 0.1% no parauga masas.

Skrūvju HBS6220 un HBS8280 ģeometriskie parametri

Skrūves apzīmējums	Skrūves garums, mm	Vītne garums, mm	Vītne ārējais diametrs, mm	Vītne iekšējais diametrs, mm	Kāta diametrs, mm	Vītne solis, mm	Aizurbšanas rievā
HBS6220	120	75	6.2	3.95	4.3	4.7	ir
HBS8280	280	80	8.0	5.40	5.8	5.2	ir

Skrūves tiek ieskrūvētas paraugos ar pilnu vītne daļu 70 mm, ar ieskrūvēšanas precizitāti ± 1 mm. Skrūves izraušanas pretestības noteikšanai izmantota iekārta *Zwick Z100*.

Skrūvju izraušanas pretestība tiek noteikta kā katra diametra un ieskrūvēšanas veida (ar vai bez aizurbšanas) visu 15 izraušanas pretestību vidējā vērtība ar paraugkopu raksturojošajiem statistiskajiem rādītājiem: standartnovirzi (*SD*) un variācijas koeficientu (*VAR*). Skrūvju izraušanas pretestības vidējo vērtību salīdzināšanai izmantota t-testa statistiskās apstrādes metode ar *p*-vērtības pieeju, pie ticamības līmeņa 95 %. Inženiertehnisko aprēķinu veikšanai aprēķinātas skrūvju izraušanas pretestību raksturlielumu vērtības saskaņā ar standarta LVS EN 14358 metodiku.

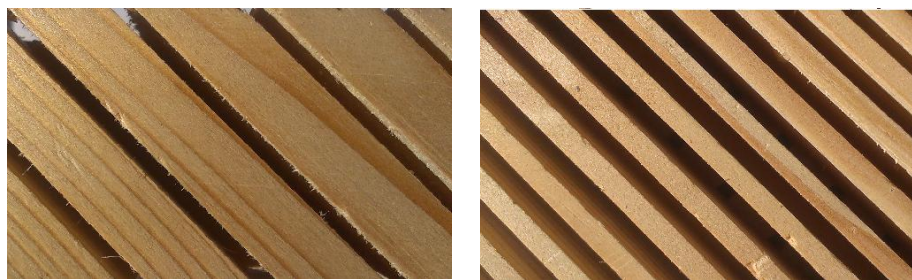
3.5.4. Līmētā plaknes savienojuma robežstiprība bīdē

KŠM ir veidots no vairākām kopā līmētām koksnes kārtām, tādēļ novērtēta materiāla līmējuma kvalitāte saskaņā ar standarta LVS EN 392 pārbaudes metodiku. Pārbaudēm pakļautas KŠM līmes šuves, kā arī nelīmēta šūnveida materiāla zonas ar mērķi salīdzināt līmes šuves robežstiprību bīdē ar šūnveida materiāla robežstiprību bīdē dažādās tā zonās un materiāla virzienos. Minētajā pārbaudē iegūtie robežstiprības rādītāji bīdē nav izmantojami projektēšanas vajadzībām, bet gan materiāla līmējuma kvalitātes novērtēšanai un savstarpējai salīdzināšanai. Pārbaudēm pakļautas četras šūnveida materiāla zonas, katrai zonai pa 30 paraugiem. Nominālais bīdes laukums visiem paraugiem 50×50 mm, paraugu garums 112 mm.

3.5.5. Salīmējamība ar citiem koksnes materiāliem

Viens no nozīmīgākajiem trīs kārtu kompozītmateriālu ražošanas posmiem ir materiālu savstarpējā savienošana. Pētījumā apskatītas divu līmju izmantošanas iespējas KŠM aplīmēšanai (poliuretāna līmi *Kleiberit PUR 501* un emulsipolimērizocianāta līmi *Kleiberit EPI 304.4*). Dotā veida līmes līdz šim neizmantoja KŠM aplīmēšanai. Pētījuma rezultātā novērtēta līmējuma kvalitāte starp KŠM un koksnes bāzes materiāliem. noskaidrota izveidoto līmēto savienojumu kvalitāte un izvērtēta konkrēto līmju piemērotība masīvkoksnes un koksnes materiālu salīmēšanai ar priedes KŠM perpendikulārā virzienā.

Analizējot KŠM uzbūvi paralēlā virzienā, aprēķināts, ka aplīmējamās virsmas kontaktaukums ir aptuveni 1.4 reizes lielāks nekā konstruktīvais koksnes laukums KŠM vidusdaļā. Ņemot vērā 3.5.4. nodaļā salīdzinātos bīdes stiprības rādītājus KŠM līmes šuvei (0.68 MPa) un tā konstrukcijai materiāla iekšējā daļā (0.35 MPa), varam apgalvot, ka aplīmēta KŠM robežstiprību stiepē noteiks nevis līmes šuves mehāniskā stiprība, bet gan KŠM konstruktīvā robežstiprība stiepē, skat. 3.22. att.



1

2

3.22. att. Aplīmējamās virsmas kontaktlaukuma (1) attiecība pret koksnes šūnveida materiāla paralēlā virziena konstruktīvo laukumu (2) materiāla iekšējā daļā.

KŠM un citu koksnes materiālu līmējuma stiprības rādītājs būs vienāds vai zemāks ar 3.5.1. nodaļā noteikto KŠM iekšējās kārtas robežstiprību stiepē 0,427 MPa. Šī sakarība ir spēkā, aplīmējot KŠM ar koksnes materiāliem, kuru iekšējo slāņu robežstiprība stiepē ir augstāka par KŠM iekšējo slāņu konstruktīvo robežstiprību stiepē.

KŠM aplīmēšanas iespēju novērtēšanai izmantoti sekojoši materiāli. Iekšējā kārtā veidota no 4 kārtu priedes KŠM ar biezumu 42 mm, kārtu savstarpējai salīvēšanai izmantota PVA līme. KŠM vidējais blīvums pētījumā 300 kg m⁻³. KŠM apzīmēta ar burtu D. Ārējās kārtās izmantoti sekojoši masīvkoksnes materiāli: priedes (*Pinus sylvestris* L.) koksne ar biezumu 4 mm un vidējo blīvumu 470 kg m⁻³ (apzīmējums P); oša koksne ar biezumu 4 mm un vidējo blīvumu 670 kg m⁻³ (Os) un termiski un mehāniski blīvināta baltalkņšņa (*Alnus incana* Moench) koksne ar biezumu 4 mm un blīvumu 720 kg m⁻³ (TMMBa). No plātņu materiāliem aplīmēšanai izmantota augsta blīvuma koksnes šķiedru plātne ar biezumu 4 mm un blīvumu 800 kg m⁻³ (HDF); bērza saplāksnis, kurš izgatavots no trīs kārtām ar kopējo biezumu 4 mm un blīvumu 700 kg m⁻³ (PW), kā arī orientēto koksnes skaidu plātne ar biezumu 8 mm un blīvumu 620 kg m⁻³, kas paredzēta pielietošanai nesošām konstrukcijām āra apstākļos.

Pētījumā izmantoto koksnes materiālu izvēle veikta pēc reālu izstrādājumu ražošanas vajadzībām. Šūnveida materiāla galvenais izmantošanas virziens nenesošo konstrukciju jomā ir vieglās plātnes ar uzlabotu formas stabilitāti un paaugstinātu virsmas izturību. Savukārt materiāla plānotā izmantošana būvniecībā ir durvju, kāpņu pakāpienu un ēku būvkonstrukciju izgatavošanai. Trīskārtu plātņu virsējo kārtu materiāla izvēle veikta, balstoties uz potenciāli piemērotāko ārējās kārtas un šūnveida materiāla kombināciju paredzētajam izmantošanas veidam.

Koksnes materiālu salīmēšanas iespējas ar KŠM pētītas, izmantojot divu veidu līmes: nenesošo konstrukciju poliuretāna līmi *Kleiberit PUR 501* (PUR) un nenesošo konstrukciju emulsipolimērizocianāta līmi *Kleiberit EPI 304.4* ar cietinātāju *Kleiberit 808.0* (EPI). Līmju tehniskie rādītāji apkopoti 3.12. tabulā.

3.12. tabula

Līmju tehniskie rādītāji

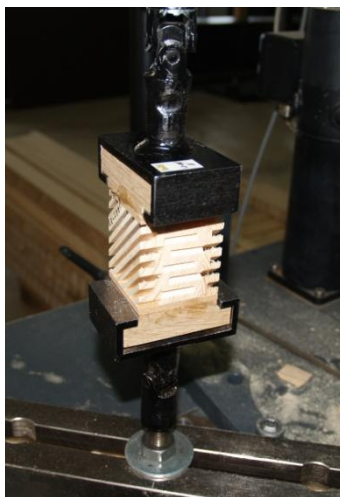
Rādītājs	Līmes zīmols	
	<i>Kleiberit PUR 501</i>	<i>Kleiberit EPI 304.4</i>
Līmes veids (Līmes apzīmējums pētījumā)	Poliuretāns (PUR)	Emulsipolimērizocianāts (EPI)
Komponentu skaits	1	2
Cietinātājs un tā daudzums	-	+15 % <i>Kleiberit 808.0</i>
Līmes patēriņš, g m ⁻²	100-200	120-200
Viskozitāte pēc Brookfield 20 °C	8.000	10.000 m Pa s
Blīvums, kg m ⁻³	1130	1120
Mīnīmālais presēšanas ilgums, min.	60	45
Presēšanas spiediens, MPa	Min. 0.6	0.4 - 0.7

Visām 12 paraugu grupām paraugu iekšējo kārtu izgatavo no priedes KŠM ar biezumu 42 mm, garumu un platumu 300 mm. Plātņu ārējo kārtu materiālu garums un platums ir 300 mm. Paraugu aplīmēšana ar PUR līmi veikta, ievērojot šādus parametrus - līmes uzklāšana īstenota manuāli ar līmes uzklāšanas rulli; līmes vidējais patēriņš 150 g m^{-2} , kas noteikts ar svēršanas paņēmieni; presēšanas spiediens 0.2 MPa; izturēšanas laiks zem spiediena 60 min. Paraugu aplīmēšana ar EPI līmi veikta saskaņā ar šādiem parametriem - līmes uzklāšana īstenota manuāli ar līmes uzklāšanas rulli; līmes un cietinātāja kopējā uznešana, līmes vidējais patēriņš 170 g m^{-2} , kas noteikts ar svēršanas paņēmieni; presēšanas spiediens 0.2 MPa; izturēšanas laiks zem spiediena 60 min. Trīs slāņu plātņu materiāla nominālais biezums pēc aplīmēšanas ar orientēto kokskaidu plātņi ir 58 mm, pārējos gadījumos 50 mm. Pēc paraugu salīmēšanas un kondicionēšanas no katra veida sagataves tiek izgatavoti vismaz 15 paraugi ar izmēriem $50 \times 50 \text{ mm}$ un biezumu, kas vienāds ar plātnes biezumu, lai iegūtu vismaz 10 ticamus stiepes robežstiprības stiepē un sagrāves veida paraugus. Lai paraugus varētu iestiprināt pārbaudes iekārtā, tie, izmantojot līmi *Kleiberit PUR 501*, aplīmēti ar oša koksnes satvērējklucīšiem.

Paraugu izgatavošanas laikā ir veikta to marķēšana. Parauga marķējumā norādīts virsējās kārtas materiāla veida apzīmējums un izmantotā līme saskaņā ar 3.12. tabulu un parauga marķējums grupas robežās no 1 līdz 15. piemēram. Parauga marķējums ir PW/PUR-3, kur PW - bērza saplāksnis, PUR - poliuretāna līme un 3 - 3. paraugs paraugu grupas robežās. Kopā pētījumā 12 paraugu grupās izgatavoti 180 paraugi robežstiprības stiepē un sagrāves rakstura novērtēšanai.

Lai nodrošinātu kvalitatīva savienojuma iegūšanu, ir veikta sagatavju kondicionēšana gan pirms salīmēšanas, gan arī pēc divu materiālu salīmēšanas. Paraugu sagataves un salīmētos paraugus kondicionē standarta atmosfērā, kur temperatūra tiek nodrošināta $20 \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ un gaisa relatīvais mitrums $65 \pm 5 \text{ \%}$.

Paraugu līmējuma robežstiprība stiepē perpendikulāri pret plātnes plakni noteikta saskaņā ar standartu LVS EN 319. Līmējuma stiprības noteikšanai izmantota materiālu stiprības pārbaudes iekārta *Zwick Z100*. Trīs kārtu plātņu pārbaudes metodi iespējams aplūkot 3.23. attēlā.

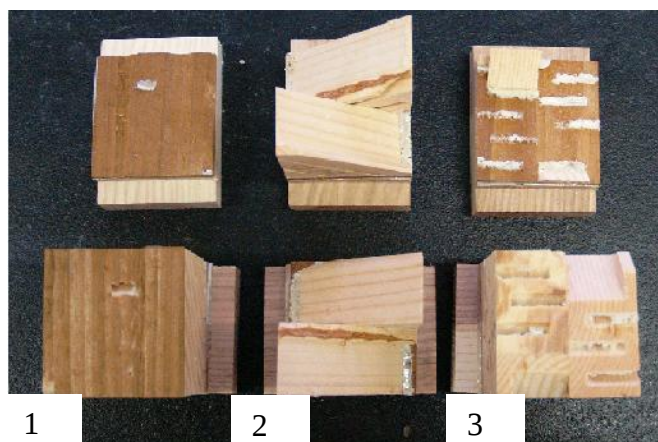


3.23. att. Stiepes robežstiprības noteikšanas paņēmiens.

Līdztekus robežstiprības stiepē rādītājiem vizuāli tiek vērtēts plātņu materiāla sagrāves veids jeb raksturīgā vieta, pa kuru materiālam visbiežāk notikusi sagrāve. Iespējami trīs materiāla raksturīgie sagrāves veidi:

1. pa ārējo kārtu materiālu;
2. pa šūnveida materiālu;
3. sagrāve notikusi pa līmes šuvi starp iekšējo un ārējo kārtu materiālu, skat. 3.24. att.

Pēdējais gadījums liecina par trīs slāņu materiāla iekšējo un ārējo kārtu nepietiekamu līmes saistīšanas spēju, kuru nepieciešams uzlabot. Stiepes robežstiprības rādītājiem noteikti aprakstošās statistikas rādītāji: vidējās vērtības, standartnovirze, variācijas koeficients un vidējās vērtības 95 % ticamības intervāls. Paraugkopu vidējo vērtību salīdzināšanai izmantots Stjūdenta t-tests ar p -vērtības pieeju, pie ticamības līmeņa 95 %.



3.24. att. Trīs kārtu plātņu materiāla iespējamie sagrāves veidi:

1 - pa ārējo kārtu materiālu; 2 - pa šūnveida materiālu; 3 - pa līmes šuvi.

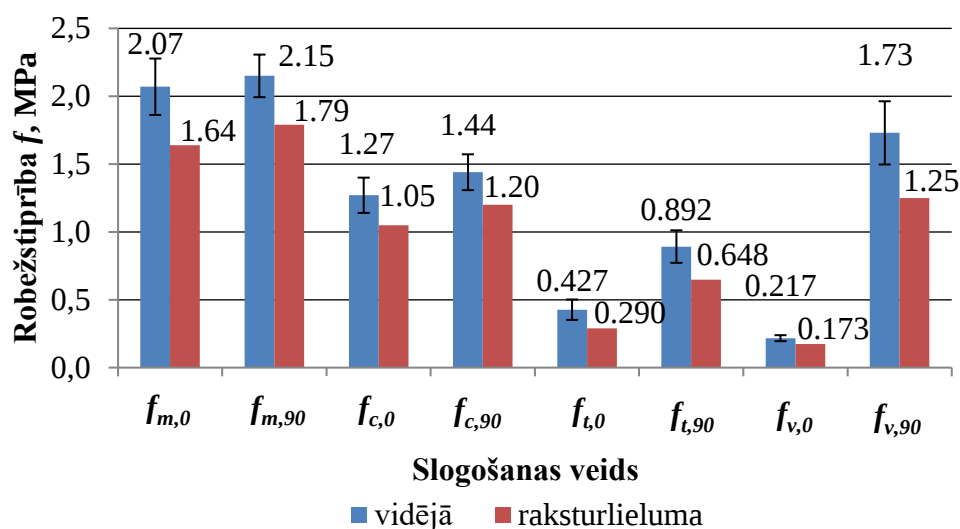
3.6. Rezultāti un diskusija mehānisko īpašību noteikšanai

3.6.1. Robežstiprība un elastības modulis liecē spiedē, stiepē un bīdē

Visas svarīgākās KŠM mehāniskās īpašības inženiertehniskajiem aprēķiniem ar to raksturlielumiem apkopotas 3.25. un 3.26. attēlā. Iegūtie rezultāti apliecina, ka KŠM virzienam ir būtiska ietekme uz KŠM mehāniskās stiprības un elastības īpašību rādītājiem. Augstākie stiprības rādītāji iegūti, KŠM slogojot perpendikulārā virzienā (indekss pie mehāniskās īpašības apzīmējuma ir $_{90}$). Augstākie elastības moduļu rādītāji, izņemot bīdes elastības moduļa rādītājus, iegūti, KŠM slogojot paralēlā virzienā (indekss pie mehāniskās īpašības apzīmējuma ir $_0$). Analizējot KŠM stiprības rādītājus, varam secināt, ka tie ir robežās no 0.217 MPa (robežstiprība bīdē paralēlā virzienā) līdz 2.15 MPa (robežstiprība liecē perpendikulārā virzienā), skat. 3.25. att.

Veicot abu materiāla virzienu vidējo robežstiprības liecē vērtību salīdzināšanu, izmantojot Stjūdenta t-testu ar p -vērtības pieeju, starp tiem netika novērota būtiska atšķirība ($p = 0.38$). KŠM paralēlā virzienā uzrādījis ievērojami zemākus ($p < 0.05$) vidējos robežstiprības rādītājus spiedē, stiepē un bīdē, salīdzinot ar materiāla perpendikulāro virzienu. Izstrādājumu projektēšanas un modelēšanas vajadzībām abos KŠM virzienos var izmantot robežstiprības liecē raksturlieluma vērtību 1.64 MPa.

Pārējo robežstiprības raksturlielumu rādītāju vērtības (spiedē, stiepē un bīdē) projektēšanas vajadzībām jāizvēlas katram KŠM virzienam un materiāla slogošanas veidam atsevišķi saskaņā ar 3.25. attēlu.



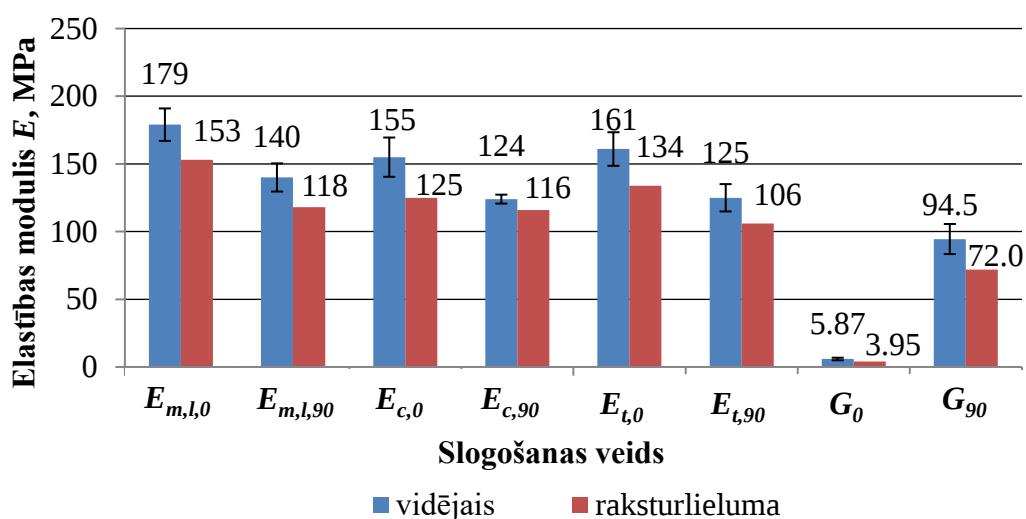
3.25. att. Koksnes šūnveida materiāla robežstiprības vidējie rādītāji ar 95 % ticamības intervālu un raksturlieluma vērtības:

f_m - robežstiprība liecē; f_c - robežstiprība spiedē; f_t - robežstiprība stiepē un f_v - robežstiprība bīdē (0 – īpašība noteikta materiāla paralēlajā virzienā un 90 – īpašība noteikta materiāla perpendikulārajā virzienā).

Analizējot KŠM elastības rādītājus, varam secināt, ka tie ir robežās no 5.87 MPa (bīdes elastības modulis paralēlā virzienā) līdz 179 MPa (lokālais elastības modulis liecē, materiālu slogojot paralēlā virzienā), skat. 3.26. att.

Salīdzinot abu KŠM virzienu vidējos elastības moduļus radītājus, iespējams secināt, ka materiāla virziens būtiski ietekmē elastības moduļus radītājus.

Slogojot KŠM paralēlā virzienā liecē, spiedē un stiepē, novērotas būtiski augstākas elastības moduļus vērtības, savukārt pārbaudot materiālu bīdē, krietni augstāks elastības modulis ir materiāla perpendikulārā virzienā. KŠM izstrādājumu projektēšanas vajadzībām katram KŠM virzienam un elastības īpašībai jāizvēlas atbilstošā raksturlieluma vērtība saskaņā ar 3.26. att.



3.26. att. Koksnes šūnveida materiāla elastības moduļus vidējie rādītāji ar 95 % ticamības intervālu:

$E_{m,l}$ - lokālais elastības modulis liecē; E_c - elastības modulis spiedē; E_t - elastības modulis stiepē un G - elastības modulis bīdē (0 – īpašība noteikta materiāla paralēlajā virzienā un 90 – īpašība noteikta materiāla perpendikulārajā virzienā).

Vispārinot iegūtos rādītājus, varam secināt, ka KŠM perpendikulārā virzienā uzrāda augstākus mehāniskās stiprības rādītājus, bet zemākus elastības moduļu rādītājus, salīdzinot ar KŠM paralēlo virzienu. Izņēmums ir bīdes elastības modulis, kas ir ievērojami augstāks, materiālu pārbaudot perpendikulārā virzienā. Novērota būtiska KŠM stiprības un elastības rādītāju samazināšanās, salīdzinot ar KŠM izgatavošanā izmantotā, C24 stiprības klases, garumā līmētā izejmateriāla rādītājiem. Zāgmateriālu stiprības klasei C24 atbilstošie mehāniskie rādītāji ietverti standarta LVS EN 338 1. tabulā. Novērots aptuveni 14 kārtīgs robežstiprības liecē raksturlieluma vērtības samazinājums - no 24 MPa līdz 2.11 MPa, salīdzinot zāgmateriāla robežstiprības liecē raksturlieluma vērtību ar KŠM raksturlieluma vērtību. Vēl lielāks samazinājums no 7400 MPa līdz 153 MPa novērojams, salīdzinot elastības moduļa liecē raksturlieluma vērtību zāgmateriāliem un KŠM paralēlā virzienā. Pētījumā iegūtas robežstiprības spiedē raksturlieluma vērtības 1.05 MPa, pārbaudot materiālu perpendikulārā virzienā, un 1.20 MPa, pārbaudot paralēlā virzienā. Iegūtās KŠM robežstiprības spiedē raksturlieluma vērtības var salīdzināt ar C24 stiprības klases zāgmateriālu robežstiprības spiedē perpendikulāri pret šķiedru virzienu raksturlieluma vērtību 2.5 MPa. Minētā raksturlieluma vērtība ir aptuveni divas reizes zemāka KŠM, salīdzinot ar zāgmateriālu robežstiprības liecē raksturlieluma vērtību. Saskaņā ar literatūras datiem krustām līmēto kokmateriālu paneļu (CLT) robežstiprības spiedē raksturlieluma vērtība perpendikulāri pret šķiedru virzienu ir no 2.85 MPa (Bogensperger u.c., 2011) līdz 3.30 MPa (Serrano un Enquist 2010).

KŠM un C24 stiprības klases zāgmateriālu mehānisko īpašību salīdzinājums atspoguļots 3.13. tabulā.

3.13. tabula

**Zāgmateriālu un koksnes šūnveida materiāla mehānisko īpašību salīdzinājums
(LVS EN 338:2010)**

Rādītājs	C24 stiprības klases zāgmateriāli		KŠM	
	0	90	0	90
Robežstiprības 5 % kvantiļa raksturlielumu rādītāji, MPa				
Liecē	24	- ¹⁾	1.64	1.79
Stiepē	14	0.4	0.29	0.65
Spiedē	21	2.5	1.05	1.20
Bīdē	4	- ¹⁾	0.17	1.25
Elastības rādītāji, MPa				
Vidējais elastības modulis liecē	11000	370	179	140
Elastības moduļa 5 % kvantiļa raksturlieluma vērtība	7400	- ¹⁾	153	118
Vidējais elastības modulis bīdē	690	- ¹⁾	6	95

¹⁾ rādītājs netiek deklarēts.

KŠM robežstiprības stiepē raksturlieluma rādītājus raksturo šādi lielumi - 0.29 MPa, pārbaudot materiālu paralēlā virzienā, un 0.648 MPa, pārbaudot materiālu perpendikulārā virzienā. Iegūtās robežstiprības stiepē raksturlielumu vērtības var salīdzināt ar zāgmateriālu robežstiprības stiepē perpendikulāri pret šķiedru virzienu raksturlieluma vērtību 0.4 MPa (LVS EN 338:2010). Skujkoku koksnes zāgmateriālu C24 stiprības klases robežstiprības bīdē raksturlieluma vērtība ir 2.5 MPa, savukārt KŠM noteiktās robežstiprības bīdē raksturlielumu vērtības ir robežās no 0.173 MPa, pārbaudot materiālu paralēlā virzienā, līdz 1.25 MPa, pārbaudot materiālu perpendikulārā virzienā. Pētījumā iegūtie vidējie KŠM lieces, stiepes un spiedes elastības moduļi ir 2 līdz 3 reizes zemāki, salīdzinot ar stiprības klases C24 zāgmateriālu vidējām elastības moduļu vērtībām materiāla perpendikulārā virzienā pret šķiedrām (370 MPa). Iegūtie KŠM vidējie bīdes elastības moduļu rādītāji ir 7 līdz 118 reizes

zemāki, salīdzinot ar C24 stiprības klases zāģmateriālu vidējo elastības moduli bīdē šķiedru virzienā (690 MPa). Pētījuma rezultāti apkopoti autora publikācijā (Iejavs un Spulle, 2013^b).

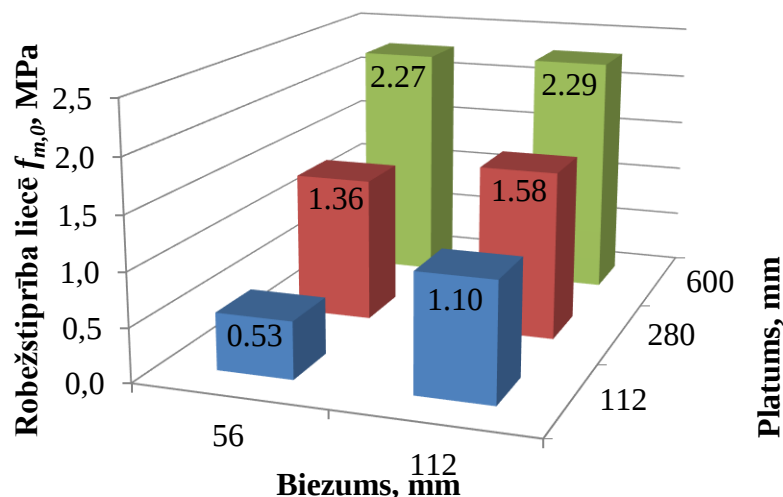
Secinājumi

1. KŠM mehāniskās īpašības ir atkarīgas no materiāla virziena. Perpendikulārā virzienā materiāls uzrāda augstākus stiprības rādītājus, bet zemākus elastības moduļu rādītājus, salīdzinot ar materiāla paralēlo virzienu.
2. Abu materiāla virzienu robežstiprība liecē būtiski neatšķiras un ir robežās no 2.07 līdz 2.15 MPa. Inženiertehniskajiem aprēķiniem var izmantot zemāko 5 % kvantiļa raksturlieluma vērtību 1.64 MPa. Materiāla elastības modulis, pārbaudot paralēlā virzienā, ir 179 MPa, bet perpendikulārā virzienā tas ir krietni zemāks - 140 MPa. Attiecīgās raksturlielumu vērtības ir 153 un 118 MPa.
3. Robežstiprība spiedē 1.44 MPa un stiepē 0.892 MPa materiāla perpendikulārajā virzienā ir ievērojami augstāka nekā attiecīgie rādītāji 1.27 MPa un 0.427 MPa materiāla paralēlajā virzienā. Abu materiāla virzienu robežstiprības rādītāji stiepē ir krietni zemāki nekā rādītāji spiedē. Elastības moduļi stiepē 161 MPa un spiedē 155 MPa ir augstāki nekā materiāla paralēlajā virzienā, attiecīgi 125 un 124 MPa. Elastības moduļa rādītāji spiedē un stiepē būtiski neatšķiras, apskatot abus KŠM virzienus atsevišķi.
4. KŠM paralēlā virziena robežstiprība bīdē 0.217 MPa un elastības modulis bīdē 5.87 MPa ir zemākie KŠM mehāniskie rādītāji. Perpendikulārā virzienā robežstiprība un elastības modulis bīdē ir 8 līdz 16 reizes augstāks, attiecīgi 1.73 un 94.5 MPa.
5. Visas pētījumā apskatītās KŠM mehāniskās īpašības, izņemot vienu, ir 1.4 līdz 118 reizes zemākas nekā tā ražošanā izmantotajiem priedes kokmateriāliem. Vienīgi KŠM robežstiprības stiepē 5 % kvantiļa raksturlieluma vērtība 0.648 MPa materiāla perpendikulārā virzienā ir 1.6 reizes augstāka par zāģmateriālu robežstiprības stiepē 5 % kvantiļa raksturlieluma vērtību 0.4 MPa.

3.6.2. Ģeometrisko izmēru ietekme uz mehāniskajām īpašībām

KŠM paraugi pirms pārbaudēm ir kondicionēti standarta atmosfērā, uz ko var attiecināt 3.2.1. un 3.2.2. nodaļā noteiktos vidējos materiāla mitruma un blīvuma rādītājus - attiecīgi 12.4 % un 307 kg m⁻³.

Pētījumā iegūtās KŠM robežstiprības liecē $f_{m,0}$ vērtības, slogojot materiālu paralēlā virzienā, ir robežās no 0.53 MPa (*SD* ir 0.13 MPa, *VAR* ir 24.9 %) līdz 2.29 MPa (*SD* ir 0.13 MPa; *VAR* ir 5.6 %). KŠM biezuma un platuma ietekme uz paraugu robežstiprību liecē parādīta 3.27. attēlā. Ir novērojama tendence, palielinoties parauga biezumam un vienlaicīgi arī saklāto kārtu skaitam materiāla biezumā, robežstiprībai liecē pieaugt. Parauga biezuma ietekme uz robežstiprību liecē, palielinoties materiāla platumam, samazinās. Saistībā ar KŠM platuma ietekmi uz robežstiprību liecē vērojama tendence, palielinoties materiāla platumam, robežstiprībai liecē pieaugt.



3.27. att. Parauga biezuma un platuma ietekme uz robežstiprību liecē $f_{m,0}$.

Starp paraugu platuma un robežstiprības liecē izmaiņām abu biezumu paraugu gadījumā pastāv cieša lineāras pozitīvas sakarības 3.16. (112 mm bieziem paraugiem) un 3.17. (56 mm bieziem paraugiem). Korelācijas koeficientu vērtības attiecīgi ir 0.98 un 0.92.

$$f_{m,0} = 0.0036p + 0.215, \quad (3.16.)$$

$$f_{m,0} = 0.0024p + 0.853, \quad (3.17.)$$

kur: $f_{m,0}$ - robežstiprība liecē, MPa;
 p - parauga platums, mm.

Starp paraugu biezuma un robežstiprības izmaiņām liecē paraugiem ar platumu 112 mm pastāv cieša lineāra pozitīva sakarība 3.18. Šo sakarību raksturo korelācijas koeficients 0.95.

$$f_{m,0} = 0.0101b - 0.0379, \quad (3.18.)$$

kur: $f_{m,0}$ - robežstiprība liecē, MPa;
 b - paraugu biezums, mm.

Paraugiem ar platumu 280 mm augstuma ietekme uz robežstiprību liecē samazinās un veidojas vāja lineāra sakarība, kuru raksturo korelācijas koeficients 0.47.

$$f_{m,0} = 0.004b - 1.13, \quad (3.19.)$$

kur: $f_{m,0}$ - robežstiprība liecē, MPa;
 b - paraugu biezums, mm.

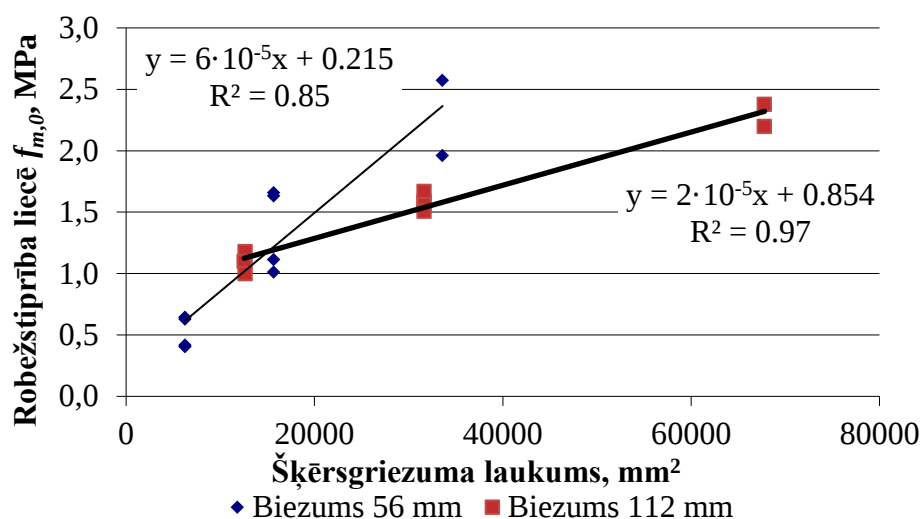
Paraugiem ar platumu 600 mm paraugu augstums robežās no 56 līdz 112 mm būtiski neietekmē robežstiprību liecē, jo sakarība ir vāja ($r = 0.05$).

Lieces paraugu biezuma un platuma mijiedarbības ietekmi uz KŠM robežstiprību liecē var aprakstīt ar šādu lineāru sakarību

$$f_{m,0} = 0.055 + 0.003p + 0.006b, \quad (3.20.)$$

kur: p - platums, mm
 b - biezums, mm

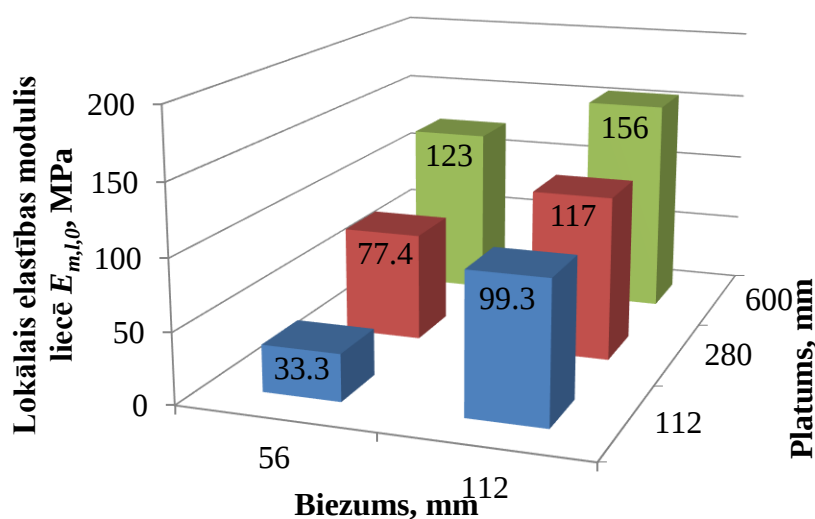
Lieces paraugu šķērsgriezuma laukuma ietekme uz robežstiprības rādītājiem liecē parādīta 3.28. att.



3.28. att. Paraugu šķersgriezuma laukuma ietekme uz robežstiprību liecē $f_{m,0}$.

3.28. att. redzams, ka KŠM šķersgriezuma laukumam ir būtiska ietekme uz robežstiprības rādītājiem liecē. Palielinoties lieces paraugu šķersgriezuma laukumam, būtiski pieaug robežstiprība liecē abu biezumu paraugiem. Starp šķersgriezuma laukumu un robežstiprības liecē rādītāju izmaiņām pastāv ciešas lineāras sakarības (3.28. att.), kuras raksturo lineārās korelācijas koeficienti $r = 0.92$ (56 mm bieziem paraugiem) un $r = 0.98$ (112 mm bieziem paraugiem).

Pētījumā iegūtās KŠM lokālā elastības moduļa vērtības liecē, slogojot materiālu paralēlā virzienā, $E_{m,l,0}$ ir robežās no 33.3 MPa (SD 11.2 MPa, VAR 33.6 %) līdz 156 MPa (SD 9.19 MPa; VAR 5.6 %). KŠM biezuma un platuma ietekme uz paraugu lokālo elastības moduli liecē parādīta 3.29. attēlā. Ir novērojama tendence, palielinoties parauga biezumam un vienlaicīgi arī saklāto kārtu skaitam materiāla biezumā, pieaugt arī elastības modulim liecē. Parauga biezuma ietekme uz elastības moduli liecē samazinās, palielinoties materiāla platumam. Saistībā ar KŠM platuma ietekmi uz lokālo elastības moduli vērojama tendence, palielinoties materiāla platumam, lokālajam elastības modulim liecē pieaugt.



3.29. att. Paraugu biezuma un platuma ietekme uz lokālo elastības moduli liecē $E_{m,l,0}$.

Starp paraugu platuma un lokālā elastības moduļa liecē izmaiņām abu biezumu paraugu gadījumā pastāv lineāras pozitīvas sakarības. 56 mm bieziem paraugiem ir cieša sakarība

$$E_{m,l,0} 0.115p + 85.8, \quad (3.21.)$$

kur: $E_{m,l,0}$ - lokālais elastības modulis, MPa;
 p - parauga platums, mm.

Minēto sakarību raksturo korelācijas koeficienta vērtība $r = 0.95$. 112 mm bieziem paraugiem starp paraugu platumu un elastības moduli liecē ir vidēji cieša sakarība

$$E_{m,l,0} = 0.185p + 17.7, \quad (3.22.)$$

kur: $E_{m,l,0}$ - lokālais elastības modulis, MPa;
 p - parauga platums, mm.

Sakarību raksturo korelācijas koeficients 0.79.

Starp paraugu biezumu un elastības moduli liecē paraugiem ar platumu 112 mm pastāv cieša ($r = 0.97$) pozitīva lineāra sakarība

$$E_{m,l,0} = 1.16b - 31.8, \quad (3.23.)$$

kur: $E_{m,l,0}$ - lokālais elastības modulis, MPa;
 b - parauga biezums, mm.

Paraugiem ar platumu 280 mm augstuma ietekme uz elastības moduli liecē samazinās un veidojas vidēji cieša ($r = 0.97$) pozitīva lineāra sakarība

$$E_{m,l,0} = 0.699b + 38.3, \quad (3.24.)$$

kur: $E_{m,l,0}$ - lokālais elastības modulis liecē, MPa;
 b - parauga biezums, mm.

Paraugiem ar platumu 600 mm un augstumu robežās no 56 līdz 112 mm veidojas vāja ($r = 0.47$) pozitīva lineāra sakarība

$$E_{m,l,0} = 0.556b + 91.5, \quad (3.25.)$$

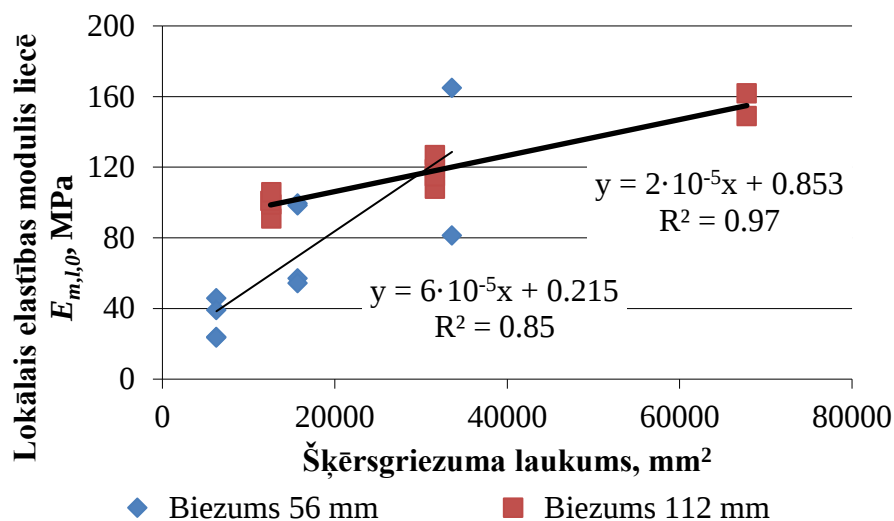
kur: $E_{m,l,0}$ - lokālais elastības modulis liecē, MPa;
 b - parauga biezums, mm.

Lieces paraugu biezuma un platuma mijiedarbības ietekmi uz KŠM lokālo elastības moduli liecē apraksta cieša ($r = 0.88$) pozitīva lineārā sakarība

$$E_{m,l,0} = -20.5 + 0.151p + 0.856b, \quad (3.26.)$$

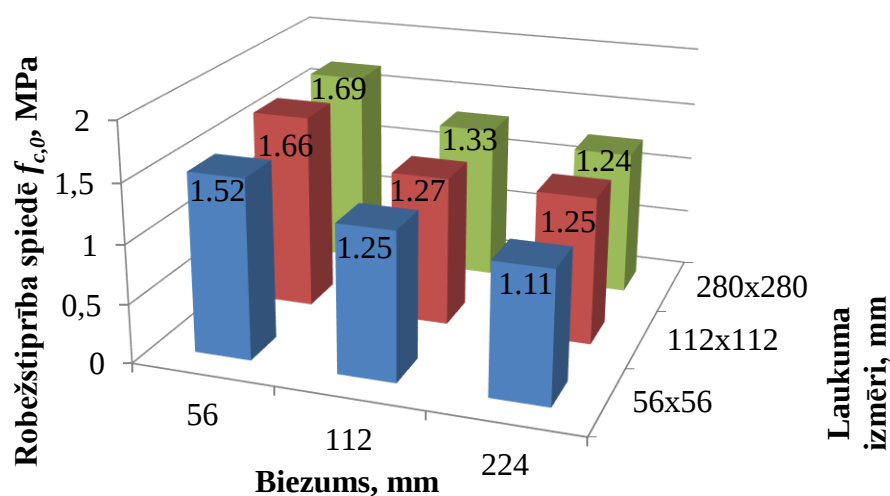
kur: $E_{m,l,0}$ - lokālais elastības modulis liecē, MPa;
 b - biezums, mm;
 p - platums, mm.

Lieces paraugu šķērsriezuma laukuma ietekme uz elastības moduli liecē parādīta 3.30. att. Minētajā attēlā redzams, ka KŠM šķērsriezuma laukumam ir būtiska ietekme uz elastības moduli liecē. Palielinoties lieces paraugu šķērsriezuma laukumam, ievērojami pieaug elastības modulis liecē abu biezumu paraugiem. Starp šķērsriezuma laukuma un elastības moduļa izmaiņām liecē pastāv ciešas lineāras sakarības (3.30. att.), kuras raksturo lineārās korelācijas koeficienti $r = 0.92$ (56 mm bieziem paraugiem) un $r = 0.98$ (112 mm bieziem paraugiem).



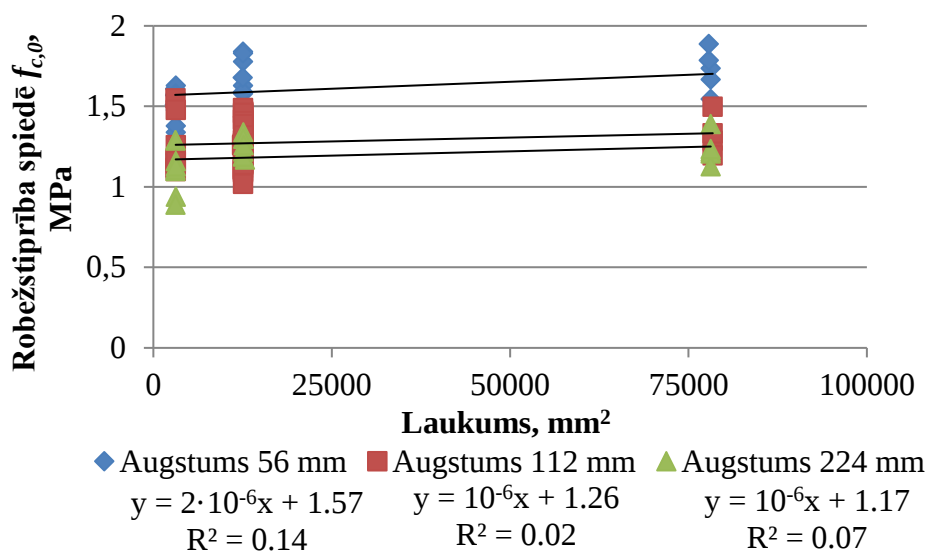
3.30. att. Paraugu šķērs griezuma laukuma ietekme uz lokālo elastības moduli liecē $E_{m,l,0}$.

Pētījumā iegūtās KŠM robežstiprības spiedē $f_{c,0}$ vērtības, slogojot materiālu paralēlā virzienā, ir robežās no 1.11 MPa (SD 0.14 MPa, VAR 12.9 %) līdz 1.69 MPa (SD 0.15 MPa; ir 8.6 %). KŠM biezuma un laukuma ietekme uz paraugu robežstiprību spiedē parādīta 3.31. attēlā. Vērojama tendence, palielinoties parauga biezumam, vienlaicīgi arī saklāto kārtu skaitam pa materiāla biezumu, samazināties paraugu robežstiprībai spiedē. Parauga spiestā laukuma palielināšana būtiski neuzlabo robežstiprības rādītājus spiedē.



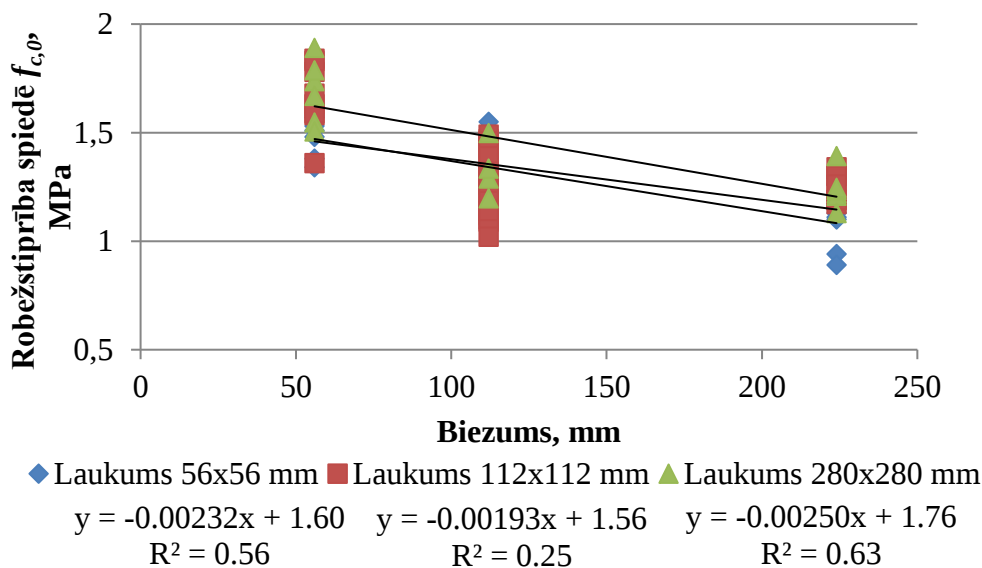
3.31. att. Paraugu biezuma un laukuma izmēru ietekme uz robežstiprību spiedē $f_{c,0}$.

Starp spiedes paraugu laukumu un robežstiprības spiedē izmaiņām visu trīs biezumu paraugu gadījumā pastāv vājas pozitīvas lineāras sakarības (3.32. att.). No minētā varam apgalvot, ka KŠM spiestā laukuma palielināšana būtiski nepaaugstina materiāla robežstiprību spiedē $f_{c,0}$.



3.32. att. Paraugu laukuma ietekme uz koksnes šūnveida materiāla robežstiprību spiedē $f_{c,0}$.

Starp spiedes paraugu biezumu un robežstiprības izmaiņām spiedē paraugiem ar spiedes laukumu 56×56 , 112×112 un 280×280 mm pastāv vidēji ciešas vai ciešas lineāras negatīvas sakarības, kuras raksturo korelācijas koeficienti 0.75, 0.50 un 0.79 (3.33. att.). Pamatojoties uz šo informāciju, iespējams apgalvot, ka KŠM augstuma palielināšana samazina materiāla robežstiprības rādītājus spiedē.



3.33. att. Paraugu biezuma ietekme uz koksnes šūnveida materiāla robežstiprību spiedē $f_{c,0}$.

Spiedes paraugu biezuma un šķēsgriezuma laukuma mijiedarbības ietekmi uz KŠM robežstiprību spiedē apraksta vidēji cieša ($r = 0.67$) negatīva lineāra sakarība

$$f_{c,0} = 1.58 + 1.81 \cdot 10^{-6}S - 0.002b, \quad (3.27.)$$

kur: S - laukums, mm²;

b - biezums, mm.

Pētījumā iegūtās KŠM elastības moduļa vērtības spiedē, slogojot materiālu paralēlā virzienā, $E_{c,0}$ ir robežās no 155 MPa (SD 14.9 MPa, VAR 9.4 %) līdz 222 MPa (SD 48.9 MPa;

VAR 22.2 %). Salīdzinot spiedes elastības moduļa vidējos rādītājus ar t-testa metodi paraugiem ar šķērssgriezuma laukuma izmēriem 112×112 mm un 280×280 mm, iegūta t -testa p -vērtība 0.003, kas nozīmē to, ka spiedes parauga šķērssgriezuma laukuma palielināšana būtiski paaugstina spiedes elastības moduli. Palielinot spiedes parauga šķērssgriezuma izmērus, vērojama spiedes elastības moduļa rādītāju izkliedes palielināšanās.

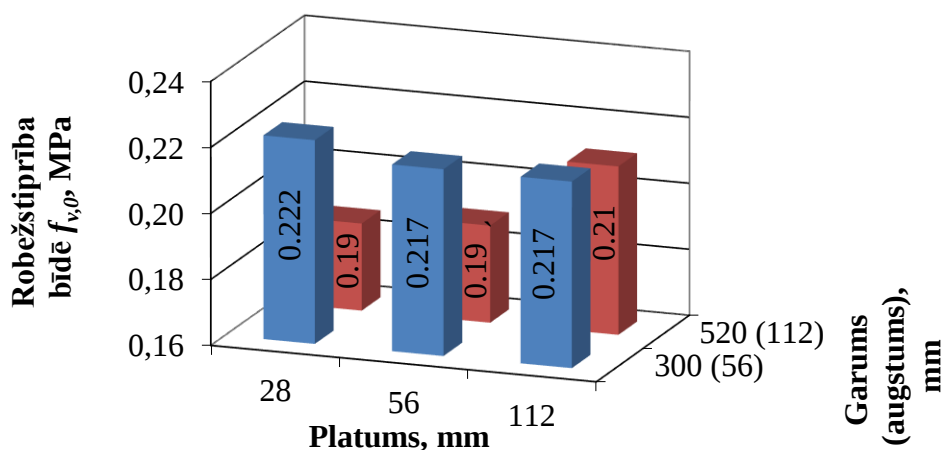
Starp spiedes elastības moduli un spiedes parauga laukumu paraugiem ar augstumu 112 mm veidojas vidēji cieša pozitīva sakarība 3.28., kuru raksturo lineārās korelācijas koeficients 0.73.

$$E_{c,0} = 0.001S + 142.56, \quad (3.28.)$$

kur: S - parauga šķērssgriezuma laukums, mm^2 .

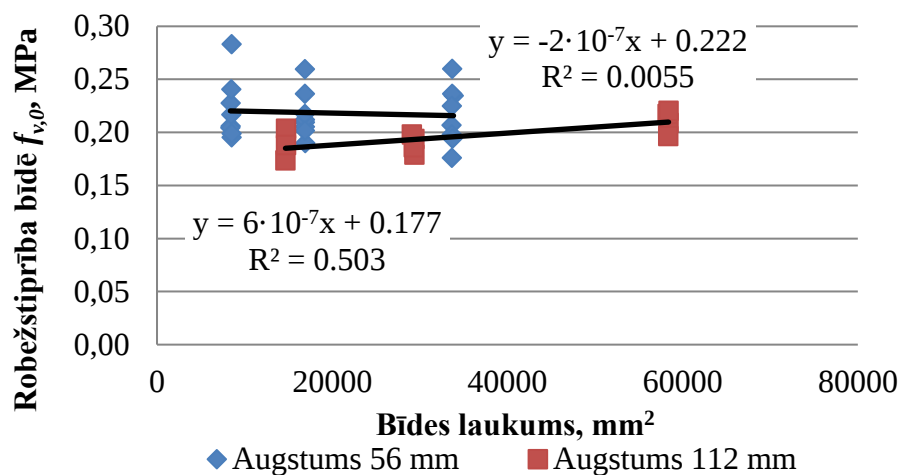
Robežstiprības un elastības rādītāji bīdē noteikti pie paraugu garuma 300 un 520 mm un attiecīgā biezuma 56 un 112 mm (KŠM no divām un četrām kārtām). Pētījumā iegūtās KŠM robežstiprības bīdē $f_{v,0}$ vidējās vērtības, slogojot materiālu paralēlā virzienā, ir robežās no 0.19 MPa (SD 0.01 MPa, VAR 4 %) līdz 0.22 MPa (SD 0.03 MPa, VAR 13%). Robežstiprības rādītāji bīdē atkarībā no bīdes parauga platuma un garuma (augstuma) parādīti 3.34. att. 56 mm augstu un 300 mm garu paraugu gadījumā materiāla platumam robežās no 28 līdz 112 mm nav būtiskas ietekmes uz šūnveida materiāla robežstiprību bīdē. Savukārt 112 mm augstu un 520 mm garu bīdes paraugu gadījumā paraugu robežstiprība bīdē būtiski pieaug. Tādējādi iespējams secināt, ka paraugu platuma ietekme uz robežstiprības rādītājiem bīdē ir atkarīga no pārbaudītā materiāla garuma un augstuma jeb saklāto kārtu skaita.

Šauriem paraugiem ar platumu 28 un 56 mm garuma palielināšana no 300 līdz 520 mm un augstuma palielināšana no 56 uz 112 mm būtiski samazina robežstiprības rādītājus bīdē $p < 0.05$. Savukārt paraugiem ar 112 mm platumu garuma un biezuma palielināšana neatstāj būtisku ietekmi uz robežstiprības bīdē rādītājiem $p = 0.73$. No minētā varam apgalvot, ka pie noteiktiem materiāla izmēriem parauga garuma un augstuma palielināšana var samazināt KŠM robežstiprību bīdē. Savukārt materiāla platuma palielināšana var paaugstināt robežstiprības rādītājus bīdē.



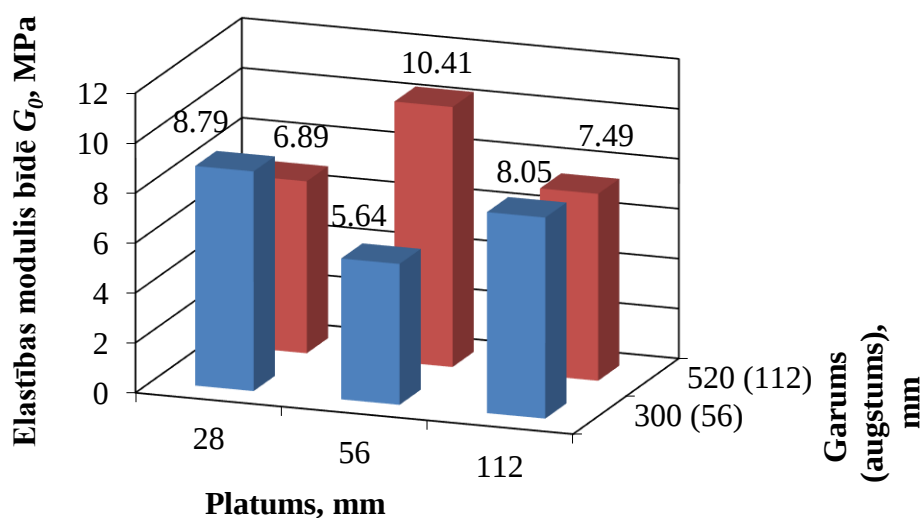
3.34. att. Paraugu platuma un garuma (augstuma) ietekme uz koksnes šūnveida materiāla robežstiprību bīdē $f_{v,0}$.

Robežstiprības rādītāji bīdē atkarībā no bīdes parauga laukuma parādīti 3.35. attēlā. Paraugiem ar augstumu 56 mm sakarība starp bīdes laukumu un robežstiprību bīdē ir vāja, ko raksturo korelācijas koeficients 0.07. Savukārt paraugiem ar augstumu 112 mm bīdes laukuma palielināšana būtiski palielina robežstiprību bīdē. Sakarība ir vidēji cieša, ko raksturo korelācijas koeficients 0.7. Bīdes paraugu laukuma ietekme uz KŠM robežstiprību bīdē ir tieši atkarīga no parauga ģeometriskajiem izmēriem, pastāvošās sakarības ir parādītas nākamajā attēlā.



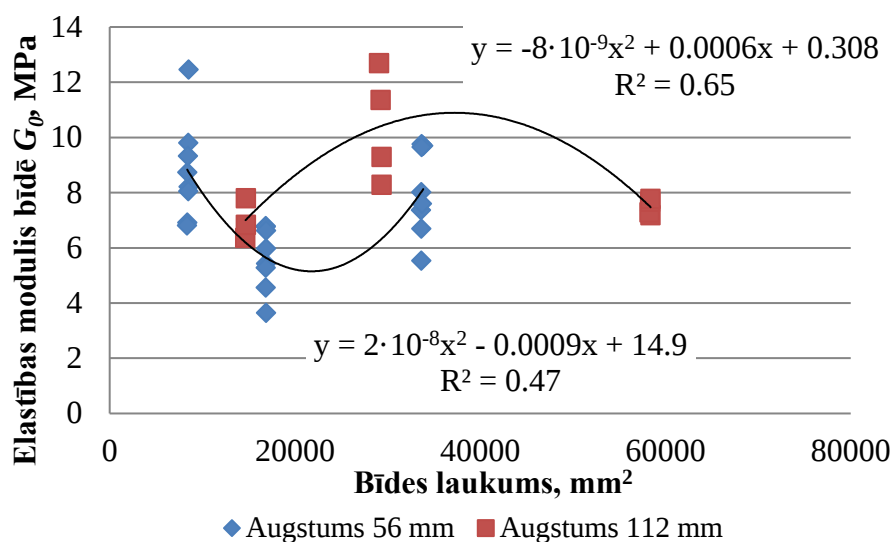
3.35. att. **Paraugu laukuma ietekme uz koksnes šūnveida materiāla robežstīpību bīdē $f_{v,0}$.**

Pētījumā iegūtās KŠM elastības moduļa vērtības bīdē G_0 , slogojot materiālu paralēlā virzienā, ir robežās no 5.64 MPa (SD 1.13 MPa, VAR 20.1 %) līdz 10.4 MPa (SD 1.99 MPa; VAR 19.0 %). Bīdes laukuma platumam (3.36. att.) un bīdes laukumam (3.37. att.) ir būtiska ietekme uz koksnes šūnveida elastības moduli bīdē G_0 . Abos gadījumos veidojas vai nu vidēji ciešas, vai ciešas nelineāras sakarības, kuras raksturo korelācijas koeficienti $r = 0.68$, 56 mm augstu paraugu gadījumā, un $r = 0.80$, 112 mm augstu paraugu gadījumā.



3.36. att. **Paraugu platuma un garuma (augstuma) ietekme uz koksnes šūnveida materiāla elastības moduli bīdē G_0 .**

Izmantojot 3.37. attēla otrās pakāpes polinomiālās sakarības, aprēķināts, ka mazākos elastības moduļa bīdē G_0 rādītājus 56 mm augstiem paraugi iegūst paraugi ar bīdes laukuma platumu 73 mm 4.70 MPa un bīdes laukumu 22000 mm². Abos pārējos gadījumos pētīto pazīmju robežās bīdes elastības moduļa rādītāji ir būtiski augstāki. Savukārt 112 mm augsto paraugu gadījumā aprēķinātais maksimāli iespējamais elastības modulis bīdē G_0 pie 71 mm materiāla platuma un bīdes laukuma 37000 mm² ir 11.6 MPa.



3.37. att. **Paraugu laukuma ietekme uz koksnes šūnveida materiāla elastības moduli bīdē G_0 .**

Pētījuma nozīmīgākie rezultāti apkopoti autora publikācijā (Iejavs un Ješauskis, 2014).

Secinājumi

1. Materiālu orientējot paralēlā virzienā, KŠM izmēru izmaiņas būtiski ietekmē tādos mehāniskos rādītājus kā robežstiprību un lokālo elastības moduli liecē, robežstiprību un elastības moduli spiedē, kā arī bīdes elastības moduli un robežstiprību bīdē.
2. Materiālu orientējot paralēlā virzienā, KŠM laukuma izmaiņas būtiski ietekmē tādos mehāniskos rādītājus kā robežstiprību un elastības moduli liecē, elastības moduli spiedē, robežstiprību un elastības moduli bīdē, savukārt laukuma izmaiņām nav būtiskas ietekmes uz materiāla robežstiprību spiedē.
3. Pētījumā iegūtās KŠM robežstiprības liecē $f_{m,0}$ vidējās vērtības, slogojot materiālu paralēlā virzienā, ir robežās no 0.53 MPa līdz 2.29 MPa, savukārt lokālā elastības moduļa liecē $E_{m,l,0}$ vidējās vērtības ir robežās no 33.3 MPa līdz 156 MPa.
4. Starp lieces paraugu šķērsriezuma izmēriem un robežstiprību liecē pastāv sakarība $f_{m,0}=0.055+0.003a+0.006b$, savukārt biezuma un platuma mijiedarbības ietekmi uz KŠM elastības moduli liecē apraksta sakarība $E_{m,l,0}=-20.55+0.15a+0.856b$. Starp lieces paraugu šķērsriezuma laukumu un robežstiprību liecē pastāv ciešas lineāras sakarības, uz kurām būtisku ietekmi atstāj paraugu augstums. Laukuma ietekmi uz elastības moduli liecē apraksta ciešas lineāras sakarības, kuras ir atkarīgas no materiāla augstuma.
5. Noteiktās KŠM robežstiprības spiedē $f_{c,0}$ vidējās vērtības, slogojot materiālu paralēlā virzienā, ir robežās no 1.11 MPa līdz 1.69 MPa, savukārt elastības moduļa spiedē vidējās vērtības ir robežās no 155 MPa līdz 222 MPa.
6. Starp spiedes paraugu šķērsriezuma izmēriem un robežstiprību spiedē nepastāv būtiska sakarība, savukārt parauga biezumam ir būtiska negatīva ietekme uz KŠM robežstiprību spiedē, ko apraksta vidēji cieša lineāra sakarība $f_{c,0}=-0.0021b+1.61$. Šķērsriezuma laukuma un parauga augstuma mijiedarbības ietekmi uz KŠM robežstiprību spiedē apraksta sakarība $f_{c,0}=1.58+1.81 \cdot 10^{-6}S-0.002b$. Starp spiedes paraugu šķērsriezuma laukumu un elastības moduli pastāv cieša lineāra sakarība $E_{c,0}=0.001S+142.56$.
7. KŠM paraugu robežstiprības bīdē $f_{v,0}$ vidējās vērtības ir robežās no 0.19 līdz 0.22 MPa, savukārt elastības moduļa G_0 vidējās vērtības ir robežās no 5.64 līdz 10.4 MPa. Starp KŠM izmēru, laukuma izmaiņām un robežstiprības bīdē, elastības moduļu izmaiņām pastāv nelineāras sakarības, kuras tieši ietekmē materiāla izmēri.

Robežstiprības bīdē un bīdes elastības moduļu vērtības jāaprēķina katram materiāla izmēram atsevišķi pēc pētījumā iegūtajām sakarībām.

8. Pētījumā iegūtie rezultāti un sakarības jāņem vērā pie KŠM izstrādājumu projektēšanas un modelēšanas.

3.6.3. Mehānisko stiprinājumu - kokskrūvju izraušanas pretestība

Skrūvju SPEC17 izraušanas pretestības statistiskie rādītāji atkarībā no skrūvju ieskrūvēšanas dziļuma šūnveida materiālā un materiāla orientācijas apkopoti 3.14. tabulā.

3.14. tabula

Skrūvju izraušanas pretestības statistiskie rādītāji atkarībā no skrūvju ieskrūvēšanas dziļuma

Skrūves ieskrūvēšanas virziens	Ieskrūvēšanas dziļums, mm		
	14	42	70
Izraušanas pretestība, materiālu orientējot perpendikulāri, N (SD; VAR, %)	902 (384; 43)	2345 (709; 30)	2811 (600; 21)
Izraušanas pretestība, materiālu orientējot paralēli, N (SD; VAR, %)	869 (261; 30)	2911 (504; 17)	4311 (853; 20)

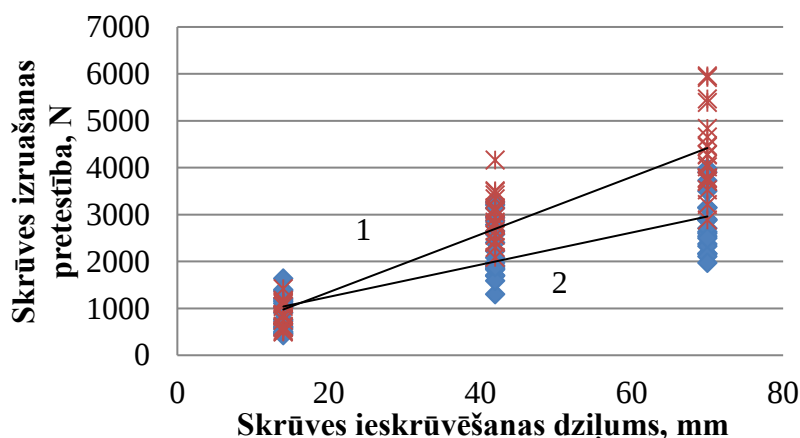
Skrūvju izraušanas pretestībai ieskrūvēšanas dziļuma robežās no 14 līdz 70 mm ir tendence pieaugt - gan skrūves ieskrūvēšanas laikā šūnveida materiālu orientējot paralēli, gan perpendikulāri. Būtiski lielāks pieaugums vērojams skrūvēm, kuras iestrādātas, materiālu orientējot perpendikulāri pret skrūves garenasi.

Skrūves ieskrūvēšanas dziļuma ietekme uz skrūves izraušanas pretestību šūnveida materiālu paralēlā virzienā parādīta 3.38. att.

Analizējot 3.38. att. rādītājus, varam secināt, ka, skrūvju SPEC17 ieskrūvēšanas dziļumam palielinoties no 14 līdz 70 mm, skrūvju izraušanas pretestība pieaug. Starp skrūvju ieskrūvēšanas dziļumu un skrūvju izraušanas pretestību, materiālu orientējot perpendikulārā virzienā, pastāv cieša ($r = 0.81$) lineāra sakarība

$$F_{sk} = 34.3d_z + 559, \quad (3.29)$$

kur: $F_{sk,90}$ - skrūvju SPEC17 izraušanas pretestība no KŠM perpendikulārajā virzienā, N;
 d_z - skrūves ieskrūvēšanas dziļums, mm.



3.38. att. Skrūves ieskrūvēšanas dziļuma ietekme uz skrūves izraušanas pretestību:

1 - materiālu orientējot paralēlā virzienā un 2 - materiālu orientējot perpendikulārā virzienā.

Palielinot skrūves ieskrūvēšanas dziļumu par 56 mm (no 14 līdz 70 mm), iespējams panākt aptuveni 3 reizes augstāku skrūvju izraušanas pretestību, šūnveida materiālu orientējot perpendikulāri pret skrūves garenasi. Pārreķinot skrūves izraušanas pretestību uz vienu mm, iegūts, ka, palielinoties skrūves ieskrūvēšanas dziļumam par 1 mm, skrūvju izraušanas pretestība palielinās vidēji par 34 N.

Analizējot 3.38. att. rādītājus, varam secināt, ka skrūvju SPEC17 ieskrūvēšanas dziļumam robežās no 14 līdz 70 mm ir būtiska ietekme ($p < 0.05$) uz skrūvju izraušanas pretestību. Starp skrūvju ieskrūvēšanas dziļumu un skrūvju izraušanas pretestību pastāv cieša ($r = 0.92$) lineāra sakarība

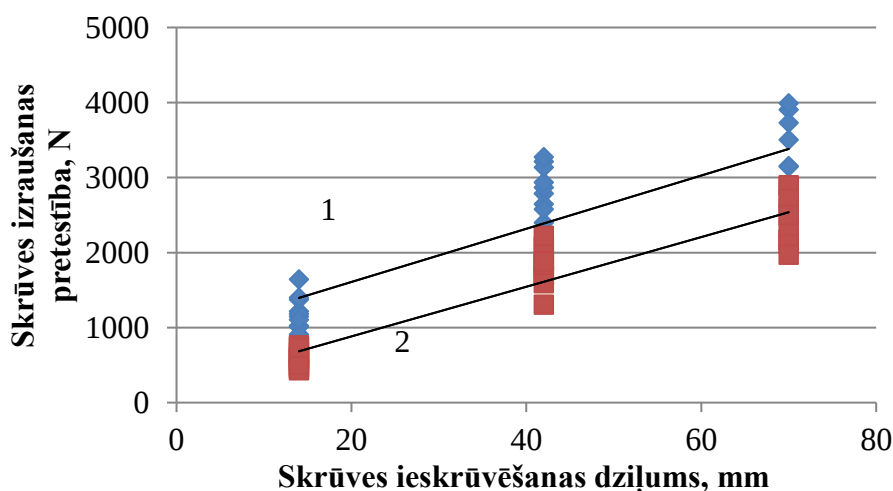
$$F_{sk,0} = 61.5d_z + 115.6, \quad (3.30)$$

kur: $F_{sk,0}$ - skrūvju izraušanas pretestība no KŠM paralēlajā virzienā, N;
 d_z - skrūves ieskrūvēšanas dziļums, mm.

Palielinot skrūves ieskrūvēšanas dziļumu par 56 mm (no 14 līdz 70 mm), iespējams panākt aptuveni 5 reizes augstāku skrūvju izraušanas pretestību, orientējot šūnveida materiālu paralēli pret skrūves garenasi. Pārreķinot skrūves izraušanas pretestību uz vienu mm, iegūts, ka, palielinoties skrūves ieskrūvēšanas dziļumam par 1 mm, skrūvju izraušanas pretestība palielinās vidēji par 61 N.

Skrūves ieskrūvēšanas vietas ietekme uz skrūves izraušanas pretestību, KŠM orientējot perpendikulāri pret skrūves garenasi, parādīta 3.39. attēlā.

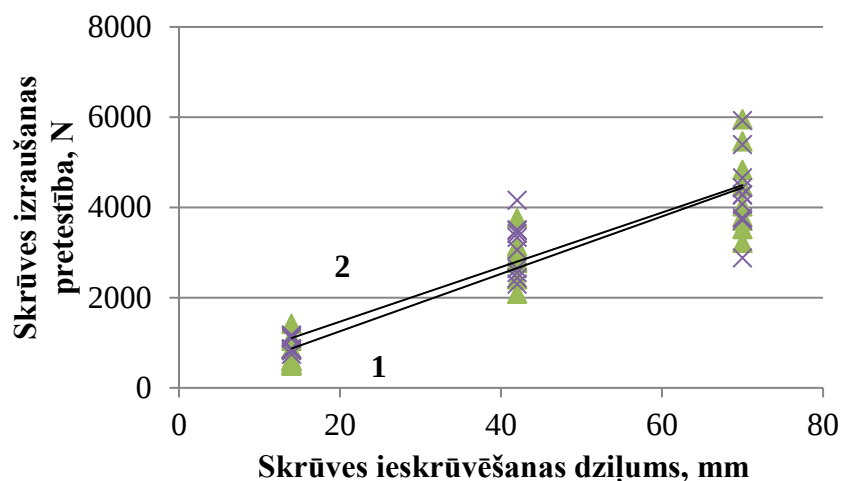
3.39. attēlā redzams, ka skrūves ieskrūvēšanas vieta, materiālu orientējot perpendikulāri pret skrūves garenasi, atstāj būtisku ietekmi uz skrūves izraušanas pretestību ($p < 0.05$). Šūnveida materiāla vieta ar lielāko koksnas daudzumu uz vītnes visu trīs ieskrūvēšanas dziļumu gadījumā būtiski palielina skrūves izraušanas pretestības rādītājus.



3.39. att. **Skrūvju ieskrūvēšanas vietas ietekme uz skrūvju izraušanas pretestību, materiālu orientējot perpendikulāri pret skrūves garenasi:**

1 - ar lielāko koksnas daudzumu uz vītnes un 2 - ar mazāko koksnas daudzumu uz vītnes.

3.40. attēlā redzams, ka skrūves ieskrūvēšanas vieta, materiālu orientējot paralēli pret skrūves garenasi, neatstāj būtisku ietekmi uz skrūves izraušanas pretestību ($p > 0.05$). Šūnveida materiāla vieta ar lielāko koksnas daudzumu uz vītnes visu trīs ieskrūvēšanas dziļumu gadījumā neietekmē skrūves izraušanas pretestības rādītājus.

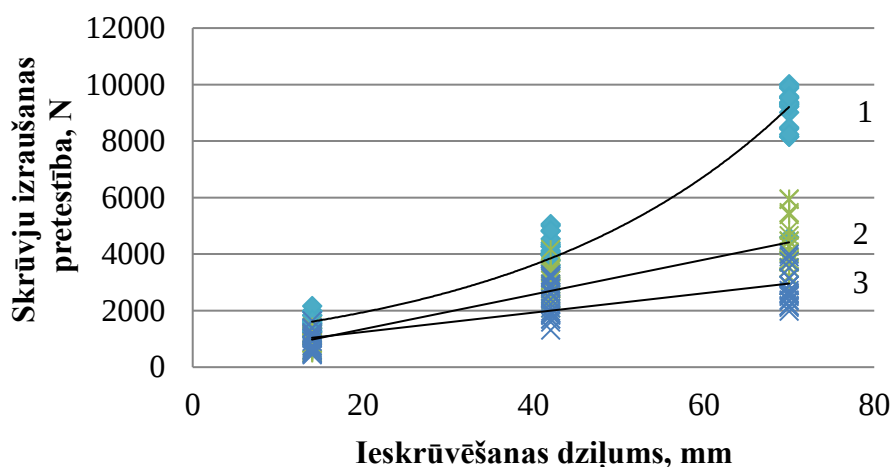


3.40. att. Skrūvju ieskrūvēšanas vietas ietekme uz skrūvju izraušanas pretestību, materiālu orientējot paralēli pret skrūves garenasi:

1 - ar lielāko koksnes daudzumu uz vītnes un 2 - ar mazāko koksnes daudzumu uz vītnes.

Lai vienkāršotu inženiertehniskos aprēķinus skrūvju izraušanas pretestības deklarēšanai no KŠM, jāizmanto zemākie skrūves izraušanas pretestības rādītāji. Salīdzinot 3.39 un 3.40. attēlā norādītos skrūvju izraušanas pretestības rādītājus abiem ieskrūvēšanas virzieniem, varam secināt, ka zemākie skrūvju izraušanas pretestības rādītāji ir iegūti, materiālu orientējot perpendikulāri pret skrūves garenasi un skrūvi ieskrūvējot vietā ar mazāko koksnes daudzumu uz vītnes. Tādējādi turpmākajos skrūvju izraušanas pretestību pētījumos var aprobežoties ar īpašību noteikšanu, materiālu orientējot perpendikulāri pret skrūves garenasi un skrūvi ieskrūvējot vietā ar mazāko koksnes daudzumu uz vītnes.

Izmantojot skrūves SPEC17, pētījumam papildus izgatavoti un pārbaudīti arī priedes masīvkoksnes paraugi, nosakot skrūvju izraušanas pretestību šķērsām kokšķiedru virzienam. Pārbaudes mērķis ir iegūt salīdzināmus skrūvju izraušanas pretestības rādītājus priedes masīvkoksnei un KŠM. Pētījuma rezultātā iegūti šādi skrūvju izraušanas pretestības vidējie rādītāji no priedes masīvkoksnes: skrūvi ieskrūvējot 14 mm dziļumā 1574 N (SD 315 N; VAR 20 %); skrūvi ieskrūvējot 42 mm dziļumā - 4251 N (SD 441 N; VAR 10 %); skrūvi ieskrūvējot 70 mm dziļumā 9044 N (SD 660 N; VAR 7 %). Skrūvju izraušanas pretestības rādītāju salīdzinājums no KŠM un priedes masīvkoksnes parādīts 3.41. attēlā.



3.41. att. Skrūvju izraušanas pretestības rādītāju salīdzinājums no koksnes šūnveida materiāla un priedes masīvkoksnes šķērsām šķiedrām:

1 - no priedes masīvkoksnes šķērsām šķiedrām; 2 - no KŠM paralēlā virzienā; 3 - no KŠM perpendikulārā virzienā.

Kā redzams 3.41. attēlā, palielinoties skrūves ieskrūvēšanas dziļumam, priedes masīvkoksnē pieaug skrūvju izraušanas pretestība. Iegūta cieša pozitīva eksponenciāla sakarība (3.31.), kuru raksturo korelācijas koeficients 0.97.

$$f_{sk,p,90} = 1041.7 \cdot 2.72^{0.0311 \cdot d_z}, \quad (3.31.)$$

kur: $f_{sk,p,90}$ - skrūvju izraušanas pretestība no priedes masīvkoksnes šķērsām šķiedrām, N;
 d_z - skrūves ieskrūvēšanas dziļums, mm.

Visu trīs ieskrūvēšanas dziļumu gadījumos skrūvju izraušanas pretestības rādītāji no masīvkoksnes ir no 1.5 līdz 3.2 reizēm augstāki nekā skrūvju izraušanas pretestības rādītāji no KŠM. Atšķirība visos apskatītajos gadījumos ir būtiska ($p < 0.05$).

Skrūvju HBS6220 un HBS8280 izraušanas pretestības statistiskie rādītāji atkarībā no skrūvju diametra un skrūves iestrādes veida KŠM apkopoti 3.15. tabulā. Konkrētie rādītāji noteikti, KŠM orientējot perpendikulārā virzienā pret skrūves garenasi un iestrādi veicot KŠM vietā ar mazāko koksnes daudzumu uz vītnes.

Analizējot 3.15. tabulā iekļautos rādītājus, redzams, ka skrūves ar diametru 8 mm bez aizurbšanas paņēmiena nodrošina būtiski augstākus ($p < 0.05$) skrūvju izraušanas pretestības vidējos rādītājus, salīdzinot ar skrūvēm, kuru diametrs ir 6 mm.

3.15. tabula

Skrūvju izraušanas pretestības vidējie rādītāji atkarībā no skrūves veida un skrūves iestrādes veida

Skrūves ieskrūvēšanas paņēmiens	Skrūves veids	
	HBS6220	HBS8280
Bez aizurbšanas (<i>SD</i> ; <i>VAR</i> , %)	2036 N (459; 23)	2765 N (770; 28)
Ar aizurbšanu (<i>SD</i> ; <i>VAR</i> , %)	2239 N (399; 18)	2515 N (459; 18)

Savukārt skrūvju diametram nav būtiskas ietekmes ($p = 0.09$) uz skrūvju izraušanas pretestības vidējiem rādītājiem gadījumā, ja tiek izmantots aizurbšanas paņēmiens. Salīdzinot aizurbšanas paņēmiena ietekmi uz skrūvju izraušanas pretestību skrūvēm ar diametru 6 mm, iespējams secināt, ka skrūvju izraušanas pretestības vidējās vērtības būtiski neatšķiras ($p = 0.21$).

Skrūvēm ar diametru 8 mm aizurbšanas paņēmienam nav būtiskas ietekmes uz skrūvju izraušanas pretestības vidējo rādītāju ($p = 0.29$). Veicot skrūvju izraušanas pretestības raksturlielumu aprēķinus, iegūts, ka skrūvēm ar diametru 6 mm bez aizurbšanas ir 1257 N, savukārt ar aizurbšanu 1572 N. Aizurbšanas paņēmiens samazina izraušanas rādītāju izkliedi, tādējādi palielinot izraušanas pretestības raksturlieluma vērtību skrūvēm ar diametru 6 mm par 25 %. Aizurbšanas paņēmiens skrūvēm ar diametru 8 mm palielina skrūvju izraušanas raksturlieluma vērtību par 8 % - no 1599 N līdz 1729 N. Pētījuma rezultāti apkopoti autora publikācijā (Iejavs u.c., 2013).

Secinājumi

1. Tādiem tehnoloģiskajiem parametriem kā skrūvju ieskrūvēšanas dziļums, ieskrūvēšanas virziens un ieskrūvēšanas vieta KŠM ir būtiska ietekme uz skrūvju izraušanas pretestību no KŠM. Skrūvju diametra palielināšana un aizurbšanas paņēmiena izmantošana skrūvju iestrādē būtiski palielina skrūvju izraušanas pretestības rādītājus no KŠM.
2. Izmantojot SPEC17 skrūves un palielinot ieskrūvēšanas dziļumu par 56 mm (no 14 līdz 70 mm), iespējams panākt aptuveni 3 reizes augstāku (no 902 līdz 2811 N) vidējo skrūvju izraušanas pretestības vērtību, šūnveida materiālu orientējot

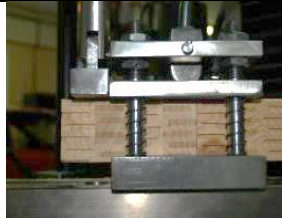
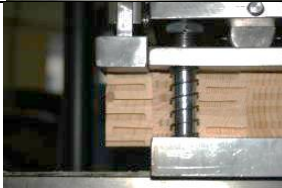
- perpendikulāri, savukārt aptuveni 5 reizes augstāku (no 869 līdz 4311 N), šūnveida materiālu orientējot paralēli pret skrūves garenasi.
3. Kokskrūvju SPEC17 bez aizurbšanas rievas ieskrūvēšana atsevišķiem KŠM paraugiem izraisīja šūnveida materiāla ieplaisāšanu. Lai novērstu šūnveida materiāla ieplaisāšanu skrūvju iestrādes laikā, pirms to ieskrūvēšanas tiek rekomendēts veikt KŠM aizurbšanu, izmantojot urbi ar aptuveno diametru 3 mm vai lietot skrūves ar aizurbšanas rievu.
 4. Viszemākie skrūvju izraušanas pretestības rādītāji konstatēti, KŠM skrūves ieskrūvējot perpendikulārā virzienā vietā ar mazāko koksnes daudzumu. Minētā materiāla virziens un ieskrūvēšanas vieta izmantota turpmākajos pētījumos skrūvju izraušanas pretestības raksturlielumu aprēķināšanai un citu skrūvju izraušanas pretestību ietekmējošo faktoru analīzei.
 5. Kokskrūvju SPEC17 izmantošanas gadījumā skrūvju izraušanas pretestības rādītāji no priedes masīvkoksnes šķērsām šķiedrām ir no 1.5 līdz 3.2 reizēm augstāki nekā skrūvju izraušanas pretestības rādītāji no KŠM. Atšķirība ir būtiska.
 6. Aizurbšanas paņēmiena izmantošana kokskrūvju ar aizurbšanas rievu iestrādē būtiski neietekmē skrūvju izraušanas pretestības vidējās vērtības. Savukārt aizurbšanas paņēmiena izmantošana kokskrūvju ar aizurbšanas rievu iestrādē KŠM perpendikulārā virzienā uzlabo skrūvju izraušanas pretestības raksturlieluma vērtības no 8 % skrūvei HBS8280 līdz 25 % skrūvei HBS6220.
 7. Skrūves HBS6220 ar diametru 6 mm un ieskrūvēšanas dziļumu 70 mm KŠM perpendikulārā virzienā nodrošina skrūves izraušanas raksturlieluma vērtību 1257 N, ja netiek lietots aizurbšanas paņēmiens, savukārt raksturlieluma vērtību 1572 N, ja tiek lietots aizurbšanas paņēmiens ar 3.5 mm diametra urbi.
 8. Skrūve HBS8280 ar diametru 8 mm un ieskrūvēšanas dziļumu 70 mm KŠM perpendikulārā virzienā nodrošina skrūves izraušanas raksturlieluma vērtību 1599 N, ja netiek lietots aizurbšanas paņēmiens, savukārt raksturlieluma vērtību 1729 N, ja tiek lietots aizurbšanas paņēmiens ar 5 mm diametra urbi.

3.6.4. Līmētā plaknes savienojuma robežstiprība bīdē

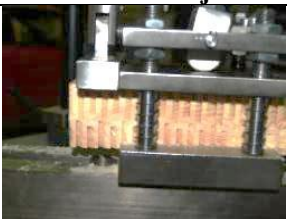
Pārbaudot KŠM četras zonas, iegūtie robežstiprības bīdē statistiskie rādītāji un pārbaudes vizualizācija parādīta 3.16. tabulā.

3.16. tabula

Koksnes šūnveida materiāla robežstiprības bīdē rādītāju salīdzinājums dažādās materiāla zonās

Slogošanas zonas un iegūtie robežstiprības bīdē rādītāji		Vizualizācija
1. zona. Robežstiprība bīdē noteikta paralēli šūnveida materiāla kārtām, pa vidu starp divām līmes šuvēm		
Vidējā robežstiprība bīdē, MPa	0.382 (SD 0.084; VAR 22 %)	
2. zona. Robežstiprība bīdē noteikta paralēli šūnveida materiāla kārtām, tieši pa līmes šuvēm		
Vidējā robežstiprība bīdē, MPa	0.649 (SD 0.145; VAR 22 %)	

3.16. tabulas nobeigums

Slogošanas zonas un iegūtie robežstiprības bīdē rādītāji		Vizualizācija
3. zona. Robežstiprība bīdē noteikta perpendikulāri šūnveida materiāla bloka plaknei		
Vidējā robežstiprība bīdē, MPa	0.906 (SD 0.123; VAR 14 %)	
4. zona. Robežstiprība bīdē noteikta, šūnveida materiāla līmes šuvi orientējot 90° leņķī attiecībā pret bīdes plakni		
Vidējā robežstiprība bīdē, MPa	0.715 (SD 0.118; VAR 17 %)	

KŠM līmējuma kvalitāte (2. zona) nodrošina divas reizes augstākus robežstiprības rādītājus bīdē, salīdzinot ar KŠM konstruktīvo robežstiprību bīdē, kas noteikta paralēli šūnveida materiāla kārtām, pa vidu starp divām līmes šuvēm (1. zona). Gadījumos, kad robežstiprība bīdē noteikta perpendikulāri šūnveida materiāla bloka plaknei (3. zona) un robežstiprība bīdē noteikta, šūnveida materiāla līmes šuvi orientējot 90° leņķī attiecībā pret bīdes plakni (4. zona), iegūtie vidējie robežstiprības rādītāji bīdē ir būtiski augstāki, salīdzinot ar līmes šuves robežstiprības rādītājiem bīdē.

KŠM vidējie robežstiprības rādītāji bīdē visos tā virzienos ir 4 līdz 10 reizes zemāki, salīdzinot ar līmēto konstrukciju kokmateriālu minimāli pieļaujamo plaknes savienojumu robežstiprību bīdē 4 MPa - saskaņā ar standartu LVS EN 14080.

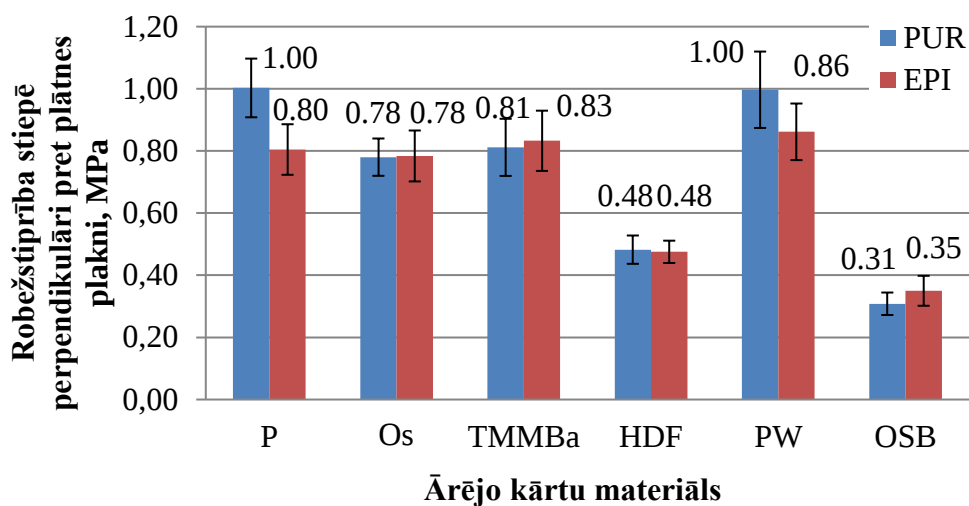
Secinājumi

1. KŠM konstruktīvo stiprību dažādās tā zonās un virzienos raksturo robežstiprības rādītāji bīdē no 0.382 līdz 0.906 MPa. Zemākais vidējais rādītājs noteikts 1. zonā jeb paralēli šūnveida materiāla kārtām, pa vidu starp divām līmes šuvēm. Minētais rādītājs ir būtiski zemāks salīdzinājumā ar vidējo rādītāju 0.649 MPa, kas noteikts paralēli šūnveida materiāla kārtām, tieši pa līmes šuvi ($p < 0.05$).
2. Veiktās KŠM līmes šuves pārbaudes liecina, ka KŠM līmējuma mehāniskā izturība ir augstāka par KŠM konstruktīvo izturību atsevišķos tā virzienos un zonās. Tādējādi iespējams secināt, ka līmes šuves mehāniskā izturība ir pietiekama KŠM paneļu izgatavošanai.
3. KŠM vidējie robežstiprības rādītāji bīdē visos tā virzienos un zonās ir 4 līdz 10 reizes zemāki, salīdzinot ar līmētajiem konstrukciju kokmateriāliem minimāli pieļaujamo līmēto plaknes savienojumu robežstiprību bīdē 4 MPa.

3.6.5. Salīmējamība ar citiem koksnes materiāliem

Pētījuma rezultātā 12 grupās pārbaudīti 158 trīs slāņu materiāla paraugi ar 11 līdz 15 paraugiem vienā grupā.

Stiepes robežstiprības perpendikulāri pret trīs slāņu plātņu materiālu plakni vidējie rādītāji un vidējo rādītāju 95 % ticamības intervāls paraugiem, līmētiem ar PUR un EPI līmi, parādīti 3.42. attēlā. Paraugu raksturīgo sagrāves veidu salīdzinājums atspoguļots 3.43. attēlā.

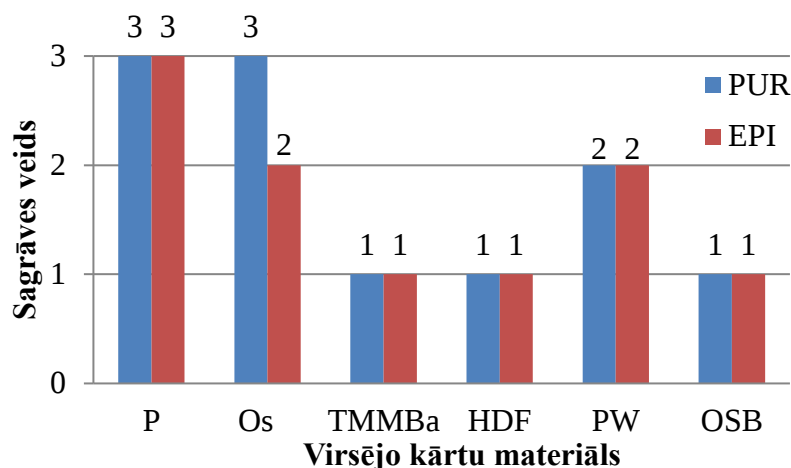


3.42. att. KŠM trīs kārtu plātņu materiālu vidējie robežstiprības rādītāji stiepē perpendikulāri pret plātņu plakni paraugiem, kas līmēti ar atšķirīgām līmēm:

vidējās vērtības un to 95 % ticamības intervāls; PUR - poliuretāna līme; EPI - emulsipolimērizocianāta līme; P - priede; Os - osis; TMMBa - termomehāniski blīvināts balttalksnis; HDF - augsta blīvuma kokšķiedru plātne; PW - saplāksnis un OSB - orientēto kokskaidu plātne.

Augstākos robežstiprības stiepē rādītājus, izmantojot poliuretāna līmi *Kleiberit PUR 501*, nodrošina šūnveida materiāls, kas aplīmēts ar priedes masīvkoksnes slāni vai bērza saplāksni. Vidējais robežstiprības stiepē rādītājs ir 1.0 MPa, un tas abām materiālu grupām būtiski neatšķiras. Aplīmējot šūnveida materiālu ar priedes vai oša koksni un to sagraujot, sagrāve galvenokārt notiek pa līmes šuvi. Tas norāda uz to, ka pētījumā izmantotā līmēšanas tehnoloģija ar vidējiem līmēšanas tehnoloģiskajiem parametriem nav optimālā šūnveida materiāla salīmēšanai ar priedes un oša koksni. Šajos gadījumos nepieciešams veikt plānoto daudzfaktoru eksperimentu optimālo līmēšanas režīmu noskaidrošanai. Aplīmējot šūnveida materiālu ar termomehāniski blīvinātu un termiski modificētu balttalksni, augsta blīvuma šķiedru plātņi, bērza saplāksni un orientēto kokskaidu plātņi, materiālu raksturo sagrāve vai nu pa ārējo kārtu materiālu, vai nu pa šūnveida materiālu, kas liecina par pietiekamu šūnveida materiāla saistīšanos ar ārējo kārtu materiāliem. Iegūtie robežstiprības rādītāji stiepē raksturo virsējo kārtu materiālu robežstiprību stiepē perpendikulāri pret materiāla plakni. Zemākie robežstiprības rādītāji stiepē, kas būtiski atšķiras no pārējām paraugu grupām, iegūti, šūnveida materiālu aplīmējot ar orientēto kokskaidu plātņi (0.31 MPa) un augsta blīvuma šķiedru plātņi (0.48 MPa). Poliuretāna līme *Kleiberit 501*, kuras līmēšanas tehnoloģiskie parametri ir šādi - līmes uzklājums 150 g m^{-2} , presēšanas spiediens 0.2 MPa, izturēšanas laiks zem spiediena 60 min., ir piemēroti šūnveida materiāla aplīmēšanai ar termomehāniski blīvinātu, termiski modificētu balttalksni, augsta blīvuma šķiedru plātņi, bērza saplāksni un orientēto kokskaidu plātņi.

Augstākais trīs slāņu materiāla stiepes robežstiprības rādītājs perpendikulāri pret plātnes plakni ir paraugiem, līmētiem ar EPI līmi (0.86 MPa), tas ir iegūts, pielīmējot bērza saplāksni. Tai pašā laikā šis iegūtais vidējais robežstiprības stiepē rādītājs būtiski neatšķiras no šūnveida materiāla, kas aplīmēts ar priedes, oša masīvkoksni un termomehāniski blīvinātu termiski modificētu balttalksni. Analizējot minēto trīs slāņu materiālu sagrāves veidu, varam secināt, ka, aplīmējot šūnveida materiālu ar priedes koksni, pētījumā izmantotos līmēšanas tehnoloģiskos parametrus ir iespējams uzlabot, tā kā sagrāve visbiežāk notikusi pa līmes šuvi. Līmes uzklājums 170 g m^{-2} ; spiediens 0.2 MPa un izturēšanas laiks zem spiediena 60 min. ir piemēroti KŠM aplīmēšanai ar oša masīvkoksni, termomehāniski termiski modificētu balttalksni, augsta blīvuma šķiedru plātņi, bērza saplāksni un orientēto kokskaidu plātņi.



3.43. att. Sagrāves veidu salīdzinājums KŠM, aplīmētam ar dažāda veida koksnes materiāliem:

1 - sagrāve pa ārējo kārtu materiālu; 2 - sagrāve pa šūnveida materiālu; 3 - sagrāve pa līmes šuvi; apzīmējumus skat 3.42. att.

EPI līmes izmantošanu visu trīs slāņu materiālu sagrāvei, izņemot ar priedes masīvkoksni aplīmēto, raksturo materiāla sagrāve pa KŠM (Os, PW) vai pa ārējo kārtu materiālu (TMMBa, HDF, OSB).

Aplīmējot šūnveida materiālu ar priedes masīvkoksni, būtiski augstāka vidējā robežstiprības stiepē vērtība iegūta, izmantojot poliuretāna līmi *Kleiberit PUR 501*. Pārējo trīs slāņu materiālu izgatavošanas gadījumos, viena veida ārējo kārtu materiāla gadījumā līmes veids būtiski neietekmē vidējos robežstiprības stiepē rādītājus. Analizējot 3.43. attēlu, redzams, ka līmes veids neietekmē līmētā trīs slāņu materiāla sagrāves veidu, izņemot gadījumā, kad KŠM tiek aplīmēts ar oša masīvkoksni. Pielīmējot oša masīvkoksni pie KŠM ar poliuretāna līmi, materiāla sagrāve notikusi galvenokārt pa līmes šuvi, savukārt izmantojot EPI līmi, sagrāve norisinājusies galvenokārt pa šūnveida materiālu.

3.6.1. nodaļā noteiktā neaplīmētā KŠM robežstiprība stiepē materiāla perpendikulārā virzienā ir 0.89 MPa, kas būtiski neatšķiras no iegūtajiem aplīmēto materiālu robežstiprības stiepē vidējo vērtību paraugiem, kuru sagrāve notikusi galvenokārt pa KŠM ($p > 0.05$).

Ņemot vērā KŠM paralēlā virziena uzbūves analīzi un 3.6.1. nodaļā noteikto KŠM paralēlā virziena robežstiprību stiepē, var apgalvot, ka atkarībā no aplīmēšanai izmantotā materiāla robežstiprības savienojuma robežstiprība stiepē būs mazāka vai vienāda ar KŠM robežstiprību stiepē 0.43 MPa. Pētījuma rezultāti apkopoti autora publikācijā (Iejavs u.c., 2013).

Secinājumi

1. KŠM aplīmēšanai perpendikulārā virzienā ar masīvkoksni un citiem koksnes materiāliem var izmantot poliuretāna līmi *Kleiberit PUR 501* un emulsipolimērizocianāta līmi *Kleiberit EPI 304 4*, kas nodrošina kvalitatīvu KŠM saistīšanos ar masīvkoksni un citiem koksnes materiāliem.
2. Līmēšanas parametri - presēšanas spiediens 0.2 MPa, izturēšanas laiks zem spiediena 60 min., līmes uzklājums 150 g m^{-2} (PUR līmei) un 170 g m^{-2} (EPI līmei) - termomehāniski blīvināta termiski modificēta baltalkšņa, augsta blīvuma šķiedru plātnes, bērza saplākšņa un orientēto kokskaidu plātņu gadījumā nodrošina augstākus līmes šuves robežstiprības rādītājus stiepē, nekā tie ir salīmējamajiem materiāliem.
3. Trīs kārtu materiāla līmēšanā izmantojot poliuretāna līmi, augstākie (1.0 MPa) robežstiprības rādītāji stiepē perpendikulāri pret plātnes plakni iegūti, priedes šūnveida materiālu aplīmējot ar priedes masīvkoksni vai bērza saplākšni.
4. Emulsipolimērizocianāta līmes gadījumā augstākie KŠM un ārējo kārtu materiāla robežstiprības rādītāji stiepē iegūti, izmantojot ārējā kārtā priedes un oša

- masīvkoksni, termomehāniski blīvinātu baltalksni un bērza saplāksni, nodrošinot robežstiprību stiepē no 0.78 līdz 0.86 MPa. Atšķirība starp minēto paraugu grupu vidējiem rādītājiem nav statistiski būtiska.
- KŠM aplīmējot perpendikulārā virzienā ar citiem koksnes materiāliem, maksimālā robežstiprība stiepē ir 1.00 MPa, savukārt materiālu aplīmējot paralēlā virzienā, robežstiprība stiepē nepārsniedz 0.43 MPa.
 - Pētījumā izmantotās līmēšanas tehnoloģijas nav vērtājamās kā optimālas KŠM salīmēšanai ar priedes masīvkoksni un PUR līmes gadījumā arī ar oša masīvkoksni, jo materiāla sagrāve notikusi galvenokārt pa līmes šuvi. Šajos gadījumos nepieciešams veikt plānoto daudzfaktoru eksperimentu, lai atrastu optimālus līmēšanas režīmus KŠM salīmēšanai ar priedes un oša koksni.
 - Trīs kārtu materiāla ārējo kārtu materiāla īpašībām ir būtiska ietekme uz trīs kārtu materiāla robežstiprību stiepē perpendikulāri pret plātnes plakni un materiāla sagrāves veidu. Jo zemāka virsējo kārtu materiāla robežstiprība stiepē, jo zemākus rādītājus uzrādīs arī trīs slāņu materiāls.

3.7. Koksnes šūnveida materiāla īpašību kopsavilkums

Lai vieglāk orientētos daudzos pētījumos iegūtajos KŠM īpašību rādītājos, tie apkopoti 3.17. tabulā. Ņemot vērā to, ka visi pētījumi galvenokārt balstīti uz KŠM, kura izgatavošanā izmantotas 28 mm biezas priedes koksnes labeles, tieši šāda materiāla īpašības apkopotas un salīdzinātas ar priedes koksne vai skujkoku masīvkoksnes rādītājiem.

3.17. tabula

KŠM īpašību salīdzinājums ar priedes koksnes īpašībām

Nr.	Rādītājs	Mēr- vienība	Koksnes šūnveida materiāls		Priedes masīvkoksne	
			0	90	0	90
Fizikālās īpašības						
1	mitrums W	%	12.3		12.0 ¹⁾	
2	blīvums ρ	kg m ⁻³	308		500 ¹⁾	
3	rukšanas koeficients k_r	% % ⁻¹	0.248	0.0214	0.010 ²⁾	0.220 ²⁾
4	brīšanas koeficients k_b	% % ⁻¹	0.255	0.0215	-	-
5	tilpuma rukšanas koeficients k_v	% % ⁻¹	0.27		0.42 ²⁾	
6	ūdens tvaika difūzijas pretestības koeficients μ	-	15.5	6.5	-	50.0 ³⁾
7	ūdens tvaika pretestības difūzijai ekvivalentā gaisa slāņa biezums S_d	m	1.71	0.73	-	4.48 ³⁾
8	siltumvadītspējas koeficients λ	W m ⁻¹ K ⁻¹	0.097	0.148	0.300 ⁵⁾	0.130 ³⁾
Fizikāli ķīmiskās īpašības un ugunsreakcijas klase						
9	ugunsgrēka attīstības ātruma indekss FIGRA	W s ⁻¹	696	1426	321 ⁴⁾	-
10	kopējā siltuma izdalīšanās 600 s laikā THR _{600s}	MJ	58	108	23 ⁴⁾	-
11	ugunsreakcijas klase	-	D-s1, d0	E	D-s2, d0 ⁷⁾	-
Mehānisko īpašību vidējie rādītāji un to 5 % kvantiļa raksturlieluma vērtības						
12	robežstiprība liecē f_m	MPa	2.07	2.15	39.90 ⁸⁾	-
13	robežstiprības liecē 5 % kvantiļa raksturlieluma vērtība $f_{m,k}$	MPa	1.64	1.79	24.00 ⁶⁾	-
14	robežstiprība spiedē f_c	MPa	1.27	1.44	42.10 ¹⁰⁾	-

3.17. tabulas nobeigums

Nr.	Rādītājs	Mērvienība	Koksnes šūnveida materiāls		Priedes masīvkoksne	
			0	90	0	90
15	robežstiprības spiedē 5 % kvantiļa raksturlieluma vērtība $f_{c,k}$	MPa	1.05	1.20	21.00 ⁶⁾	2.50 ⁶⁾
16	robežstiprība stiepē f_t	MPa	0.427	0.892	16.000 ¹¹⁾	-
17	robežstiprības stiepē 5 % kvantiļa raksturlieluma vērtība $f_{t,k}$	MPa	0.290	0.648	14.000 ⁶⁾	0.400 ⁶⁾
18	robežstiprība bīdē f_v	MPa	0.22	1.73	5.81 ⁹⁾	-
19	robežstiprības bīdē 5 % kvantiļa raksturlieluma vērtība $f_{v,k}$	MPa	0.17	1.25	4.00 ⁶⁾	-
20	lokālais elastības modulis liecē $E_{m,l}$	MPa	179	140	12500 ⁸⁾	370 ⁶⁾
21	lokālā elastības moduļa liecē 5 % kvantiļa raksturlieluma vērtība $E_{m,l,k}$	MPa	153	118	7400 ⁶⁾	-
22	elastības modulis spiedē E_c	MPa	155	124	11800 ⁸⁾	-
23	elastības moduļa spiedē 5 % kvantiļa raksturlieluma vērtība $E_{c,k}$	MPa	125	116	7400 ⁶⁾	-
24	elastības modulis stiepē E_t	MPa	161	125	11600 ⁸⁾	-
25	elastības moduļa stiepē 5 % kvantiļa raksturlieluma vērtība $E_{t,k}$	MPa	134	106	7400 ⁶⁾	-
26	elastības modulis bīdē G	MPa	6	95	690 ⁶⁾	-
27	elastības moduļa bīdē G_k	MPa	4	72	-	-
28	līmētā savienojuma robežstiprība bīdē f_{sl}	MPa	0.649	-	4.000 ⁷⁾	-
29	skrūvju SPEC 17 izraušanas pretestība ieskrūvējot 70 mm dziļumā F_s	N	4311	2811	-	9044
30	aplīmēta koksnes šūnveida materiāla robežstiprība stiepē perpendikulāri pret plātnes plakni $f_{t,apl}$	MPa	<0.427	0.311-1.000	-	-

¹⁾DIN 68100; ²⁾Wagenführ, 1996; ³⁾LVS EN ISO 10456; ⁴⁾Bukšāns, 2010; ⁵⁾Niemz, 1993; ⁶⁾LVS EN 338 C24 stiprības klases zāģmateriāliem; ⁷⁾LVS EN 14080; ⁸⁾Bacher un Krzosek, 2013; ⁹⁾Ермолаева и.с., 1977; ¹⁰⁾Малыгина и Хавратова, 1980.

3.8. Nodaļas secinājumi

1. KŠM mitrums ir tieši atkarīgs no relatīvā gaisa mitruma. Priedes KŠM mitrums pie vienādiem mikroklimata parametriem atbilst priedes masīvkoksnes līdzsvara mitrumam, tādēļ koksnes līdzsvara mitruma diagramma ir izmantojama arī KŠM mitruma prognozēšanai atkarībā no relatīvā gaisa mitruma un temperatūras.
2. KŠM blīvums ir atkarīgs no relatīvā gaisa mitruma un ar to saistīto materiāla mitrumu. Noteiktais priedes KŠM vidējais blīvums ir 308 kg m⁻³, tas ir par 38 % zemāks nekā literatūrā norādītais priedes masīvkoksnes blīvums. Atšķirība starp KŠM blīvumu un koksnes plātņu materiālu blīvumu ir vēl lielāka.
3. Mitruma izmaiņas būtiski ietekmē KŠM ģeometriskos izmērus un tilpumu. KŠM paralēlā virzienā raksturo rukšanas koeficients 0.248 % %⁻¹, tas ir salīdzināms ar priedes koksnes radiālā un tangenciālā virziena rukšanas koeficienta vidējo vērtību 0.22 % %⁻¹. Materiāla perpendikulārā virzienā rukšanas koeficients ir 0.0214 % %⁻¹, tas ir 6 līdz 8 reizes mazāks nekā priedes koksnei tangenciālā virzienā. Tilpuma izmaiņas raksturo tilpuma rukšanas koeficients 0.275 % %⁻¹. Tās ir 1.6 reizes jeb par 36 % mazākas nekā

- priedes koksnei. Rukšanas koeficienti visos trīs materiāla virzienos ir ievērojami zemāki, salīdzinot ar lielāko daļu koksnes plātņu materiālu rukšanas koeficientiem.
4. KŠM virzienam ir būtiska ietekme uz ūdens tvaika pārvades raksturlielumiem. Netraucētā gaisa plūsma cauri KŠM perpendikulārā virzienā nodrošina zemu ūdens tvaika difūzijas pretestības koeficientu 6.53, savukārt noslēgtā uzbūve materiāla paralēlā virzienā nodrošina 2.4 reizes augstāku ūdens tvaika difūzijas pretestības koeficientu 15.5. Noteiktā KŠM ūdens tvaika difūzijas pretestība ir būtiski zemāka, salīdzinot ar būvniecībā plaši izmantoto koksnes plātņu materiālu un masīvkoksnes ūdens tvaika difūzijas pretestības rādītājiem.
 5. KŠM paralēlā virzienā raksturo siltumvadītspējas koeficients $0.0977 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, savukārt materiāla perpendikulārā virzienā tas ir augstāks $0.148 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$. KŠM siltumvadītspējas koeficients paralēlā virzienā ir par 25 % zemāks nekā koksnei šķērsām šķiedrām, savukārt perpendikulārā virzienā par 14 % augstāks nekā koksnei šķērsām šķiedrām. KŠM siltumvadītspēja materiāla paralēlā virzienā ir zemāka nekā lielākajai daļai būvniecībā izmantotajiem koksnes plātņu materiāliem, kuru blīvums pārsniedz 500 kg m^{-3} .
 6. KŠM perpendikulārā virziena ugunsgrēka attīstības ātruma indeksa vērtība (1426 W s^{-1}) ir par 105 % lielāka nekā materiāla paralēlā virzienā (696 W s^{-1}), un kopējā siltuma izdalīšanās 600 s laikā ir (108 MJ) par 86 % lielāka nekā materiāla paralēlajā virzienā (58 MJ). KŠM paralēlā virzienā noteikta D ugunsreakcijas klase ar līdzīgiem ugunsreakcijas parametriem kā termiski plāniem koksnes plātņu materiāliem. Materiālam perpendikulārā virzienā prognozēta E ugunsreakcijas klase, un noteiktie ugunsreakcijas parametri būtiski pārsniedz masīvkoksnes un koksnes plātņu materiālu ugunsreakcijas parametrus.
 7. KŠM mehāniskās īpašības ir atkarīgas no materiāla virziena. Noteiktie robežstiprības rādītāji ir robežās no 0.217 MPa līdz 2.15 MPa. Vidējie elastības moduļu rādītāji ir no 5.87 MPa līdz 179 MPa. Saistībā ar materiāla daudzuma samazināšanos un konstruktīvajām izmaiņām KŠM mehāniskie rādītāji ir būtiski zemāki nekā priedes masīvkoksnei.
 8. KŠM slogojot paralēlā virzienā, paraugu izmēru palielināšana būtiski paaugstina tādos mehāniskos rādītājus kā robežstiprību liecē un lokālo elastības moduli liecē. Augstuma palielināšana ievērojami samazina robežstiprības rādītājus spiedē, savukārt izmēru izmaiņas neatstāj būtisku ietekmi un materiāla robežstiprību un elastības moduli bīdē.
 9. KŠM līmēto plaknes savienojumu raksturo vidējā robežstiprība bīdē 0.649 MPa - tā ir būtiski augstāka par KŠM konstruktīvo bīdes stiprību vājākajā materiāla vietā 0.382 MPa, bet tā ir veirākas reizes zemāka par līmētajiem konstrukciju kokmateriāliem minimāli pieļaujamo līmēto plaknes savienojumu robežstiprību bīdē 4 MPa.
 10. Tādiem tehnoloģiskajiem parametriem kā skrūvju ieskrūvēšanas dziļums, ieskrūvēšanas virziens un ieskrūvēšanas vieta KŠM ir būtiska ietekme uz skrūvju izraušanas pretestību. Skrūvju diametra palielināšana un aizurbšanas paņēmiena izmantošana skrūvju iestrādē ievērojami palielina skrūvju izraušanas pretestības rādītājus.
 11. Veidojot izstrādājumus, kuros KŠM perpendikulārā virzienā aplīmēts ar koksnes plātņu materiāliem, iegūti vidējie robežstiprības rādītāji stiepē perpendikulāri pret plātņu plakni no 0.311 MPa līdz 1.00 MPa. Perpendikulārā virzienā aplīmētam materiālam robežstiprība stiepē ir zemāka vai vienāda ar KŠM konstruktīvo robežstiprību stiepē 0.431 MPa.
 12. Promocijas darbā noteiktās un apkopotās īpašības sniedz iespēju veikt inženiertehniskos aprēķinus un datorsimulācijas dažādiem izstrādājumiem un konstrukcijām, kuras projektētas no KŠM. Noteiktās īpašības var salīdzināt ar citu būvniecībā plaši izmantoto materiālu īpašībām.

4. KOKSNES ŠŪNVEIDA MATERIĀLA ĪPAŠĪBU UZLABOŠANA

4.1. Materiāli un metodes fizikālo īpašību uzlabošanai

4.1.1. Siltuma caurlaidības koeficients

Sienu konstrukciju siltuma caurlaidības koeficienti aprēķināti saskaņā ar standarta LVS EN ISO 6946 metodiku. Aprēķini veikti piecām dažādām KŠM sienas konstrukcijām:

1. paneļa konstrukcija veidota no 56 mm bieza (tehnoloģiski minimāli iespējamā) divu kārtu KŠM paralēlā virzienā, kurš no abām pusēm aplīmēts ar 18 mm biezām priedes koksnes kārtām, iegūstot paneli ar biezumu 92 mm;
2. paneļa konstrukcija veidota no 112 mm bieza (tehnoloģiski maksimāli iespējamā) četru kārtu KŠM paralēlā virzienā, kurš no abām pusēm aplīmēts ar 18 mm biezām priedes koksnes kārtām, iegūstot paneli ar biezumu 148 mm;
3. konstrukcija ir veidota ar aprēķinu ceļā iegūtā KŠM biezuma, kurš nodrošina minimālās Latvijas būvnormatīva LBN 002-01 prasības attiecībā uz sienu siltuma caurlaidības koeficientu. Iepriekš minētā paneļa ārējās kārtas analogiski pirmajām divām paneļu konstrukcijām veidotas ar 18 mm biezām priedes koksnes kārtām;
4. paneļa konstrukcijas tiek veidotas, 1. (tehnoloģiski plānāko) paneli papildinot ar 112 mm biezu siltumizolācijas materiālu. Aprēķinu ceļā iegūtais siltumizolācijas materiāla biezums plānākajam KŠM panelim nodrošina būvnormatīva prasības attiecībā uz sienas siltuma caurlaidības koeficientu;
5. paneļa konstrukcijas tiek veidotas, 2. (tehnoloģiski biezāko) paneli papildinot ar 92 mm biezu siltumizolācijas materiālu. Aprēķinu ceļā iegūtais siltumizolācijas materiāla biezums biezākajam KŠM panelim nodrošina būvnormatīva prasības attiecībā uz sienas siltuma caurlaidības koeficientu.

Iekšējo un ārējo virsmu termisko pretestību sienām atkarībā no siltuma plūsmas virziena raksturo koeficienti $R_{si} = 0.13 \text{ m}^2 \text{ K W}^{-1}$ un $R_{se} = 0.04 \text{ m}^2 \text{ K W}^{-1}$ (Borodinecs, 2007). Sienu konstrukciju siltuma caurlaidības koeficientu robežvērtību precīzai noteikšanai saskaņā ar LBN 002-01 ir veikts sienas konstrukcijas kvadrātmetra masas aprēķins. Aprēķina vajadzībām pieņemts priedes masīvkoksnes dēļu blīvums $\rho_{koksne} = 500 \text{ kg m}^{-3}$ (Wagenführ, 1996), priedes koksnes siltumvadītspējas koeficients $\lambda_{koksne} = 0.13 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ (LVS EN ISO 10456:2007) un siltumizolācijas vates rādītāji: siltumvadītspējas koeficients $\lambda_v = 0.038 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ un $\rho_v = 18 \text{ kg m}^{-3}$. Sienu prototipu siltumtehnikajos aprēķinos izmantots 3.2.5. nodaļā noteiktais KŠM zemākais siltumvadītspējas koeficients materiāla paralēlā virzienā $\lambda_{KŠM,0} = 0.098 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, jo minētais virziens nodrošina zemāku konstrukcijas siltuma caurlaidības koeficientu $U (\text{W m}^{-2} \text{ K}^{-1})$. Sienas masas aprēķinos izmantots 3.2.2. nodaļā noteiktais KŠM blīvums 307 kg m^{-2} . Saskaņā ar LBN 002-01 dzīvojamo māju sienām ar masu, kas mazāka par 100 kg m^{-2} , siltuma caurlaidības koeficienta maksimālā vērtība nedrīkst pārsniegt $0.25 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$, bet sienām ar masu, kas lielāka par 100 kg m^{-2} , minētais koeficients nedrīkst pārsniegt $0.30 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$.

4.1.2. Skaņas gaisā izolācijas indekss

Pētījumā izstrādāti pieci konstruktīvie risinājumi KŠM trīs kārtu durvju un ēku sienu paneļu skaņas izolācijas indeksu novērtēšanai.

Pētījumā skaņas izolācijas indekss noteikts divu biezumu KŠM trīs kārtu durvju paneļu prototipiem ar biezumu 25 un 60 mm. Ņemot vērā noteiktos KŠM rukšanas un briešanas rādītājus, kā arī materiāla uzbūvi, durvju izgatavošanai tika izmantots KŠM perpendikulārā virzienā. Durvju paneļa augstums ir 1972 mm un platums 825 mm. 25 mm panelis sastāvēja no 17 mm bieza KŠM, kurš no abām pusēm aplīmēts ar 4 mm biezu augsta blīvuma

kokšķiedru plātni (HDF), bet otrā veida panelis sastāvēja no 52 mm bieza KŠM, kurš no abām pusēm aplīmēts ar 4 mm biezu HDF, attiecīgi turpmāk tekstā panelis 25 un panelis 60. Iepriekš aprakstītajiem šūnveida koksnes paneļiem tika noteikta skaņas vājinājuma indeksa R raksturlīkne saskaņā ar standarta LVS EN ISO 140-3 prasībām un ievērtēta skaņas apkārtceļu ietekme saskaņā ar standarta LVS EN ISO 140-1 prasībām. Pēc noteiktā skaņas vājinājuma indeksa R raksturlīknes tika aprēķināts skaņas izolācijas indekss $R_w (C, C_{tr})$ saskaņā ar standarta LVS EN ISO 717-1 metodiku.

Pētījuma veikšanai izgatavoti trīs veidu sienu paneļu prototipi ar nominālajiem izmēriem - platumu 1150 mm un augstumu 3000 mm. Ņemot vērā ievērojami augstāku KŠM perpendikulārā virziena siltumvadītspējas koeficienta rādītāju, sienas prototipu izgatavošanai izmantots KŠM paralēlā virzienā. Lai novērtētu KŠM uzbūves ietekmi uz sienas paneļu skaņas izolācijas indeksu, pētījumā izmantoti trīs dažādu veidu koksnes šūnveida materiāli ar atšķirīgu konstrukciju (lameles biezumu un kārtu skaitu). Sienas paneļu prototipu apraksts ietverts 4.1. tabulā.

4.1. tabula

Sienas paraugu prototipu apraksts skaņas izolācijas indeksu noteikšanai

Parauga apzīmējums	Parauga tips (biezums, mm)	Paneļa konstrukcija pa kārtām
148	3 slāņu sienu panelis (148 mm)	1) masīva līmēta priede 18 mm, 2) 4 kārtu priedes koksnes šūnveida materiāls (112 mm), 3) masīva līmēta priede 18 mm
92	3 slāņu sienu panelis (92 mm)	1) masīva līmēta priede 18 mm, 2) 2 kārtu priedes koksnes šūnveida materiāls (56 mm), 3) masīva līmēta priede 18 mm
108	3 slāņu sienu panelis (108 mm)	1) masīva līmēta priede 18 mm, 2) 4 kārtu priedes koksnes šūnveida materiāls (72 mm), 3) masīva līmēta priede 18 mm

KŠM sienu paneļu prototipu skaņas vājinājuma indeksa frekvenču raksturlīknes noteiktas saskaņā ar standartu LVS EN ISO 10140-(1-5) prasībām, ievērtējot skaņas apkārtceļu ietekmi. Pēc mērījumiem aprēķināti sienas prototipu skaņas izolācijas indeksi saskaņā ar standarta LVS EN ISO 717-1 nosacījumiem.

4.2. Rezultāti un diskusija fizikālo īpašību uzlabošanai

4.2.1. Siltuma caurlaidības koeficients

Pētījuma rezultātā aprēķinātās dažādu konstruktīvo risinājumu sienas paneļu siltuma caurlaidības koeficientu vērtības apkopotas 4.2. tabulā.

1. un 2. veida sienas paneļiem (skat. 4.2. tab.), kuru izgatavošanā izmantotas 28 mm biezas lameles, ir aprēķinātas ievērojami augstākas siltuma caurlaidības koeficienta vērtības nekā būvnormatīvā LBN 002-01 noteiktās sienu konstrukciju siltuma caurlaidības koeficienta robežvērtības. Tādējādi minēto paneļu izmantošana bez papildu siltinājuma privātmāju un publisko ēku būvniecībā nav pieļaujama.

Piecu dažādu konstrukciju sienu siltuma caurlaidības koeficienti, izmantojot koksnes šūnveida materiālu (KŠM₀) paralēlā virzienā

Nr.	Sienas uzbūve	Kārtas biezums b , mm	Siltumvadītspējas koeficients λ , W m ⁻¹ K ⁻¹	Sienas masa kg m ⁻²	Siltuma caurlaidības koeficients U , W m ⁻² K ⁻¹	Piezīmes
1	Masīvkoka dēļi	18	0.130	35	0.98	Tehnoloģiski plānākais KŠM panelis
	KŠM ₀	56	0.098			
	Masīvkoka dēļi	18	0.130			
2	Masīvkoka dēļi	18	0.130	52	0.63	Tehnoloģiski biežākais KŠM panelis
	KŠM ₀	112	0.098			
	Masīvkoka dēļi	18	0.130			
3	Masīvkoka dēļi	18	0.130	104	0.30	Teorētiski aprēķinātais panelis, kurš izpilda LBN 002-01 prasības
	KŠM ₀	280	0.098			
	Masīvkoka dēļi	18	0.130			
4	Masīvkoka dēļi	18	0.130	37	0.25	Optimālā sienas konstrukcija plānākajam KŠM panelim, kas izpilda LBN 002-01 prasības
	KŠM ₀	56	0.098			
	Masīvkoka dēļi	18	0.130			
	Izolācijas materiāls	112	0.038			
5	Masīvkoka dēļi	18	0.130	54	0.25	Optimālā sienas konstrukcija biežākajam KŠM panelim, kas izpilda LBN 002-01 prasības
	KŠM ₀	112	0.098			
	Masīvkoka dēļi	18	0.130			
	Izolācijas materiāls	92	0.038			

Teorētiski aprēķināts trīs kārtu KŠM paneļa iekšējās kārtas biezums 280 mm, kas panelim nodrošina būvnormatīva (skat. 4.2. tab. 3. sienas veidu) prasības, tomēr šāda sienas paneļa ražošana nav izdevīga no vairākiem aspektiem: ekonomiskā - materiāla patēriņa un loģistikas; konstruktīvā, kas saistīts ar lielākām paneļa bīdes deformācijām, rukšanu un briešanu. Šī iemesla dēļ privātmāju un publisko ēku būvniecībā šādu biezu KŠM paneļu izmantošana bez papildu siltumizolācijas materiāla nav ieteicama.

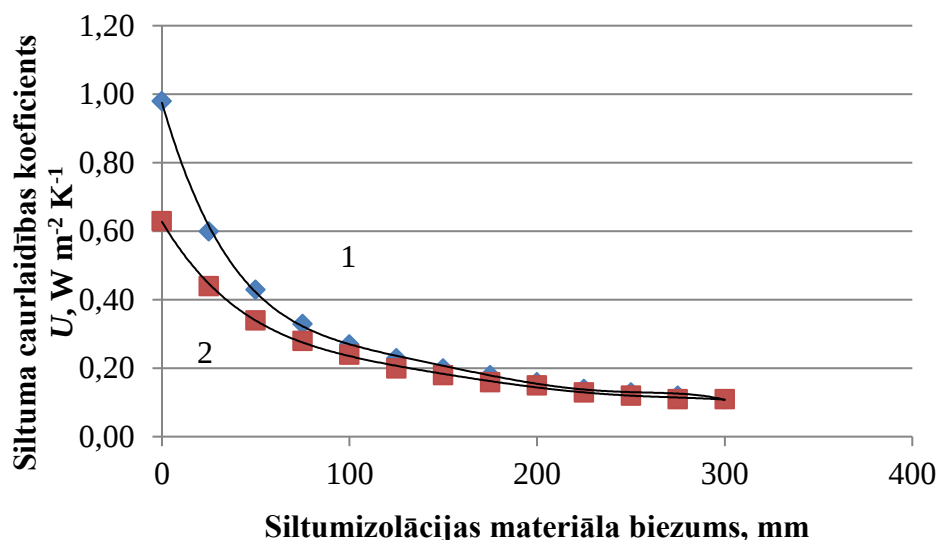
Lai 1. veida plānākais 92 mm panelis izpildītu būvnormatīva prasības attiecībā uz siltumizolācijas koeficienta robežvērtību 0.25 W m⁻² K⁻¹ (sienas masa < 100 kg m⁻²), konkrētais sienas panelis jāpapildina ar 112 mm biezu siltumizolācijas materiālu (skat. 4.2. tab. 4. sienas veidu). Savukārt 2. veida biežākais 148 mm panelis spēj nodrošināt būvnormatīva prasības, ja tas nosepts ar 92 mm biezu siltumizolācijas materiālu (skat. 4.2. tab. 5. sienas veidu). No iepriekš veiktajiem aprēķiniem kļūst skaidrs, ka KŠM paneļa noseģšana ar siltumizolācijas materiālu nodrošina būvnormatīvā noteikto ārsienas konstrukcijai nepieciešamo siltuma caurlaidības koeficientu.

Siltumizolācijas materiāla biezuma ietekmi uz KŠM sienas paneļu prototipu siltuma caurlaidības koeficientiem apraksta ciešas, aprēķinu ceļā iegūtas, piektās pakāpes polinomiālās sakarības 4.1. (1. paneļa prototipam) un 4.2. (2. paneļa prototipam), skat. 4.1. att.

$$U = -4 \cdot 10^{-12} \cdot b^5 + 3 \cdot 10^{-9} \cdot b^4 - 10^{-6} \cdot b^3 + 0.0002 \cdot b^2 - 0.0189 \cdot b + 0.975, \quad (4.1.)$$

$$U = -10^{-12} \cdot b^5 + 10^{-9} \cdot b^4 - 5 \cdot 10^{-7} \cdot b^3 + 9 \cdot 10^{-5} \cdot b^2 - 0.0092 \cdot b + 0.627, \quad (4.2.)$$

kur: U - siltuma caurlaidības koeficients, W m⁻² K⁻¹;
 b - siltumizolācijas materiāla biezums, mm.



4.1. att. Siltumizolācijas materiāla biezuma ietekme uz koksnes šūnveida materiāla sienas prototipu siltuma caurlaidības koeficientu - matemātiskais modelis:

- 1 - paneļu prototips no 56 mm bieza koksnes šūnveida materiāla un 18 mm masīvkoksnes ārējās kārtās;
 2 - paneļu prototips no 112 mm bieza koksnes šūnveida materiāla un 18 mm masīvkoksnes ārējās kārtās.

Kā apliecina veiktais pētījums, optimālais ārsienas konstrukcijas risinājums Ziemeļeiropai ir trīs kārtu KŠM panelis ar paralēlo KŠM virzienu kombinācijā ar siltumizolācijas materiālu. Efektīvai paneļa izvēlei sienas konstrukcijas projektēšana ir jāsāk ar mehānisko īpašību aprēķināšanu, kurai seko pārējo fizikālo un fizikāli-ķīmisko īpašību modelēšana. Pilnai sienas konstrukcijas izstrādei 4. un 5. sienas konstrukcijas veids jāpapildina ar materiāliem, kuri uzlabo paneļa uguns izturību, samazina tvaika iesūkšanos konstrukcijā, kā arī pasargā konstrukciju no klimata ietekmes saules, lietus un vēja veidā, lai izpildītu visas būvnormatīvos izvirzītās prasības, piemēram, ārsienas konstrukcijai.

Siltuma caurlaidības koeficienta teorētiskais aprēķins veikts 100 mm bieza KŠM sienas prototipam, kurš sastāv no 64 mm bieza KŠM, no abām pusēm aplīmēts ar 18 mm biezu priedes masīvkoksni. Šādas teorētiskas konstrukcijas aprēķinātā siltuma caurlaidības koeficienta vērtība U ir $0.91 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$, tā ir par $0.04 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ zemāka, salīdzinot ar 100 mm biezu trīs kārtu krustām līmēto kokmateriālu paneļa (CLT) siltuma caurlaidības koeficienta vērtību $0.95 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$, saskaņā ar literatūru²². Izmantojot standartā LVS EN ISO 10456 norādītos orientēto kokskaidu plātņu un putupoliuretāna materiāla siltumvadītspējas koeficientus 0.14 un $0.025 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, ir aprēķināta 100 mm bieza konstruktīvi izolētā paneļa (SIP) siltuma caurlaidības koeficienta vērtība $0.29 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$. Šis panelis veidots no 78 mm bieza putupoliuretāna, kurš no abām pusēm aplīmēts ar 11 mm biežām orientēto kokskaidu plātnēm. Teorētiska aprēķinātā SIP paneļa siltuma caurlaidības koeficienta vērtība ir par $0.62 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ jeb par 68 % zemāka nekā 100 mm biežam nesiltinātam KŠM sienas paneļa prototipam. Pētījuma rezultāti apkopoti autora publikācijā (Rozins un Iejavs, 2014).

Secinājumi

1. KŠM trīs kārtu būvniecības paneļu konstrukcija ar KŠM paralēlo virzienu, KŠM biezumu 56 mm un 112 mm, kā arī ārējām kārtām no 18 mm biezas masīvkoksnes nenodrošina LBN 002-01 noteikto, sienas konstrukcijai nepieciešamo siltuma caurlaidības koeficienta vērtību. Iegūtā siltuma caurlaidības koeficientu vērtība

²² <http://www.woodbuilding.sk/wp-content/uploads/2013/10/Kon%C5%A1truk%C4%8Dn%C3%A9-rie%C5%A1enia-CLT-panelov-en.pdf>, skatīts 20.03.2012.

- tehnoloģiski plānākajam 92 mm biežajam KŠM sienas panelim ir $0.98 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ un tehnoloģiski biežākajam 148 mm KŠM būvniecības panelim ir $0.63 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$.
2. Teorētiski aprēķinātā KŠM 100 mm bieža sienas paneļa prototipa siltuma caurlaidības koeficienta vērtība $0.91 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ ir par $0.04 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ jeb 4 % zemāka, salīdzinot ar trīs kārtu 100 mm biezu krustām līmēto konstrukciju kokmateriālu paneļu (CLT) siltuma caurlaidības koeficientu $0.95 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$. Savukārt iegūtā vērtība ir par 68 % augstāka nekā teorētiski aprēķinātā 100 mm biežā konstruktīvi izolētā paneļa (SIP) siltuma caurlaidības koeficienta vērtība $0.29 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$.
 3. Papildinot tehnoloģiski plānāko 92 mm un biežāko 148 mm KŠM būvniecības paneli ar attiecīgi 112 un 92 mm biezu minerālvati, iespējams iegūt LBN 002-01 prasībām atbilstošu sienas konstrukcijas siltuma caurlaidības koeficienta vērtību $0.25 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$. Raugoties no siltumtehniskā viedokļa, šādas sienu konstrukcijas ir izmantojamas gan privātmāju, gan publisko ēku būvniecībā.
 4. Izmantojot pētījumā iegūtās sakarības, iespējams aprēķināt KŠM sienu prototipu siltuma caurlaidības koeficientus atkarībā no izmantotās minerālvates biezuma.
 5. Pamatojoties uz pētījumā izmantoto aprēķinu metodiku un iegūtajiem KŠM siltumtehniskajiem rādītājiem, iespējams veikt datorsimulācijas no KŠM izgatavoto sienu un pārsegumu konstrukciju siltumtehnisko rādītāju prognozēšanai.

4.2.2. Skaņas gaisā izolācijas indekss

Pārbaužu un aprēķinu rezultātā durvju paneļu prototipiem ar biezumu 25 mm un 60 mm tika noteiktas izolācijas indeksa R_w vērtības, attiecīgi 26 dB un 31 dB, skat. 4.3. tabulu.

4.3. tabula

Durvju paneļu prototipu skaņas izolācijas indeksi un to korekcijas

Nr.p.k.	Durvju paneļa veids	Izolācijas indeksa $R_w^{1)}$ vērtība, dB	Korekcijas $C^{2)}$ vērtība, dB	Korekcijas $C_{tr}^{3)}$ vērtība, dB
1.	25	26	- 1	- 1
2.	60	31	- 1	- 4

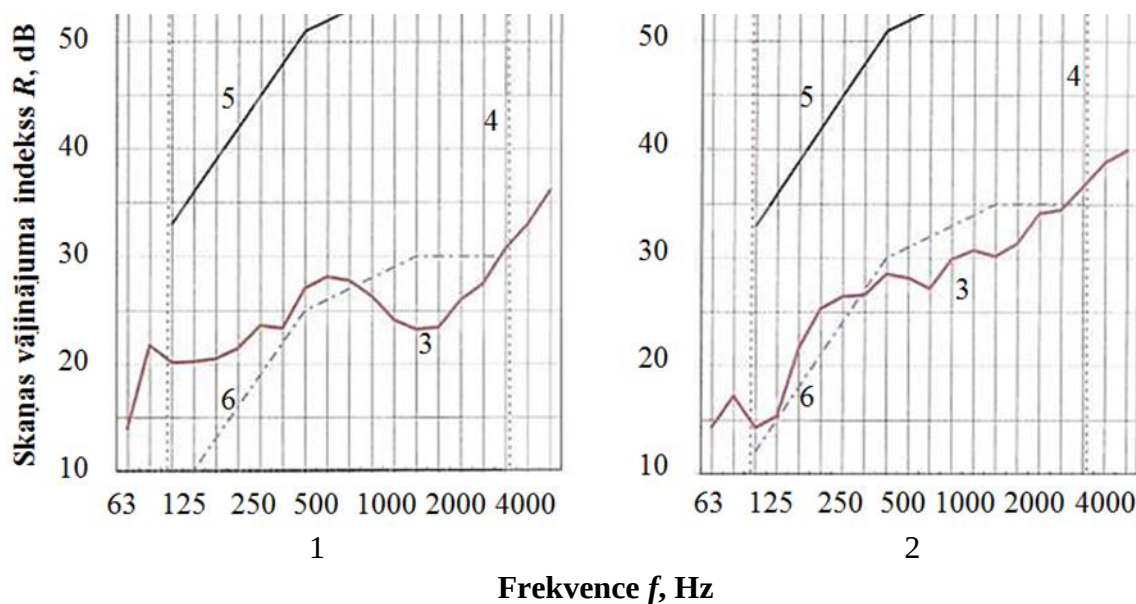
¹⁾ R_w - normalizētais skaņas gaisā izolācijas indekss - lielums, kuru nosaka, izmantojot laboratoriskos mērījumus vai aprēķinus, tas neietver skaņas izplatību pa blakusceļiem; ²⁾ C - nosacītā sadzīves trokšņa korekcija;

³⁾ C_{tr} - nosacītā transporta trokšņa korekcija.

Skaņas izolācijas prasības ēku iekšējām norobežojošajām konstrukcijām nosaka Noteikumi par Latvijas būvnormatīvu LBN 016-11 "Būvakustika". Skaņas gaisā izolācijas indeksa R'_w robežvērtības durvīm un logiem veidojas atkarībā no ēkas un telpas tipa.

Zinot KŠM paneļa 1 kvadrātmetra masu 11.7 kg m^{-2} , izmantojot standarta LVS EN 13986 5.10. punkta sakarību, aprēķinātā teorētiskā skaņas gaisā vājinājuma indeksa R vērtība 28 dB. Tā ir par 2 dB augstāka nekā eksperimentālā ceļā noteiktā durvju paneļa skaņas izolācijas indeksa vērtība.

Eksperimentāli noteiktā durvju paneļa prototipa 25 skaņas izolācijas indeksa R_w vērtība 26 dB neapmierina nevienu no būvnormatīva LBN 016-11 limitētajām robežvērtībām, ja paneli izmanto kā durvju vērtnes konstrukciju. Durvju vērtnes konstrukcijai atkarībā no ēkas, telpas tipa un klases jānodrošina skaņas izolācijas indeksa vērtība robežās no 27 līdz pat 42 dB (LBN 016-11). To ierobežo rezonanses kritums 1250-1600 Hz, skatīt 4.2. attēlu.



4.2. att. Skaņas vājinājuma indeksa R atkarība no frekvences pieauguma:

1 - panelis 25; 2 - panelis 60; 3 - mērījumos noteiktās R vērtības; 4 - izsvēršanas frekvences diapazons saskaņā ar ISO 717-1; 5 - $R_w = 52$ dB references līkne (ISO 717-1); 6 - izsvērtā R_w references līkne.

Durvju paneļa prototipa 60 skaņas izolācijas indeksa R_w vērtība 31 dB ir atbilstoša izmantošanai atsevišķu C klases telpu ar noteiktām minimālām prasībām skaņas izolācijai un D klases telpu jeb ekspluatācijā esošu ēku telpu norobežošanai. R_w uzlabojumu salīdzinājumā ar paneli 25 nodrošina palielinātā laukuma masa (zemajās frekvencēs +3 dB) un rezonanses krituma samazinājums (1250 līdz 1600 Hz), skat. 4.2. att.

Kā potenciālo izmantošanas veidu panelim 60 saskaņā ar LBN 016-11 var minēt - biroju ēku durvis no darba telpām uz gaiteniem, kāpņu telpām, hallēm, vestibiliem; ārstniecības iestāžu durvis starp intensīvās terapijas telpu un gaiteni; izglītības iestāžu durvis starp klasēm, tām pielīdzināmām telpām un gaiteniem; durvis no pirmsskolas iestādes grupu telpām vai guļamtelpām uz gaiteni.

Saskaņā ar būvnormatīvu LBN 016-11 "Būvakustika" skaņas gaisā izolācijas indeksa R_w robežvērtības veidojas atkarībā no ēkas un telpas tipa.

Sienu paneļu prototipu aprēķinu un pārbaužu rezultāti apkopoti 4.4. tabulā.

Kā prognozēts iepriekš, līdzīgi kā krustām līmēto konstrukciju kokmateriālu paneļu gadījumā, neviens no sienas paneļu prototipiem nenodrošina LBN 016-11 limitētās robežvērtības, ja paneli izmanto kā sienas konstrukciju. To ierobežo ievērojami zemākās skaņas izolācijas indeksu vērtības.

4.4. tabula

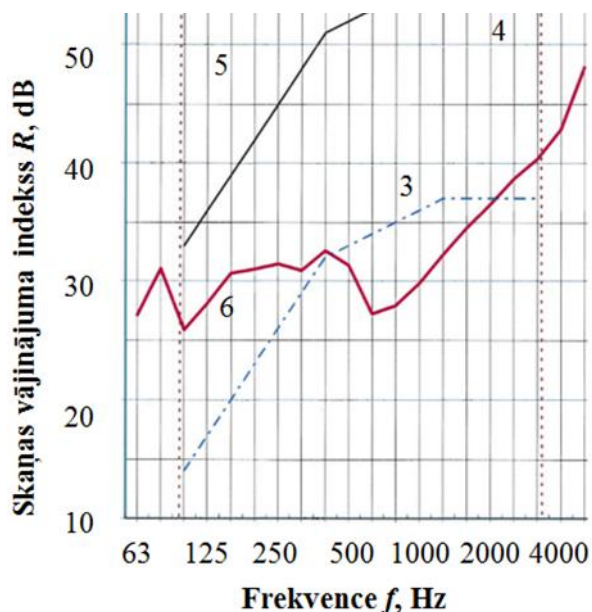
Sienu paneļu prototipu skaņas izolācijas indeksi un to korekcijas

Nr.p.k.	Sienas paneļa veids	Izolācijas indeksa $R_w^{1)}$ vērtība, dB	Korekcija $C_{50-3150}^{2)}$, dB	Korekcija $C^{3)}$, dB	Korekcija $C_{tr}^{4)}$, dB
1	148	37	-1	-1	-2
2	92	33	-1	-1	-2
3	108	35	-1	-1	-2

¹⁾ R_w - normalizētais skaņas gaisā izolācijas indekss - lielums, kuru nosaka, izmantojot laboratoriskos mērījumus vai aprēķinus, tas neietver skaņas izplatību pa blakusceļiem; ²⁾ $C_{50-3150}$ - spektrālā korekcija dB skaņas izolācijas aprēķiniem, izmantojot mērījumus ar paplašinātu frekvenču diapazonu līdz 50 Hz. Korekciju piemēro A un B klases telpām; ³⁾ C - nosacītā sadzīves trokšņa korekcija; ⁴⁾ C_{tr} - nosacītā transporta trokšņa korekcija.

Skaņas izolācijas prasības ēku iekšējām norobežojošajām konstrukcijām dzīvojamās mājās atkarībā no ēkas, telpas tipa un klases ir robežās no 45 līdz 79 dB (LBN 016-11).

Skaņas vājinājuma indeksa R raksturlīknes atkarībā no frekvences sienas paneļa prototipam 148 atspoguļotas 4.3 attēlā.



4.3. att. Skaņas vājinājuma indeksa R atkarība no frekvences pieauguma sienas prototipam 148:

apzīmējumus skatīt 4.2 att.

Tā kā ēku norobežojošo konstrukciju skaņas izolācijas prasības ir augstākas par iegūtajiem prototipu rādītājiem, tad prototipi var tikt izmantoti kā norobežojošo konstrukciju sastāvdaļa jeb kārtā, izstrādājot pilnu sienas konstrukciju un veicot tās skaņas izolācijas aprēķinus, kuru modeļa izveidošanai var izmantot šajā nodaļā iegūtos rādītājus. Aprēķinos iespējams izmantot datorprogrammas akustisko īpašību aprēķināšanai *Insul* un *Bastian*.

KŠM sienu paneļu prototipu skaņas izolācijas indeksa vērtības atbilst prognozētajām un ir salīdzināmas ar krustām līmēto kokmateriālu paneļu (CLT) skaņas izolācijas indeksu rādītājiem. Literatūrā norādītas trīs kārtu CLT paneļu skaņas izolācijas indeksu vērtības 100 un 120 mm bieziem paneļiem - attiecīgi 34 un 35 dB²³. Minētās vērtības ir līdzīgas iegūtajiem KŠM sienu paneļu prototipu skaņas izolācijas indeksu vērtībām no 33 līdz 37 dB. Pamatojoties uz šo informāciju, iespējams apgalvot, ka KŠM sienas paneļu prototipu skaņas izolācijas indeksu vērtības ir līdzīgas CLT paneļu rādītājiem un to uzlabošanai var izmantot analogiskus risinājumus - līdzīgi kā CLT paneļu akustisko īpašību uzlabošanai.

Secinājumi

1. Durvju paneļa prototipa ar biezumu 25 mm skaņas izolācijas indeksa R_w vērtība ir 26 dB. Tā neapmierina nevienu no LBN 016-11 limitētajām robežvērtībām, ja paneli izmanto kā durvju vērtnes konstrukciju.
2. Durvju paneļa prototipa ar biezumu 60 mm skaņas izolācijas indeksa R_w vērtība 31 dB ir atbilstoša izmantošanai atsevišķu C klases telpu ar noteiktām minimālām prasībām skaņas izolācijai un D klases telpu jeb ekspluatācijā esošu ēku telpu norobežošanai. R_w uzlabojumu salīdzinājumā ar paneli 25 nodrošina palielinātā laukuma masa (zemajās frekvencēs +3 dB) un rezonanses iekrituma samazinājums (1250-1600 Hz).

²³ <http://www.clt.info/wp-content/uploads/2015/10/Soundproofing-of-CLT-internal-wall-structures-EN.pdf>. skatīts 13.03.2015.

3. Kā potenciālo izmantošanas veidu 60 mm panelim saskaņā ar LBN 016-11 var minēt - biroju ēku durvis no darba telpām uz gaiteniem, kāpņu telpām, hallēm, vestibiliem; ārstniecības iestāžu durvis starp intensīvās terapijas telpu un gaiteni; izglītības iestāžu durvis starp klasēm, tām pielīdzināmām telpām un gaiteniem; durvis no pirmsskolas iestādes grupu telpām vai guļamtelpām uz gaiteni.
4. Sienas paneļu prototipu skaņas izolācijas indeksa vērtības ir krietni zemākas nekā nepieciešams norobežojošām sienu konstrukcijām. Tomēr tās ir salīdzināmas ar krustām līmēto kokmateriālu paneļu skaņas izolācijas indeksu rādītājiem.
5. Tā kā ēku norobežojošo konstrukciju skaņas izolācijas prasības ir augstākas par iegūtajiem sienas paneļu prototipu mērījumu rezultātiem, tad paraugu materiāls var tikt izmantots kā atdalošo konstrukciju sastāvdaļas (slāņi), veicot pilnas konstrukcijas skaņas izolācijas aprēķinus, kuru modeļa izveidošanai var izmantot šajā nodaļā noteiktos rādītājus.
6. KŠM sienas paneļa biezuma palielināšana no 56 mm (KŠM 2 kārtās) līdz 112 mm (KŠM 4 kārtās), pie vienāda ārējo kārtu materiāla biezuma 18 mm, palielina skaņas izolācijas indeksu par 4 dB - no 33 līdz 37 dB.
7. KŠM kārtas biezuma ietekmi uz skaņas izolācijas indeksu iespējams novērot, salīdzinot līdzīga biezuma, bet atšķirīgas uzbūves šūnveida materiāla 2. un 3. veida paneļus. 3. panelis, kas izgatavots no četru kārtu šūnveida materiāla, uzrādījis par 2 dB augstāku skaņas izolācijas indeksa vērtību, salīdzinot ar 2. veida paneli, kas izgatavots no divu kārtu KŠM.
8. KŠM būvniecības paneļu prototipi ar biezumu 92 mm un 108 mm nodrošina līdzīgus skaņas izolācijas indeksa rādītājus kā 100 mm biezs trīs kārtu krustām līmēto kokmateriālu (CLT) panelis. CLT paneļa skaņas izolācijas indekss ir 34 dB, savukārt KŠM sienas paneļu prototipu - attiecīgi 33 un 35 dB. KŠM sienas paneļu prototipu skaņas izolācijas uzlabošanai var izmantot analogiskus risinājumus kā CLT paneļu akustisko īpašību uzlabošanai.
9. Lai papildus uzlabotu daudzslāņu šūnveida koksnes materiāla sienas paneļu skaņas izolācijas īpašības, ieteicams veikt eksperimentālos pētījumus ar starpslāņiem, kas amortizējušies, KŠM kārtu savstarpējai salīmēšanai un papildinātiem prototipiem ar speciāliem skaņu izolējošiem materiāliem.
10. Iegūtās KŠM durvju un sienu prototipu skaņas gaisā izolācijas indeksu vērtības R_w izmantojamas būvkonstrukciju ārējo un iekšējo norobežojošo konstrukciju skaņas izolācijas īpašību modelēšanā, veidojot normatīviem atbilstošas norobežojošās konstrukcijas.

4.3. Materiāli un metodes fizikāli- ķīmisko īpašību uzlabošanai

Iepriekš veiktajā pētījumā (3.4. nodaļa) noskaidrots, ka KŠM ugunsreakcijas rādītāji ir ievērojami augstāki, salīdzinot ar masīvkoksnes un termiski biezu plātņu materiālu ugunsreakcijas parametriem. Īpaši liela rādītāju atšķirība konstatēta, pārbaudot KŠM perpendikulārā virzienā, kā rezultātā materiāls klasificēts E ugunsreakcijas klasē, par klasi zemāk nekā masīvkoksne un termiski biezi plātņu materiāli. Ņemot vērā iepriekš noteiktos fizikālos, mehāniskos un termiskos rādītājus, KŠM paralēlā virzienā efektīvāk var izmantot lielizmēra norobežojošo būvkonstrukciju izgatavošanai, savukārt perpendikulārā virzienā - kāpņu, durvju un mēbeļu izgatavošanā. Ar mērķi noteikt KŠM ugunsreakcijas rādītāju uzlabošanas iespējas konstruktīvo paņēmienu īstenošanas rezultātā ir izgatavoti un pārbaudīti trīs KŠM prototipi. Divi prototipi veidoti, KŠM perpendikulārā virzienā aplīmējot ar termiski plānu, augsta blīvuma kokšķiedru plātņi (HDF ar blīvumu 812 kg m^{-3}), lai noskaidrotu KŠM materiāla biezuma ietekmi uz KŠM ugunsreakcijas parametriem. Augsta blīvuma kokšķiedru plātne plaši tiek izmantota nenesošo konstrukciju, durvju un mēbeļu izgatavošanā. Trešais

prototips veidots, KŠM paralēlā virzienā aplīmējot ar priedes (blīvums 520 kg m^{-3}) masīvkoksni, lai novērtētu termiski bieza materiāla ietekmi uz potenciālā būvniecības paneļa ugunsreakcijas parametriem.

KŠM abpusējā aplīmēšanā izmantota vienkomenta polivinilacetāta līme *Cascol 3353*, kurai raksturīgi šādi līmēšanas tehnoloģiskie parametri - līmes uzklāšana manuāli ar rulli, vidējais līmes patēriņš 200 g m^{-2} , kas noteikts ar svēršanas paņēmieni; presēšanas spiediens 0.2 MPa ; izturēšanas laiks zem spiediena 60 min . KŠM ugunsreakcijas parametru uzlabošanas izpētei izmantoto paraugu specifikācija norādīta 4.5. tabulā.

4.5. tabula

Paneļu prototipi koksnes šūnveida materiāla ugunsreakcijas parametru uzlabošanai

Nr.p.k.	Paneļa uzbūve	Kārtas biezums, mm	Kopējais biezums, mm	Paraugu skaits	Marķējums	KŠM virziens panelī
1	HDF	4	25	1	90H25	90
	KŠM ₉₀	17				
	HDF	4				
2	HDF	4	60	3	90H60	90
	KŠM ₉₀	52				
	HDF	4				
3	P	18	92	1	0P92	0
	KŠM ₀	56				
	P	18				

Visu trīs paneļu prototipu ugunsreakcijas pārbaudes veiktas, izmantojot D ugunsreakcijas klasei atbilstošo standarta LVS EN 13823 vienotās dedzināšanas iekārtas (SBI) pārbaudes metodi. Saistībā ar to, ka pārbaudēm pakļauts mazāks paraugu skaits nekā minēts standartā, iegūtie rādītāji tiek uzskatīti par indikatīviem un nevar tikt izmantoti pilnai materiāla klasificēšanai kādā no ugunsreakcijas klasēm. Detalizēta informācija par pārbaudes norises gaitu un rezultātu vērtēšanas kritērijiem pausta 3.3. nodaļā.

4.4. Rezultāti un diskusija fizikāli-ķīmisko īpašību uzlabošanai

Pētījumā noskaidrotas KŠM ugunsreakcijas parametru uzlabošanas iespējas ar konstruktīvajiem risinājumiem. KŠM tiek aplīmēts ar augsta blīvuma šķiedru plātni vai priedes koksni, kā rezultātā tiek samazināts liesmas iedarbībai pakļautās virsmas laukums un ierobežota papildu skābekļa piekļuve degšanas zonai. Saistībā ar to, ka pārbaudēm pakļauts mazāks paraugu skaits nekā minēts standartā, iegūtie rādītāji tiek uzskatīti par indikatīviem un nevar tikt izmantoti pilnai materiāla klasificēšanai kādā no ugunsreakcijas klasēm.

Pārbaudes laikā iegūtais ugunsgrēka attīstības ātruma indekss FIGRA 25 mm biežajam prototipam 90H25 ir 396 W s^{-1} un kopējā siltuma izdalīšanās 600 s laikā $\text{THR}_{600\text{s}}$ 28.7 MJ . Iegūtā FIGRA vērtība ir par 47% zemāka nekā D ugunsreakcijas klases ugunsgrēka attīstības ātruma indeksa robežvērtība 750 W s^{-1} . Iegūtā ugunsgrēka attīstības ātruma indeksa vērtība 25 mm biezu KŠM, perpendikulārā virzienā aplīmētu ar augsta blīvuma kokšķiedru plātni, ļauj klasificēt D ugunsreakcijas klasē. Papildus analizēta iegūtā dūmu palielināšanās ātruma SMOGRA vērtība $2.4 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-2}$ un $\text{TSP}_{600\text{s}}$ 35.1 m^2 . Rezultātā iespējams secināt, ka iegūtās vērtības nesasniedz dūmu veidošanās indeksa $s1$ robežvērtības: SMOGRA $30 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ un $\text{TSP}_{600\text{s}}$ 50 m^2 . Pēc dūmu izdalīšanās rakstura prototipam 90H25 var piešķirt dūmu veidošanās indeksu $s1$. Sešsimt sekunžu laikā no pārbaudes sākuma netika novērota liesmojošu pilienu vai daļiņu veidošanās, kas ļautu materiālam piešķirt liesmojošo pilienu un daļiņu indeksu $d0$.

KŠM perpendikulārā virziena 60 mm biezo 3 kārtu prototipu 90H60 paraugu pārbaudes rezultāti SBI iekārtā apkopoti 4.6. tabulā.

4.6. tabula

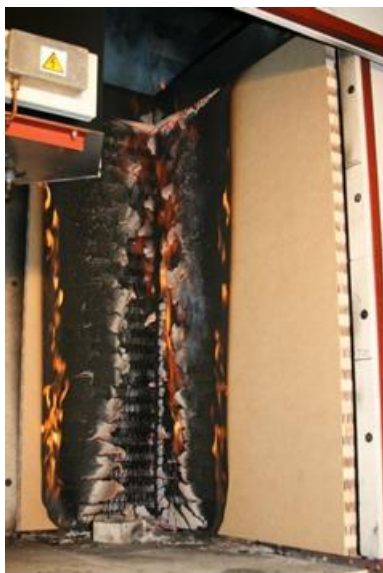
SBI pārbaudes rezultāti 60 mm bieziem paneļu prototipiem ar 4 mm biezu HDF plātnēm ārējās kārtās

Parauga marķējums	FIGRA, W s^{-1}	THR _{600s} , MJ	SMOGR, $\text{m}^2 \text{s}^{-2}$	TSP _{600s} , m^2
90H60-1	370	31.2	1.5	28.4
90H60-2	431	34.9	1.1	30.0
90H60-3	409	41.6	12.3	39.3
Vidējā vērtība	403	35.9	5.0	32.6
SD	31	5.3	6.4	5.9
VAR, %	8	15	128	18

Aprēķinātā ugunsgrēka attīstības ātruma indeksa FIGRA vidējā vērtība 60 mm biežajam prototipam 90H60 ir 403 W s^{-1} . Tā ir par 46 % zemāka nekā D ugunsreakcijas klasei pieļaujamā robežvērtība 750 W s^{-1} . Iegūtā ugunsgrēka attīstības ātruma indeksa vērtība ļauj prototipu klasificēt D ugunsreakcijas klasē.

Analizējot pārbaudes papildu rādītāju dūmu palielināšanās ātruma SMOGRA vidējo vērtību $5.0 \text{ cm}^2 \text{s}^{-2}$ un kopējo dūmu izdalīšanos 600 s laikā TSP_{600s} 32.6 m^2 , var secināt, ka iegūtās vērtības nesasniedz dūmu veidošanās indeksa s1 robežvērtības SMOGRA $30 \text{ m}^2 \text{s}^{-2}$ un TSP_{600s} 50 m^2 . Spriežot pēc dūmu izdalīšanās rakstura, prototipam 90H60 var piešķirt indeksu s1. Liesmojošu pilienu vai daļiņu veidošanās netika novērota 600 s laikā no pārbaudes sākšanas, kas ļauj materiālam piešķirt liesmojošo pilienu un daļiņu indeksu d0.

Sešdesmit milimetrus biežais trīs kārtu KŠM prototips ar augsta blīvuma 4 mm biezu kokšķiedru plātni ārējās kārtās SBI pārbaudes noslēgumā parādīts 4.4. attēlā.



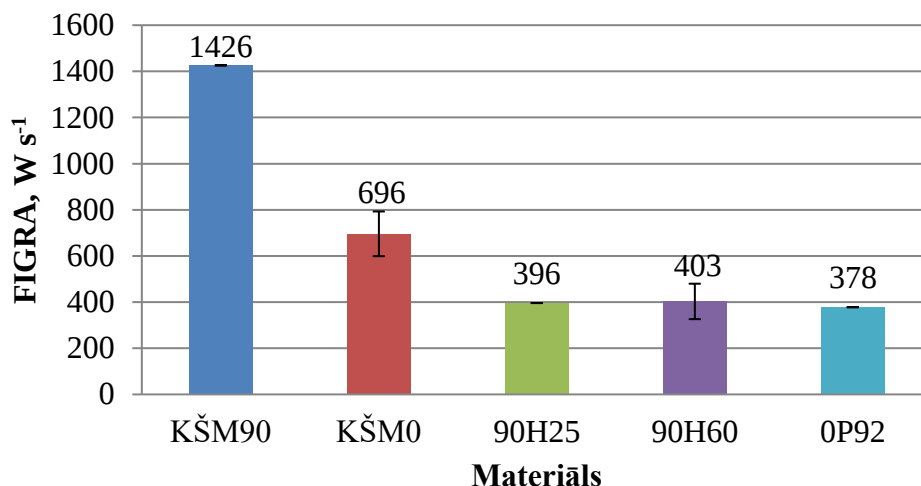
4.4. att. SBI pārbaude 60 mm bieziem 3 kārtu prototipiem ar HDF plātnēm ārējās kārtās.

Kā redzams 4.4. attēlā, KŠM, perpendikulārā virzienā nosegtam ar HDF plātnēm, nav raksturīga liesmas sāniskā izplatīšanās un materiāla caurdegšana vienotās dedzināšanas iekārtas pārbaudes laikā.

Pārbaudes laikā iegūtais ugunsgrēka attīstības ātruma indekss FIGRA 92 mm biežajam sienas prototipam 0P92 ir 378 W s^{-1} un kopējā siltuma izdalīšanās 600 s laikā

THR_{600s} 12.9 cm² s⁻². Iegūtā FIGRA vērtība ir par 50 % zemāka nekā D ugunsreakcijas klases ugunsgrēka attīstības ātruma indeksa robežvērtība 750 W s⁻¹. Iegūtā ugunsgrēka attīstības ātruma indeksa vērtība 92 mm biežam KŠM, paralēlā virzienā aplīmētam ar priedes koksni, ļauj to klasificēt D ugunsreakcijas klasē. Līdztekus ir analizēta iegūtā dūmu palielināšanās ātruma SMOGRA vērtība 2.0 cm² s⁻² un TSP_{600s} 44.6 m². Rezultātā iespējams secināt, ka iegūtās vērtības nesasniedz dūmu veidošanās indeksa s1 robežvērtības SMOGRA 30 m² s⁻² un TSP_{600s} 50 m², no kā sienas panelim var prognozēt dūmu veidošanās indeksu s1. Sešsimt sekunžu laikā no pārbaudes sākuma netika novērota liesmojošu pilienu vai daļiņu veidošanās, kas ļauj materiālam piešķirt liesmojošo pilienu un daļiņu indeksu d0.

Trīs kārtu KŠM prototipu un neaplīmēta KŠM ugunsgrēka attīstības ātruma indeksu FIGRA salīdzinājums skatāms 4.5. attēlā.



4.5. att. KŠM konstruktīvās uzlabošanas ietekme uz ugunsgrēka attīstības ātruma indeksu FIGRA:

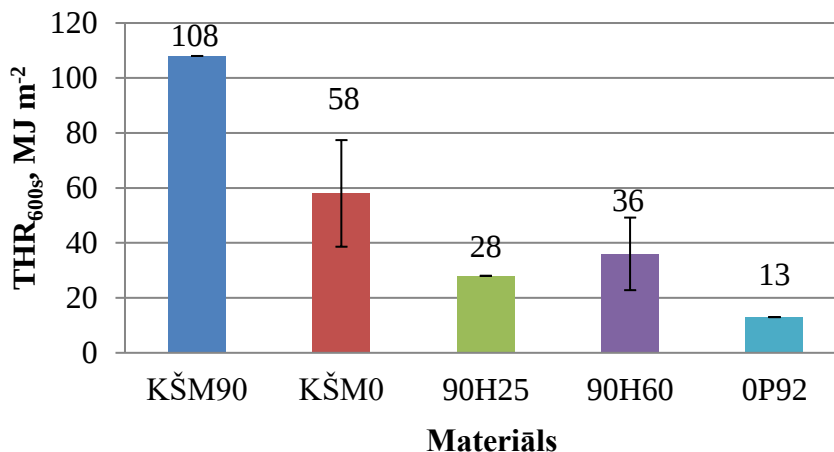
KŠM90 - koksnes šūnveida materiāls perpendikulārā virzienā; KŠM0 - koksnes šūnveida materiāls paralēlā virzienā; 90H25 - koksnes šūnveida materiāls perpendikulārā virzienā ar biezumu 17 mm, abpusēji aplīmēts ar 4 mm biezu augsta blīvuma kokšķiedru plātņi; 90H60 - koksnes šūnveida materiāls perpendikulārā virzienā ar biezumu 52 mm, abpusēji aplīmēts ar 4 mm biezu augsta blīvuma kokšķiedru plātņi, OP92 - koksnes šūnveida materiāls paralēlā virzienā ar biezumu 56 mm, abpusēji aplīmēts ar 18 mm biezu priedes koksni.

Analizējot 4.5. attēlu, redzams, ka KŠM aplīmēšana ar augsta blīvuma kokšķiedru plātņi (HDF) un priedes masīvkoksni būtiski samazina materiāla ugunsgrēka attīstības ātruma indeksu. Septiņpadsmit un piecdesmit divus milimetrus biezu KŠM perpendikulārā virzienā aplīmējot ar 4 mm biezu HDF plātņi, ugunsgrēka attīstības ātruma indekss samazinājies 3.5 līdz 3.6 reizes. Savukārt 56 mm biezu KŠM paralēlā virzienā abpusēji aplīmējot ar 18 mm biezu priedes koksni, ugunsgrēka attīstības ātruma indekss samazinājies 1.8 reizes. Pamatojoties uz šiem faktiem, var secināt, ka KŠM aplīmēšana ar masīvkoksni un plātņu materiālu būtiski samazina materiāla ugunsgrēka attīstības ātruma indeksu abos materiāla virzienos. Prototipu ārējās kārtās, izmantojot termiski plānus materiālus (biezums < 10 mm) ar augstu blīvumu, iespējams panākt līdzīgus ugunsreakcijas parametrus, kā izmantojot termiski biežus materiālus ar zemāku blīvumu, skat. 4.5. attēlu 90H25 un OP92 prototipus.

Trīs kārtu KŠM prototipu un neaplīmēta KŠM kopējā siltuma izdalīšanās 600 s laikā THR_{600s} salīdzinājums atspoguļots 4.6. attēlā.

Analizējot 4.6. attēlu, redzams, ka KŠM aplīmēšana ar augsta blīvuma kokšķiedru plātņi (HDF) un priedes masīvkoksni būtiski samazina arī materiāla kopējo siltuma izdalīšanos 600 s laikā. Septiņpadsmit un piecdesmit divus milimetrus biezu KŠM perpendikulārā virzienā abpusēji aplīmējot ar 4 mm biezu HDF plātņi, kopējā siltuma izdalīšanās 600 s laikā samazinājusies 3 līdz 3.6 reizes. Savukārt 56 mm biezu KŠM paralēlā virzienā abpusēji aplīmējot ar 18 mm biezu priedes koksni, siltuma izdalīšanās 600 s laikā samazinājusies

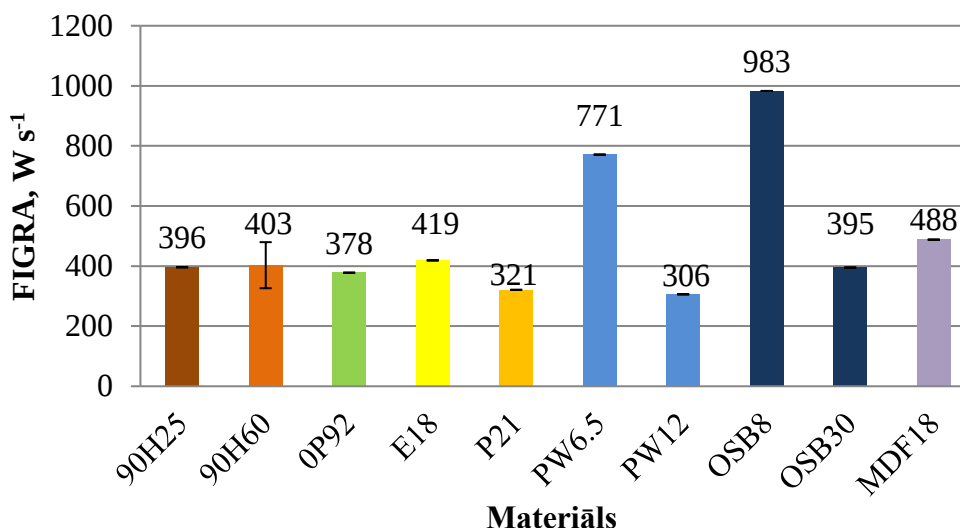
4.5 reizes. Tādējādi iespējams secināt, ka KŠM aplīmēšana ar masīvkoksni un plātņu materiālu abos materiāla virzienos samazina ne tikai ugunsgrēka attīstības ātruma indeksu, bet arī kopējo siltuma izdalīšanos 600 s laikā. Lai sasniegtu augstāku ugunsreakcijas klasi par D, būvkonstrukcijas no KŠM jāpapildina ar grūti degoša vai nedegoša materiāla kārtu. Viens no visplašāk izmantotajiem materiāliem koka un koksnes plātņu būvkonstrukciju ugunsreakcijas parametru uzlabošanai ir ugunsdrošais ģipskartons ar A2 ugunsreakcijas klasi.



4.6. att. Koksnes šūnveida materiāla konstruktīvās uzlabošanas ietekme uz kopējo siltuma izdalīšanos THR 600 s laikā:

apzīmējumus skatīt 4.9. attēlā.

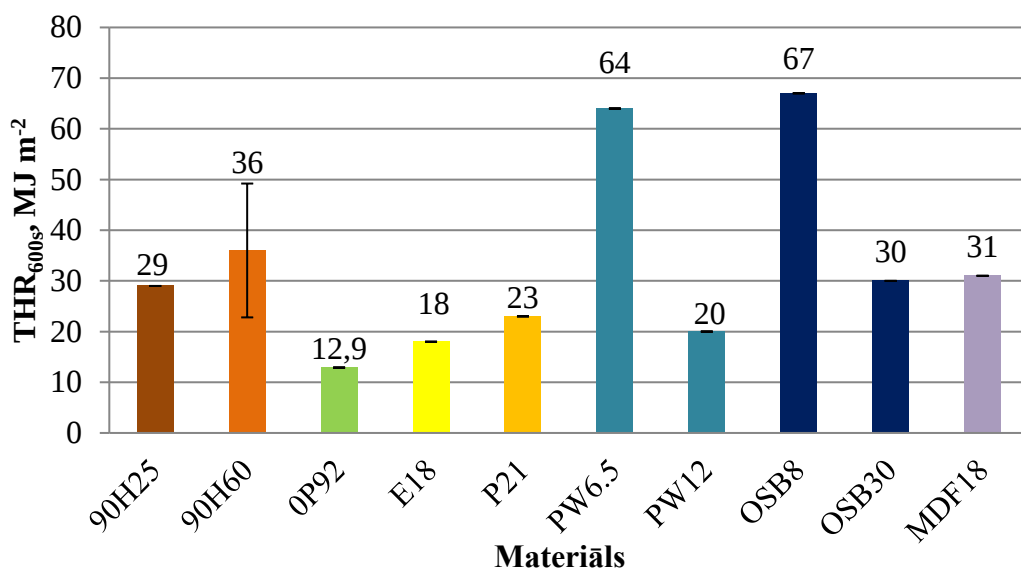
Trīs kārtu KŠM plātņu un paneļu prototipu ugunsgrēka attīstības ātruma indeksu un kopējā siltuma izdalīšanās 600 s laikā salīdzinājums ar literatūrā norādītajiem masīvkoksnes un plātņu materiālu rādītājiem atspoguļots 4.7. un 4.8. attēlā.



4.7. att. Trīs kārtu koksnes šūnveida materiāla prototipu un dažādu koksnes materiālu ugunsgrēka attīstības ātruma indeksu FIGRA salīdzinājums:

90H25 - koksnes šūnveida materiāls perpendikulārā virzienā ar biezumu 17 mm, abpusēji aplīmēts ar 4 mm biezu augsta blīvuma kokšķiedru plātņi (biezums 25 mm); 90H60 - koksnes šūnveida materiāls perpendikulārā virzienā ar biezumu 52 mm, abpusēji aplīmēts ar 4 mm biezu augsta blīvuma kokšķiedru plātņi (biezums 60 mm); OP92 - koksnes šūnveida materiāls paralēlā virzienā ar biezumu 56 mm, abpusēji aplīmēts ar 18 mm biezu priedes koksni (biezums 92 mm); E18 - egles koksne (18 mm); P21 - priedes koksne (21 mm); PW6.5 - bērza saplāksnis (6.5 mm); PW12 - bērza saplāksnis (12 mm); OSB8 - orientēto skaidu plātne (8 mm); OSB30 - orientēto skaidu plātne (30 mm); MDF18 - vidēja blīvuma kokšķiedru plātne (18 mm). (Bukšāns, 2010; Mayes, 2003; Reaction to ..., 2009).

Visu trīs kārtu KŠM prototipu ugunsgrēka attīstības ātruma indekss ir salīdzināms ar termiski biezas egles koksnes un orientēto kokskaidu plātņu ugunsgrēka attīstības ātruma indeksu. Salīdzinot paneļu prototipu un termiski plāna saplākšņa, kā arī orientēto kokskaidu plātņu FIGRA vērtību, KŠM prototipiem tā ir 1.9 līdz 2.6 reizes zemāka. Neaplīmēta KŠM perpendikulārā virziena ugunsgrēka attīstības ātruma indekss būtiski pārsniedz pat termiski plānu plātņu materiālu FIGRA vērtību. KŠM biezumam no 17 līdz 52 mm nav būtiskas ietekmes uz FIGRA, jo prototipu 90H25 un 90H60 ugunsgrēka attīstības ātruma indekss atšķiras tikai par 2 %.



4.8. att. Kopējā siltuma izdalīšanās 600 s laikā THR_{600s} salīdzinājums KŠM paneļu prototipiem, masīvkoksnei un plātņu materiāliem:

apzīmējumus skat. 4.7. att. (Bukšāns, 2010; Mayes, 2003; Reaction to, 2009).

Plānākajam prototipam 90H25 ir konstatēta līdzīga siltuma izdalīšanās 600 s laikā kā termiski biežai orientēto kokskaidu plātnei un vidēja blīvuma kokšķiedru plātnei. Biezākais prototips 90H60 ar KŠM perpendikulāro virzienu ir uzrādījis par 14 līdz 17 % augstāku THR_{600s} vērtību nekā termiski biežām OSB un MDF plātnēm. Minēta atšķirība skaidrojama ar ievērojami lielāku KŠM daudzumu biežākajā prototipā, kas pakļauts uguns iedarbībai, pēc nosedzošās kokšķiedru plātnes caurdegšanas. Prototipu 90H25 un 90H60 siltuma izdalīšanās 600 s laikā ir par 21 līdz 50 % augstāka, salīdzinot ar termiski biezu egles un priedes koksnes THR_{600s}.

Plātņu prototipam OP92 ar paralēlo KŠM virzienu un priedes koksni ārējā kārtā noteikta krietni zemāka THR_{600s} vērtība 12.9 MJ nekā priedes masīvkoksnei, plātņu materiāliem un pārējiem paneļu prototipiem. Minēto apstākli var izskaidrot ar paneļa prototipa lielāku biezumu un ar to saistīto augstāko materiāla siltumietilpību.

Secinājumi

1. KŠM aplīmēšana jeb konstruktīvā uzlabošana ar masīvkoksni vai koksnes plātņu materiāliem ārējās kārtās būtiski uzlabo materiāla ugunsreakcijas parametrus. KŠM prototipu degšanas jauda atkarībā no prototipa veida samazinās par 3 līdz 4.5 reizēm, savukārt ugunsgrēka attīstības ātruma indekss samazinās par 1.8 līdz 3.6 reizēm.
2. KŠM perpendikulārā virziena prototipa ar augsta blīvuma kokšķiedru plātnēm ārējās kārtās ugunsgrēka attīstības ātruma indeksa vērtība nav atkarīga no materiāla biezuma un ir robežās no 396 līdz 403 W s⁻¹ ar kopējo siltuma izdalīšanos 600 s laikā

- no 28 līdz 36 MJ. Neaplīmēta KŠM perpendikulārā virzienā ugunsgrēka attīstības ātruma indekss ir 1426 W s^{-1} un kopējā siltuma izdalīšanās 600 s laikā ir 108 MJ.
3. KŠM paralēlā virziena prototipa ar priedes koksni ārējās kārtās ugunsgrēka attīstības ātruma indekss ir 378 W s^{-1} ar kopējo siltuma izdalīšanos 600 s laikā 12.9 MJ. Iepriekš noteiktais neaplīmēta KŠM paralēlā virziena ugunsgrēka attīstības ātruma indekss ir 696 W s^{-1} un kopējā siltuma izdalīšanās 600 s laikā ir 58 MJ.
 4. Prototipu ārējās kārtās izmantojot termiski plānus materiālus (biezums $< 10 \text{ mm}$) ar augstu blīvumu, iespējams panākt līdzīgus ugunsreakcijas parametrus, kā izmantojot termiski biežus materiālus ar būtiski zemāku blīvumu.
 5. KŠM trīs kārtu paneļu prototipu ugunsreakcijas parametri ir salīdzināmi ar termiski biezu koksnes un koksnes plātņu materiālu ugunsreakcijas parametriem.
 6. Ņemot vērā iegūtos rādītājus vienotās dedzināšanas iekārtas pārbaudēs, KŠM trīs kārtu būvniecības paneļu prototipiem tiek prognozēta D ugunsreakcijas klase ar dūmu veidošanās indeksu s_1 un liesmojošo pilienu un daļiņu indeksu d_0 . Neskatoties uz to, ka visu trīs prototipu gadījumā konstatēta būtiska ugunsreakcijas parametru samazināšanās, vienīgi KŠM perpendikulārajā virzienā prognozētā ugunsreakcijas klase ir par vienu klasi augstāka.
 7. Pētījumā iegūtos KŠM paneļu prototipus var izmantot kā pamatu būvkonstrukciju izgatavošanai, ugunsreakcijas parametru uzlabošanai, papildinot ar grūti degošiem vai nedegošiem materiāliem.

4.5. Materiāli un metodes koksnes šūnveida materiāla mehānisko īpašību uzlabošanai

Kā izejmateriāls paneļu prototipu izgatavošanai izmantots priedes KŠM ar lameļu biezumu 28 mm. KŠM izgatavošanas tehnoloģiju skatīt 1.1. nodaļā. Visās paneļu prototipu papildu līmēšanas operācijās („ribu” ielīmēšanā un iekšējo kārtu aplīmēšanā ar ārējo kārtu materiāliem) izmantota vienkomponta polivinilacetāta līme *Cascol 3353*. KŠM bloks veidots, salīmējot kopā četras 28 mm biezas lameles. Pēc līmēšanas un formāta apzāģēšanas iegūts KŠM bloks ar biezumu 112 mm, platumu 1350 mm un garumu 2500 mm. Minētais materiāls tālāk izmantots kā vidējā kārtā 6 KŠM paneļu prototipu izgatavošanai.

Divpadsmit milimetrus biezs 9 kārtu bērza saplāksnis šķiedru virzienā tika izmantots kā abpusējs ārējās kārtas materiāls konstruktīvajos paneļu prototipos A, C un E (4.9. att).

Šķiedru virzienā savstarpēji salīmēti, 20 mm biezi, ēvelēti priedes dēļi vairogi, kuros izmantoti pēc stiprības šķiroti C24 klases zāģmateriāli, tika lietoti kā abpusējās ārējās kārtas konstruktīvajos paneļu prototipos B, D un F. Ārējo kārtu materiāla platums 300 mm un garums 2500 mm. Paneļu prototipos A un B ielīmēti C24 stiprības klases kalibrēti masīvkoksnes zāģmateriāli jeb „ribas” ar šādiem izmēriem - biezumu 20 mm, platumu 112 mm un garumu 2500 mm, zāģmateriālu ielīmēšanas solis 112 mm. Pēc KŠM sazāģēšanas nepieciešamajos izmēros tā ielīmēšana paneļos veikta divos virzienos: materiālu orientējot paralēli - 0° (kā bloku līmēšanas presē) un perpendikulāri - 90° (sagāžot 90° leņķī). Paralēlā virzienā šūnveida materiāls orientēts prototipos C un D, perpendikulārā - prototipos A, B, E un F. Paneļu konstruktīvais risinājums atspoguļots 4.9. att.

„Ribas” pielīmēšana pie KŠM un KŠM aplīmēšana ar ārējo kārtu materiāliem veikta, izmantojot līmi *Casco 3353*. Līmes uzklāšana realizēta manuāli ar līmes uzklāšanas ruļļiem, nodrošinot vidējo līmes uzklājumu 200 g m^{-2} . Paneļu līmēšanā izmantots aukstais līmēšanas paņēmiens, nodrošinot presēšanas spiedienu 0.2 MPa un izturēšanas laiku zem spiediena 20 min. Lai minētos paneļus varētu izmantot reālās būvkonstrukcijās, pētījumā izmantotā polivinilacetāta līme *Casco 3353* jāaizvieto ar līmi, kas nodrošina būvkonstrukcijām nepieciešamās termiskās, delaminācijas un ilgizturības īpašības.



A



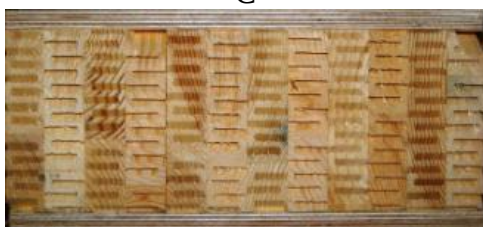
B



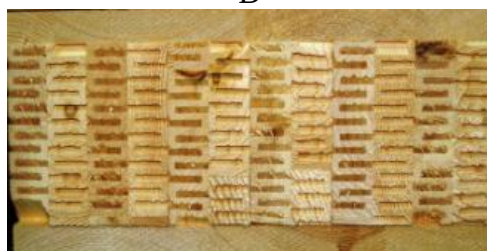
C



D



E



F

4.9. att. Paneļu prototipu konstruktīvie risinājumi:

- A - šūnveida materiāls, novietots perpendikulāri, ar „ribām”, ārējās kārtas no saplāksņa;
 B - šūnveida materiāls, novietots perpendikulāri, ar „ribām”, ārējās kārtas no priedes masīvkoksnes;
 C - šūnveida materiāls, novietots paralēli, ārējās kārtas no saplāksņa;
 D - šūnveida materiāls, novietots paralēli, ārējās kārtas no priedes masīvkoksnes;
 E - šūnveida materiāls, novietots perpendikulāri, ārējās kārtas no saplāksņa;
 F - šūnveida materiāls, novietots perpendikulāri, ārējās kārtas no priedes masīvkoksnes.

Pētījumam kopā izgatavoti sešu paneļu prototipi, katram prototipam - 24 paraugi. 8 paraugi izmantoti robežstiprības liecē un elastības moduļa noteikšanai, savukārt pārējie 16 robežstiprības spiedē paraugu izgatavošanai un robežstiprības spiedē noteikšanai, slogojot kā paralēlā, tā perpendikulārā virzienā pret paneļa plakni (katrā virzienā pārbaudīti 8 paraugi). Pētījumā izmantoto lieces pārbaudes paraugu specifikācija ietverta 4.7. tabulā.

4.7. tabula

Lieces paraugu specifikācija

Prototips	Izmēri, mm			Iekšējā kārtā			Ārējā kārtā	
	augstums, mm	platums, mm	garums, mm	virziens	biezums, mm	ar „ribām”	materiāls	biezums, mm
A	136	300	2500	90	112	+	saplāksnis	12
B	152	300	2500	90	112	+	masīvkoks	20
C	136	300	2500	0	112	-	saplāksnis	12
D	152	300	2500	0	112	-	masīvkoks	20
E	136	300	2500	90	112	-	saplāksnis	12
F	152	300	2500	90	112	-	masīvkoks	20

Pētījumā izmantoto spiedes pārbaudes paraugu specifikācija aplūkojama 4.8. tabulā.

4.8. tabula

Spiedes paraugu specifikācija

Prototips	Slogošanas virziens				Iekšējā kārta			Ārējā kārta	
	perpendikulāri		paralēli		virziens	biezums, mm	„ribas”	materiāls	biezums, mm
	augstums, mm	garums un platums, mm	augstums, mm	garums un platums, mm					
A	136	300	300	136	90	112	+	saplāksnis	12
B	152	300	300	152	90	112	+	masīvkoks	20
C	136	300	300	136	0	112	-	saplāksnis	12
D	152	300	300	152	0	112	-	masīvkoks	20
E	136	300	300	136	90	112	-	saplāksnis	12
F	152	300	300	152	90	112	-	masīvkoks	20

Lai varētu novērtēt konstruktīvā risinājuma ietekmi uz paneļu prototipu mehāniskajām īpašībām, papildus izgatavoti paraugi no rūpnieciski ražotā KŠM tā īpašību noteikšanai. Katrai īpašībai un slogošanas virzienam izgatavoti un pārbaudīti četri paraugi. KŠM paraugu apzīmējums: KŠM₉₀ - koksnes šūnveida materiāla perpendikulārā virziena paraugi; KŠM₀ - koksnes šūnveida materiāla paralēlā virziena paraugi.

Pētījumā izmantoto KŠM paraugu specifikācija ietverta 4.9. tabulā.

4.9. tabula

Koksnes šūnveida materiāla lieces un spiedes paraugu specifikācija

Apzīmējums	Izmēri, mm		
	augstums, mm	platums, mm	garums, mm
Lieces paraugi			
KŠM ₉₀	112	300	2500
KŠM ₀	112	300	2500
Spiedes paraugi			
KŠM ₉₀	112	300	300
KŠM ₀	112	300	300

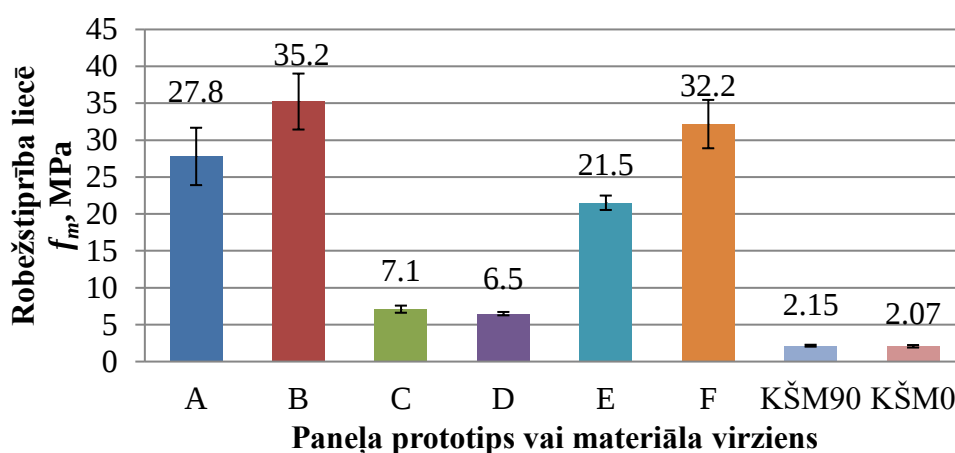
Lai samazinātu koksnes materiāla mitruma atšķirību ietekmi uz paneļu mehāniskajām īpašībām, pirms fizikālo un mehānisko īpašību noteikšanas ir veikta paneļu paraugu kondicionēšana standarta atmosfērā līdz konstantai masai. Paneļu paraugu papildu rādītājs - blīvums - noteikts pēc lieces pārbaudes, ņemot 50 mm garu, pilna šķērsgriezuma parauga nogriezni parauga nesagrautajā posmā. Blīvums aprēķināts, attiecinot minētā nogriežņa masu pret tilpumu. Līdztekus blīvuma rādītājam noteikts arī parauga mitrums, izmantojot iepriekš minēto blīvuma paraugu. Parauga mitrums noteikts saskaņā ar standarta LVS EN 13183-1 mitruma noteikšanas metodiku, izmantojot svēršanas - žāvēšanas paņēmieni. Robežstiprības liecē, elastības un robežstiprības spiedē rādītāji noteikti, izmantojot hidraulisko testēšanas iekārtu *Instron 600KN*. Robežstiprība liecē un elastības moduļu liecē rādītāji noteikti, slogojot paraugus statistiski pēc četrpunktu lieces slogošanas shēmas saskaņā ar standarta LVS EN 408+A1 9. un 19. punkta pārbaudes metodiku. Robežstiprība spiedē noteikta, paneļus orientējot kā paralēlā virzienā pret paneļu plakni, tā perpendikulārā virzienā. Robežstiprība spiedē noteikta saskaņā ar standarta LVS EN 408+A1 15. punkta pārbaudes

metodiku. Lai savstarpēji salīdzinātu iegūto prototipu vidējos stiprības un elastības rādītājus, izmantots Stjudenta t-tests ar p -vērtības pieeju, nodrošinot 95 % ticamības līmeni.

4.6. Rezultāti un diskusija mehānisko īpašību uzlabošanai

Vidējais pētījumā izmantoto paneļu blīvums svārstās robežās no 363 līdz 404 kg m⁻³. Augstākais blīvums novērots konstruktīvajiem paneļu prototipiem A (404 kg m⁻³) un B (400 kg m⁻³). Savukārt zemākais vidējais blīvums noteikts prototipam D (363 kg m⁻³). Paneļu prototipiem E un F vidējais blīvums bija vienāds ar 389 kg m⁻³, savukārt prototipam C ar 382 kg m⁻³. Pēc paraugu kondicionēšanas standarta atmosfērā konstatēts, ka paneļu prototipu vidējais mitrums ir robežās no 12.2 līdz 12.5 % un starp dažādiem prototipiem tas būtiski neatšķiras. Pētījuma dati liecina, ka aplūkotajiem paneļu konstruktīvajiem risinājumiem ir būtiska ietekme uz to mehāniskajām īpašībām.

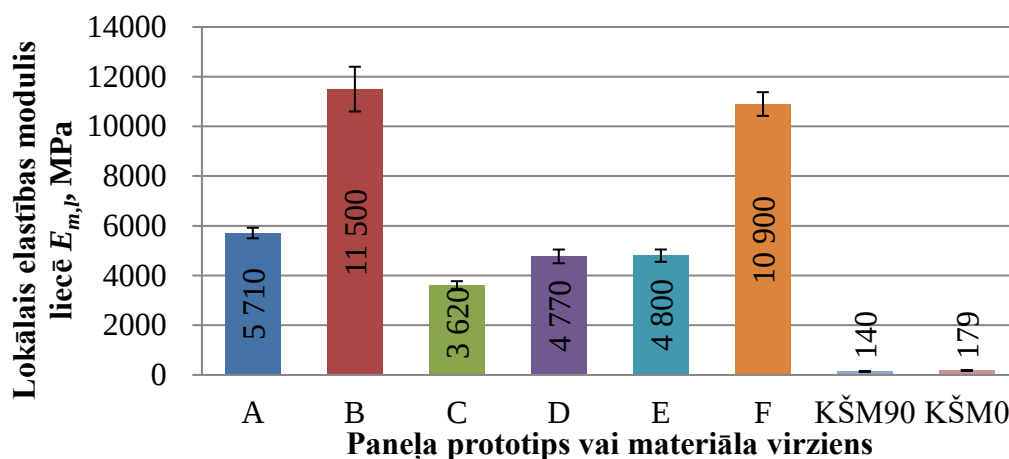
Iegūtie vidējie robežstiprības liecē rādītāji ar 95 % ticamības intervālu apkopoti 4.10. attēlā.



4.10. att. **Paneļu konstruktīvo risinājumu ietekme uz robežstiprības liecē rādītājiem:** paneļu prototipu aprakstu skat. 4.9. att.

Prototips B nodrošina augstāko vidējo robežstiprību liecē 35.2 MPa, savukārt analogs prototips F bez masīvkoksnes „ribām” nodrošina vidējo robežstiprību 32.2 MPa. Salīdzinot abu prototipu vidējās vērtības statistiski, iegūts, ka masīvkoksnes „ribas” būtiski nepalielina robežstiprības liecē rādītāju gadījumā, ja panelis izgatavots no perpendikulāri orientēta KŠM ar 20 mm biežām priedes masīvkoksnes ārējām kārtām. Savukārt, ja ārējās kārtās izmantots 12 mm bērza saplāksnis (prototipi A un E), masīvkoksnes „ribas”, kuras ielīmētas prototipā A, būtiski palielina robežstiprību liecē, salīdzinot ar prototipu E bez „ribām”. Prototipos ar šūnveida materiāla perpendikulāro novietojumu spilgti izpaužas ārējo kārtu materiāla ietekme uz robežstiprības liecē rādītājiem. Būtiski augstāki robežstiprības liecē rādītāji iegūti paneļiem, kuri aplīmēti ar 20 mm biezu priedes masīvkoksni (prototipi B un F), salīdzinot ar paneļiem, kuru ārējās kārtas aplīmētas ar 12 mm biezu bērza saplāksni (prototipi A un E). Paneļu prototipi C un D ar paralēlo šūnveida materiāla novietojumu uzrādījuši būtiski (aptuveni trīs reizes) zemākus vidējos robežstiprības liecē rādītājus, salīdzinot ar paneļu prototipiem, kuros šūnveida materiāls novietots perpendikulāri (prototipi E un F). Savukārt visiem konstruktīvajiem paneļu prototipiem vērojams būtisks (no 3 līdz 17 reizēm) robežstiprības liecē rādītāju pieaugums, salīdzinot ar KŠM robežstiprību liecē, prototipiem A, B, E un F sasniedzot pēc stiprības šķirotas masīvkoksnes stiprības rādītājus.

Iegūtie vidējie lokālā elastības moduļa liecē rādītāji ar 95 % ticamības intervālu parādīti 4.11. attēlā.



4.11. att. Paneļu konstruktīvo risinājumu ietekme uz elastības moduļa rādītājiem liecē:

paneļu prototipu aprakstu skat. 4.9. att.

Paneļu konstruktīvie risinājumi apskatītajos prototipos atstāj būtisku ietekmi uz paneļu elastības moduļa rādītājiem liecē. Augstāko elastības moduļa rādītāji iegūti paneļiem ar masīvkoksni ārējā kārtā un KŠM perpendikulāro novietojumu (prototipi B un F). Minēto paneļu elastības moduļa vidējie rādītāji statistiski būtiski neatšķiras, kā rezultātā iespējams secināt, ka masīvkoksnes „ribas” (prototips B) būtiski neuzlabo paneļu lieces elastības moduli, salīdzinot ar analogu paneli bez „ribām” (prototips F). Paneļu konstruktīvie risinājumi B un F sasniedz pēc stiprības šķirotas masīvkoksnes elastības rādītājus. Līdzīgas konstrukcijas paneļos A un E ar ārējām kārtām no 12 mm saplākšņa ielīmētās masīvkoksnes „ribas” (prototips A) būtiski palielina paneļu lieces elastības moduli, salīdzinot ar paneli bez „ribām” (prototips E). Salīdzinot virsējo kārtu materiāla ietekmi uz paneļa elastības moduli liecē, varam secināt, ka paneļi ar ārējām kārtām no 20 mm masīvkoksnes (prototipi B, D un F) uzrāda augstākus vidējo elastības moduļa rādītājus, salīdzinot ar paneļiem, kuri izgatavoti no 12 mm bieza bērza saplākšņa ārējām kārtām (prototipi A, C un E). Paneļu prototipi C un E ar paralēlo šūnveida materiāla novietojumu uzrādījuši būtiski zemākus vidējos elastības moduļa liecē rādītājus, salīdzinot ar paneļu prototipiem, kuros šūnveida materiāls novietots perpendikulāri (prototipi D un F). Visiem konstruktīvajiem paneļu prototipiem vērojams būtisks (no 29 līdz 82 reizēm) lokālo elastības moduļa rādītāju pieaugums, salīdzinot ar KŠM elastības moduļiem liecē, prototipiem B un F sasniedzot pēc stiprības šķirotas masīvkoksnes elastības rādītājus.

Flaigs un Blas (Flaig un Blaß, 2014) veikuši plašu pētījumu par krustām līmēto kokmateriālu paneļu (CLT) robežstiprības un elastības rādītājiem, kā arī to modelēšanas iespējām. Pētījumā noteikti KŠM paneļu prototipiem pēc izmēriem līdzīgu CLT paneļu paraugu robežstiprība un elastības modulis četrpunktu liecē. Paneļi sastāv no 9 krustām līmētām egles koksnes kārtām. Kārtas veido materiālu ar šķērsgriezuma izmēriem 150×300 mm. Paneļos izmantots C24 stiprības klasei atbilstošs materiāls. Kārtu platums panelī sakrīt ar slodzes pielikšanas virzienu. Pārbaudot 5 šādus paraugus, aprēķināta vidējā robežstiprība liecē 36.5 MPa un lokālais elastības modulis liecē 10260 MPa. KŠM paneļu prototipiem B un F iegūti vidējie robežstiprības rādītāji liecē 35.2 un 32.2 MPa, kuri būtiski neatšķiras no CLT paneļa robežstiprības rādītāja liecē ($p > 0.05$). Pārējiem paneļiem iegūtie rādītāji ir būtiski zemāki ($p < 0.05$). Paneļu prototipu F un B lokālā elastības moduļa rādītāji par 6 līdz 11 % pārsniedz CLT paneļa vidējo elastības moduļa liecē rādītāju.

Paneļu orientācija robežstiprības spiedē pārbaudes iekārtā parādīta 4.12. att.



a

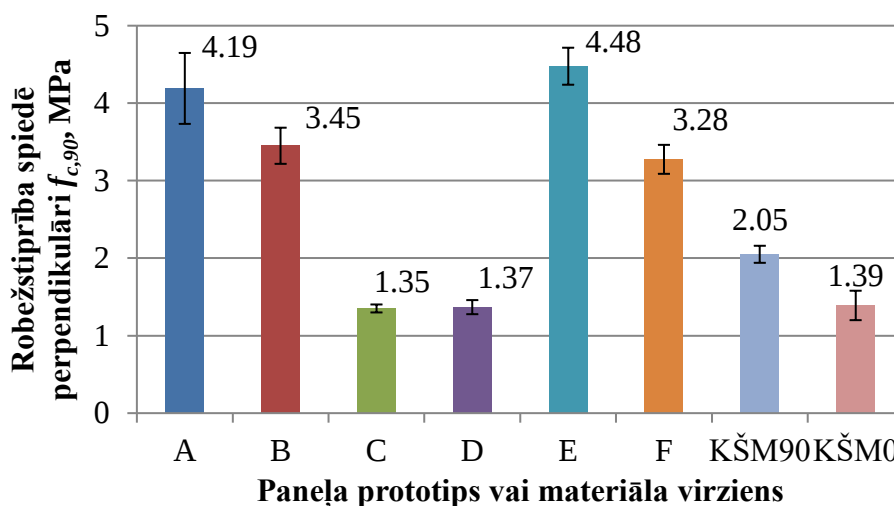


b

4.12. att. **Paneļu orientācija spiedes pārbaudes iekārtā:**

a - perpendikulāri pret paneļa plakni un b - paralēli pret paneļa plakni.

Vidējie robežstiprības rādītāji spiedē un to 95 % ticamības intervāli perpendikulāri pret paneļu plakni dažādiem paneļu konstruktīvajiem prototipiem un KŠM virzieniem parādīti 4.13. att.



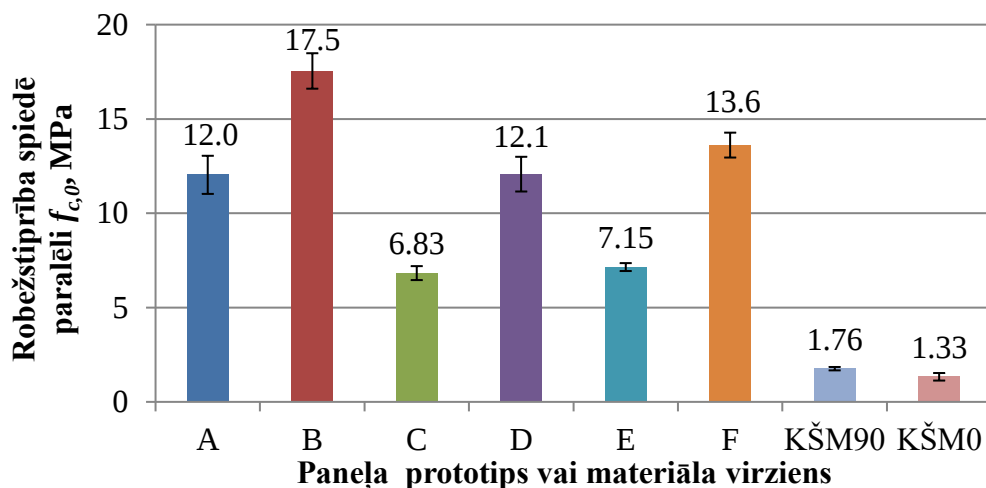
4.13. att. **Vidējie paneļu prototipu robežstiprības spiedē rādītāji, slogojot tos perpendikulārā virzienā:**

paneļu prototipu aprakstu skat. 4.9. att.

KŠM konstruktīvā uzlabošana būtiski palielina paneļu prototipu robežstiprību spiedē, kā iekšējo kārtu materiālu izmantojot KŠM perpendikulārā virzienā. Abpusējā aplīmēšana būtiski neietekmē paneļu robežstiprību spiedē, kā iekšējo kārtu materiālu izmantojot KŠM paralēlā virzienā. Šajā gadījumā abpusējā aplīmēšana būtiski samazina vienīgi rādītāju izkliedi. Augstākā vidējā paneļu robežstiprība spiedē perpendikulārā virzienā 4.48 MPa novērota prototipam E, ar KŠM perpendikulāro novietojumu, un ārējām kārtām no saplāksņa. Salīdzinot prototipa E vidējo rādītāju ar analoga paneļa A ar „ribām” vidējo rādītāju, konstatēts, ka tie būtiski neatšķiras, tādējādi varam apgalvot, ka masīvkoksnes „ribu” iestrāde būtiski nepalielina konkrētā paneļa prototipa robežstiprības spiedē rādītājus, slogojot tos perpendikulārā virzienā. Līdzīga situācija vērojama ar prototipiem B un F, kuros paneļu prototips ar iestrādātām „ribām” B nenodrošina būtiski augstākus robežstiprības spiedē rādītājus perpendikulārā virzienā, salīdzinot ar analogu prototipu F. Analizējot ārējo kārtu materiāla ietekmi uz paneļu prototipu mehāniskajām īpašībām, redzams, ka paneļos ar perpendikulāri novietotu KŠM būtiski augstāki robežstiprības spiedē rādītāji perpendikulārā virzienā panākti, ārējās kārtās izmantojot 12 mm biezu bērza saplāksni (prototipi A un E), salīdzinājumā ar prototipiem, kuru ārējās kārtās izmantota 20 mm bieza priedes masīvkoksne

(prototipi B un F). Paneļos paralēli iestrādātais KŠM (prototipi C un D) uzrāda aptuveni trīs līdz četras reizes zemākus robežstiprības spiedē rādītājus, salīdzinot ar paneļiem, kuros KŠM iestrādāts perpendikulārā virzienā (prototipi E un F). Salīdzinot iegūtos vidējos robežstiprības spiedē rādītājus paneļiem un KŠM, varam secināt, ka paneļi, kuri izgatavoti no šūnveida materiāla ar perpendikulāro novietojumu (prototipi A, B, E un F), nodrošina aptuveni 1.6 līdz 2.2 reizes augstākus robežstiprības spiedē rādītājus, slogojot perpendikulārā virzienā, nekā vienkāršs KŠM, kas slogots perpendikulārā virzienā (2.05 MPa). Savukārt paneļos paralēlā virzienā ielīmētais KŠM (prototipi C un D) būtiski nepalielina paneļu robežstiprības spiedē rādītājus, salīdzinot ar KŠM robežstiprības spiedē rādītāju (1.39 MPa).

Vidējie robežstiprības spiedē rādītāji un to 95 % ticamības intervāli, slogojot paneļus paralēli pret paneļu plakni, dažādiem paneļu konstruktīvajiem prototipiem parādīti 4.14. att.



4.14. att. Vidējie paneļu prototipu robežstiprības spiedē rādītāji, slogojot tos paralēlā virzienā:

paneļu aprakstu skat. 4.9. att.

Abu KŠM virzienu gadījumā materiāla konstruktīvā uzlabošana būtiski palielina paneļu prototipu robežstiprību spiedē paralēli paneļa plaknei. Augstākā vidējā paneļu robežstiprība spiedē, slogojot paneļus paralēlā virzienā pret paneļu plakni, 17.5 MPa tika novērota prototipam B - ar KŠM perpendikulāro novietojumu, ar masīvkoksnes „ribām” un ārējām kārtām no priedes masīvkoksnes. Savukārt zemākā robežstiprība spiedē 6.83 MPa novērota panelim C - ar KŠM paralēlo novietojumu un saplāksni ārējās kārtās. Salīdzinot masīvkoksnes „ribu” ietekmi, redzams, ka prototipi A un B ar iestrādātām masīvkoksnes „ribām” nodrošina būtiski augstākus robežstiprības spiedē rādītājus nekā prototipi E un F bez masīvkoksnes „ribām”. Divpadsmit mm biezs priedes masīvkoksnes virsējo kārtu materiāls spēj nodrošināt būtiski augstākus paneļu robežstiprības spiedē rādītājus, slogojot paneļus paralēlā virzienā pret paneļu plakni (prototipi B, D un F), salīdzinot ar paneļiem, kuri aplīmēti ar 12 mm biezu bērza saplāksni. KŠM orientācija būtiski neietekmē paneļu robežstiprības spiedē rādītājus paralēlā virzienā paneļu prototipos C un E, kuri aplīmēti ar saplāksni. Savukārt paneļu robežstiprība spiedē ir būtiski augstāka prototipam F ar perpendikulāro šūnveida materiāla novietojumu un ārējām kārtām no masīvkoksnes, salīdzinot ar līdzīgas konstrukcijas paneli D, kurā KŠM ielīmēts paralēlā virzienā. Vizuāli konstatēts, ka visos gadījumos, slogojot paneļus paralēlā virzienā attiecībā pret paneļu plakni, KŠM pret slodzes pielikšanas virzienu tiek orientēts perpendikulārā virzienā. Kā rezultātā iegūtie rādītāji salīdzināmi tikai ar KŠM perpendikulārā virziena robežstiprības spiedē vidējo rādītāju. Salīdzinot iegūtos vidējos robežstiprības spiedē rādītājus paneļiem un KŠM, varam secināt, ka paneļi nodrošina aptuveni 4 līdz 10 reizes augstākus robežstiprības spiedē rādītājus, slogojot tos paralēlā virzienā pret paneļu plakni nekā KŠM, slogots perpendikulārā virzienā (1.76 MPa), un aptuveni 5 līdz 13 reizes augstākus rādītājus nekā KŠM paralēlā virzienā (1.33 MPa).

Pēc Bogenspergera apkopotajiem literatūras datiem krustām līmēto kokmateriālu paneļu (CLT) robežstiprības spiedē vidējā vērtība perpendikulāri pret paneļu šķiedru virzienu ir no 2.80 līdz 3.43 MPa (Bogensperger u.c., 2011). Šie rādītāji ir salīdzināmi ar KŠM paneļu prototipu A, B, E un F vidējiem robežstiprības rādītājiem spiedē perpendikulārā virzienā 3.28 līdz 4.48 MPa. Savukārt paneļu prototipos C un D ar paralēlā virzienā ielīmētu KŠM, pārbaudot perpendikulārā virzienā pret paneļa plakni, robežstiprības rādītāji spiedē ir būtiski zemāki - attiecīgi no 1.35 līdz 1.37 MPa. KŠM paneļu prototipu robežstiprība spiedē paralēli paneļa plaknei visu sešu prototipu gadījumā aptuveni 2 līdz 6 reizes pārsniedz krustām līmēto kokmateriālu paneļu vidējos robežstiprības rādītājus spiedē šķērsām šķiedru virzienam.

Veiktais pētījums liecina, ka prototipi, kas veidoti no KŠM, atsevišķos gadījumos spēj nodrošināt tādas pašas mehāniskos rādītājus, kā pēc stiprības šķirota priedes masīvkoksne ar stiprības klasi C24 vai krustām līmēto konstrukciju kokmateriālu paneli. Slodzi nesošu paneļu (pārseguma panelis) projektēšanas un modelēšanas vajadzībām tiek rekomendēts izmantot F paneļa prototipa konstruktīvo risinājumu (panelis ar masīvkoksnes ārējām kārtām, KŠM ar perpendikulāro virzienu un bez masīvkoksnes „ribām”), savukārt pašnesošu starpsienu un ārsienu izgatavošanai tiek rekomendēts izmantot D paneļa prototipa konstruktīvo risinājumu. Ņemot vērā atšķirīgās paneļu izgatavošanas tehnoloģijas, paneļu izvēle katram izmantošanas veidam papildus jāpamato ar ekonomiskajiem aprēķiniem. Pētījuma rezultāti apkopoti divās autora publikācijās (Iejavs u.c., 2011; Iejavs un Spulle, 2013^a).

Secinājumi

1. Paneļos ar KŠM paralēlo virzienu robežstiprības liecē un robežstiprības spiedē pārbaudes gadījumā perpendikulāri pret paneļa plakni novēroti būtiski zemāki mehāniskie rādītāji, salīdzinot ar paneļiem, kuros šūnveida materiāls iestrādāts perpendikulārā virzienā.
2. KŠM paneļu prototipus raksturo šādi rādītāji: robežstiprība liecē no 6.53 līdz 35.2 MPa; elastības modulis liecē no 3620 līdz 11500 MPa, robežstiprība spiedē perpendikulāri paneļa plaknei no 1.35 līdz 4.48 MPa; robežstiprība spiedē paralēli paneļa plaknei no 6.83 līdz 17.5 MPa.
3. Masīvkoksnes ribu ietekme uz paneļu mehāniskajām īpašībām ir atkarīga no paneļu virsējo kārtu materiāla mehāniskajām īpašībām. Masīvkoksnes ribu ielīmēšana panelī tiek rekomendēta gadījumos, kad panelim pieliktais slodzes virziens sakrīt ar masīvkoksnes ribu šķiedru virzienu.
4. Divpadsmit milimetrus biezs bērza saplāksnis, kā paneļu virsējo kārtu materiāls, 3 gadījumos (robežstiprība liecē, elastības modulis liecē un robežstiprība spiedē paralēli paneļa plaknei) no 4 uzrādījis zemākus mehāniskos rādītājus, salīdzinot ar 20 mm biezu priedes masīvkoksni - kā paneļu virsējo kārtu materiālu. Bērza saplākšņa potenciāls izpaužas paneļu spiedes pārbaudes gadījumā perpendikulāri pret paneļu plakni, kad paneli ar bērza saplākšņa ārējām kārtām nodrošina būtiski augstākus robežstiprības spiedē rādītājus, kas saistīts ar būtiskajām blīvuma un uzbūves atšķirībām bērza saplāksnim un priedes koksnei šķērsām šķiedru virzienam.
5. KŠM mehāniskās īpašības ir iespējams būtiski uzlabot, šūnveida materiālu aplīmējot ar ārējo kārtu materiālu, izvēloties atbilstošu šūnveida materiāla novietojumu panelī vai ielīmējot paneļos masīvkoksnes „ribas”, iepriekš izvērtējot panelim pieliktās slodzes un to virzienus.
6. Iegūtie robežstiprības rādītāji liecē, elastības moduli rādītāji liecē un robežstiprības rādītāji spiedē atsevišķiem paneļu prototipiem ir salīdzināmi ar pēc stiprības šķirotu priedes zāģmateriālu stiprības un elastības rādītājiem. Pēc robežstiprības rādītājiem spiedē un elastības moduli liecē daži paneļu prototipi pārsniedz krustām līmēto kokmateriālu paneļu rādītājus.

4.7. Nodaļas secinājumi

1. KŠM konstruktīvā uzlabošana jeb aplīmēšana ar augstāka blīvuma koksnes materiāliem būtiski palielina izstrādāto paneļu blīvumu.
2. Ārsienu konstrukciju veidošana vienīgi no KŠM un masīvkoksnes vai plātņu materiāliem nav ekonomiski pamatota, raugoties no siltumtehnikā viedokļa. Iegūtās siltuma caurlaidības koeficienta vērtība ir salīdzināma ar krustām līmēto konstrukciju kokmateriālu (CLT) paneļu siltuma caurlaidības koeficientu vērtībām. Savukārt tā ir augstāka nekā konstruktīvi izolētajiem paneļiem (SIP).
3. KŠM sienas paneļi nodrošina līdzīgus siltuma caurlaidības koeficientus kā krustām līmētie konstrukciju kokmateriālu paneļi. Lai sasniegtu normatīvās siltuma caurlaidības koeficientu vērtības, KŠM sienas paneļi jāpapildina ar siltumizolācijas materiālu.
4. Izstrādātais durvju panelis ar biezumu 60 mm un skaņas izolācijas indeksu 31 dB izmantojams atsevišķu ekspluatācijā esošu telpu un telpu ar minimālām prasībām skaņas izolācijas norobežošanai.
5. Sienas paneļu prototipu skaņas izolācijas indeksu vērtības salīdzinoši ir daudz zemākas nekā nepieciešams norobežojošām sienu konstrukcijām. Tomēr tās ir salīdzināmas ar krustām līmēto kokmateriālu paneļu (CLT) rādītājiem, tādējādi to uzlabošanai var izmantot analogiskus risinājumus - kā CLT paneļu akustisko īpašību uzlabošanai. Izstrādātie sienas paneļu prototipi var tikt izmantoti kā sienu konstrukciju sastāvdaļas (slāņi), kuru pilnas konstrukcijas skaņas izolācijas aprēķinu modeļa izveidošanai var izmantot pētījumā noteiktos rādītājus.
6. KŠM aplīmēšana jeb konstruktīvā uzlabošana ar masīvkoksni vai koksnes plātņu materiāliem būtiski uzlabo materiāla ugunsreakcijas parametrus. KŠM prototipu degšanas jauda samazinās par 3 līdz 4.5 reizēm, un ugunsgrēka attīstības ātruma indekss samazināt par 1.8 līdz 3.6 reizēm, ļaujot izstrādāto durvju un sienas paneļu prototipus klasificēt D ugunsreakcijas klasē. KŠM trīs kārtu paneļu prototipu ugunsreakcijas parametri ir salīdzināmi ar termiski biezu koksnes un koksnes plātņu materiālu ugunsreakcijas parametriem.
7. KŠM aplīmēšana ar bērza saplāksni vai priedes masīvkoksni būtiski uzlabo materiāla robežstiprības rādītājus liecē, rādītāju pieaugums ir 3 līdz 16 reizes. Elastības moduļu pieaugums ir vēl ievērojamāks - no 20 līdz pat 82 reizēm. Atsevišķu paneļa prototipu rādītāji liecē un spiedē sasniedz pēc stiprības šķirotu zāģmateriālu un krustām līmēto kokmateriālu paneļu mehāniskos rādītājus.

5. SECINĀJUMI UN REKOMENDĀCIJAS

Secinājumi

1. Līdzīgi kā citi koksnes materiāli, arī KŠM ir anizotrops (īpašības atkarīgas no materiāla virziena) un higroskopisks materiāls (īpašības ir atkarīgas no apkārtējās vides mitruma).
2. Noskaidrotas šādas KŠM priekšrocības salīdzinājumā ar citiem būvniecībā plaši izmantotiem koksnes materiāliem: zemāks blīvums, mazākas lineāro izmēru un tilpuma izmaiņas, zemāks ūdens tvaika difūzijas koeficients un zemāks siltumvadītspējas koeficients materiāla paralēlā virzienā. Palielinātos materiāla ugunsreakcijas parametrus un zemākas mehāniskās īpašības, salīdzinot ar masīvkoksni un koksnes plātņu materiāliem, var uzskatīt par būtiskiem materiāla trūkumiem.
3. Pētījumu rezultātā iegūtas 23 sakarības dažādu KŠM rādītāju aprēķināšanai: līdzsvara mitruma aprēķināšanai atkarībā no gaisa relatīvā mitruma; KŠM blīvuma prognozēšanai atkarībā no materiāla un gaisa relatīvā mitruma; izmēru un tilpuma aprēķināšanai atkarībā no gaisa relatīvā mitruma; mehānisko īpašību aprēķināšanai atkarībā no paraugu ģeometriskajiem izmēriem un laukuma; skrūvju izraušanas pretestības aprēķināšanai atkarībā no skrūvju ieskrūvēšanas dziļuma; sienas paneļu prototipu siltuma caurlaidības koeficientu aprēķināšanai atkarībā no siltumizolācijas materiāla biezuma.
4. Veiktie pētījumi apliecina, ka lielākā daļa KŠM fizikāli mehānisko un fizikāli ķīmisko rādītāju ir nepietiekami, lai materiālu izmantotu būvniecībā. Šī iemesla dēļ tiek pētītas KŠM konstruktīvās uzlabošanas iespējas, īstenojot aplīmēšanas paņēmieni. Pētījumu rezultātā izstrādāti un pārbaudīti 2 durvju vārtņi, 6 sienu paneļu un 6 pārseguma paneļu prototipu konstruktīvie risinājumi, to indikatīvie rādītāji salīdzināti ar KŠM rādītājiem, līdzīgu izstrādājumu rādītājiem un būvnormatīvu prasībām.
5. KŠM konstruktīvā uzlabošana ar citiem materiāliem uzlabo KŠM fizikālās, fizikāli-ķīmiskās un mehāniskās īpašības, ļaujot KŠM izmantot būvniecībā kā daļu no norobežojošām durvju, sienu un pārsegumu paneļu būvkonstrukcijām.
6. Noteiktie un apkopotie īpašību rādītāji sniedz iespēju veikt inženiertehniskos aprēķinus un datormodelēšanu dažādiem izstrādājumiem un konstrukcijām, kuras projektētas no KŠM.
7. Abas promocijas darbā izvirzītās hipotēzes: koksnes šūnveida materiāla īpašības atšķiras no masīvkoksnes un koksnes bāzes plātņu materiālu īpašībām un koksnes šūnveida materiāla konstruktīvā uzlabošana ar aplīmēšanas paņēmieni būtiski uzlabo materiāla fizikālās, fizikāli – ķīmiskās un mehāniskās īpašības ir apstiprinājušās.

Rekomendācijas

1. Lai iegūtu ar citiem materiāliem un būvnormatīvu prasībām salīdzināmus KŠM un tā izstrādājumu rādītājus ieteicams izmantot standartizētās pārbaudes metodes.
2. Vispārējā koksnes līdzsvara mitruma diagramma ir izmantojama KŠM mitruma prognozēšanai atkarībā no relatīvā gaisa mitruma un temperatūras.
3. Praktiskiem KŠM izmēru izmaiņu prognozēšanas aprēķiniem, atkarībā no gaisa relatīvā mitruma līmeņa, tiek rekomendēts izmantot KŠM augstuma rukšanas un briešanas koeficientu vidējo vērtību $0.251\%^{-1}$, garuma un platuma vidējo rukšanas un briešanas koeficienta vērtību $0.0214\%^{-1}$.
4. KŠM rukšanas un briešanas rādītāji garumā un platumā, kā arī materiāla masa, ir zemāka nekā priedes masīvkoksnei un lielākajai daļai koksnes plātņu materiālu, tādēļ KŠM ieteicams izmantot produktos un izstrādājumos, kuriem ekspluatācijas laikā nepieciešams nodrošināt augstu formas stabilitāti un samazinātu masu.
5. Tādiem tehnoloģiskajiem parametriem kā skrūvju ieskrūvēšanas dziļums, ieskrūvēšanas virziens un ieskrūvēšanas vieta KŠM ir būtiska ietekme uz skrūvju izraušanas pretestību. Skrūvju diametra palielināšana un aizurbšanas paņēmiena izmantošana skrūvju iestrādē tiek rekomendēta, lai palielinātu skrūvju izraušanas pretestības rādītājus.

6. KŠM paraugu izmēru ietekme ir jāņem vērā pie materiāla mehānisko īpašību aprēķiniem un modelēšanas, jo atkarībā no slodzes veida, paraugu izmēru izmaiņas var atstāt nozīmīgu ietekmi uz materiāla mehāniskajām īpašībām. Piemēram, KŠM slogojot paralēlā virzienā, paraugu šķērsgriezuma izmēru palielināšana palielina tādos mehāniskos rādītājus kā robežstiprību liecē un lokālo elastības moduli liecē, savukārt augstuma palielināšana ievērojami samazina robežstiprības rādītājus spiedē.
7. Ātraudzīgo plantāciju koku sugu eikalipta (*Eucalyptus grandis* W. Hill) un radiata priedes (*Pinus radiata* D. Don) izmantošana KŠM materiāla un tā paneļu ražošanai var tikt izskatīta kā alternatīva parastās priedes (*Pinus sylvestris* L.) koksnes izmantošanai.
8. KŠM aplīmēšanai ar masīvkoksni un citiem koksnes materiāliem efektīvi var izmantot ne tikai līdz šim izmantoto termoplastisko polivinilacetāta līmi *Cascol 3353*, bet arī temperatūras un paaugstināta mitruma izturīgo poliuretāna līmi *Kleiberit PUR 501* un emulsipolimērizocianāta līmi *Kleiberit EPI 304.4*, tās nodrošina kvalitatīvu KŠM saistīšanos ar masīvkoksni un koksnes plātņu materiāliem.
9. KŠM īpašību uzlabošanai ieteicams izmantot konstruktīvās uzlabošanas paņēmieni, materiālu aplīmējot vai papildinot ar koksnes un citiem materiāliem. Piemēram, KŠM aplīmēšana ar masīvkoksni vai plātņu materiāliem samazina konstrukcijas ugunsreakcijas parametrus un palielina mehāniskos rādītājus, savukārt KŠM ārsienas paneļu prototipu papildināšana ar minerālvati novērš kondensāta veidošanās risku un nodrošina ārsienai nepieciešamo siltuma caurlaidības koeficientu.

IZMANTOTO INFORMĀCIJAS AVOTU SARAKSTS

Grāmatas, publikācijas un pētījumu atskaites

1. Aleinikovas M., Grigaliūnas J. (2006) *Differences of Pine (Pinus sylvestris L.) Wood Physical and Mechanical Properties From Different Forest Site Types in Lithuania* [tiešsaiste] [skatīts 2013. g. 10. janvārī]. Pieejams: [http://www.balticforestry.mi.lt/bf/PDF_Articles/2006-12\[1\]/9_13%20Aleinikovas%20&%20Grigaliunas.pdf](http://www.balticforestry.mi.lt/bf/PDF_Articles/2006-12[1]/9_13%20Aleinikovas%20&%20Grigaliunas.pdf)
2. Arhipova I., Bāliņa S. (2006) *Statistika ekonomikā un biznesā*. Rīga: Datorzinību Centrs. 364 lpp.
3. Aydin I. (2014) *Effect of veneer drying at high temperature and chemical treatment on equilibrium moisture content of plywood* [tiešsaiste] [skatīts 2015. g. 5. februārī]. Pieejams: http://www.academia.edu/7443226/EFFECTS_OF_VENEER_DRYING_AT_HIGH_TEMPERATURE_AND_CHEMICAL_TREATMENTS_ON_EQUILIBRIUM_MOISTURE_CONTENT_OF_PLYWOOD?login=&email_was_taken=true
4. Bacher M., Krzosek S. (2013) Modulus of elasticity tension/bending ratio of polish grown pine (*Pinus sylvestris* L.) and spruce (*Picea abies* Karst.) timber. *Annals of Warsaw University of Life Sciences - SGGW. Forestry and Wood Technology* No. 82. *Ann. WULS-SGGW, Forestry and Wood Technology*. No. 82, p. 31-38.
5. Berger G., Barbu M.C., Huber H., Berger J., Schwarzmann G. (2016) Applying biomimicry in lightweight wood panel development. **In:** *World conference on timber engineering 2016*. [skatīts 2017. g. 3. martā]. Pieejams: <https://repositum.tuwien.at/handle/20.500.12708/172>
6. Bikovs A. (2013) *DendroLight koksnes šūnmateriāla termiskās uzvedības skaitliskā modeļa izveide un validācija*: maģistra darbs inženierzinātņu maģistra (Mg.sc.ing) grāda iegūšanai. Rīgas Tehniskā universitāte. Būvniecības fakultāte. Materiālu un konstrukciju institūts. Rīga. 89 lpp.
7. Bogensperger T., Augustin M., Schickhofer G. (2011) Properties of CLT-Panels Exposed to Compression Perpendicular to Their Plane. **In:** *Proceedings of International Council for Research and Innovation in Building and Construction, Working Commission W18 - Timber Structures meeting* [tiešsaiste] [skatīts 2014. g. 2. martā]. Pieejams: https://online.tugraz.at/tug_online/voe_main2.getVollText?pDocumentNr=207962&pCurrPk=59886
8. Borodinecs A., Krēsliņš A. (2007) *Būvniecības siltumfizika ēku projektētājiem*. Rīgas Tehniskā universitāte. Siltuma, gāzes un ūdens tehnoloģijas institūts. Rīga: RTU izdevniecība. 131 lpp.
9. Bowyer J.L., Shmulsky R., Haygreen J.G. (2003) *Forest Products and Wood Science: An Introduction Forth Edition*. Iowa State Press, A Blackwell Publishing Company. 554 p.
10. Brandner R. (2014) *Production and Technology of Cross Laminated Timber (CLT): A state-of-the-art Report* [tiešsaiste] [skatīts 2015. g. 1. martā]. Pieejams: <http://www.iom3.org/fileproxy/457425>
11. Brandner R., Gehri E., Bogensperger T., Schickhofer G. (2007) *Modulud of shear and elasticity of glued laminated timber and related examinations* [tiešsaiste] [skatīts 2015. g. 5. februārī]. Pieejams: http://holzbauforschung.at/fileadmin/user_upload/Intranet/Veroeffentlichungen/Brandner/CIBW18_Brandner_Determination_of_modulus_of_shear_and_elasticity_of_Glulam_2007.pdf
12. Buksans E., Iejavs J., Rudzitis E. (2015) Reaction to fire performance of cellular wood materials. **In:** *Proceedings of the 1st European Workshop Fire Safety of Green Buildings*. Shaker Verlag, Berlin, p. 13-16.

13. Buksans E., Morozovs A., Rudzitis E. (2013) Improvement of the reaction to fire performance of cellular wood material. *International Journal in the Field of Wood Engeneering ProLigno*, Vol. 9, No. 4, Part 2, Universităţii „Transilvania”, Braşov, Romania, p. 203-210.
14. Bukšāns E. (2010) *Koksnes materiālu ugunsdrošību ietekmējošie faktori un ugunsreakcijas prognozēšana*: promocijas darbs inženierzinātņu doktora (Dr.sc.ing.) grāda iegūšanai materiālzinātņu nozarē, koksnes materiālu un tehnoloģijas apakšnozarē [tiešsaiste]. Latvijas Lauksaimniecības universitāte. Meža fakultāte. Kokapstrādes katedra. Jelgava. 127 lpp. [Skatīts 2013. gada 22. februārī]. Pieejams: http://www.latforin.info/fileadmin/portals/image/faili/Edgars_Buksans_promocijas_darbs_aizstavesanai_LLU_MF_2010_biblioteka.pdf
15. Collier P.C.R. (1992) *Charring rates of timber* [tiešsaiste]. Study report No. 42. [Skatīts 2010. gada 5. septembrī]. Pieejams: http://www.branz.co.nz/cms_show_download.php?id=0ef894f9af0b665d62b7004df771889dbfddf136
16. Czajkowski L., Olek W., Weres J., Guzends R. (2016) *Thermal properties of wood-based panels: thermal conductivity identification with inverse modeling* [tiešsaiste] [skatīts 2016. gada 25. februārī]. Pieejams: <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00107-016-1021-6>
17. Dinwoodie J., Duke-Evans D., Kearley V., Kerr A. (2004) *PanelGuide. Version 1&2* [tiešsaiste] [skatīts 2014. gada 23. martā]. Pieejams: <http://www.wpif.org.uk/PanelGuide.asp>
18. Dlhý D., Tomašovič P. (2014) Sound Insulation Determination of Door. *Advanced Materials Research*, Vol 1057, p. 215-222.
19. Flaig M., Blaß H. J. (2014) *Bending strength of cross laminated timber beams loads in plane* [tiešsaiste] [skatīts 2015. gada 27. aprīlī]. Pieejams: <http://digbib.ubka.uni-karlsruhe.de/volltexte/documents/3212572>
20. Follrich J., Berger J., Frybort S., Teischinger A., Müller U. (2006) DendroLight (R) - an innovative wood based light weight panel. **In:** *Wood Resources and Panel Properties*, COST Action E44 - E49, Valencia, p. 27-35.
21. Gates J.C. (2009) Screw Withdrawal Strength in 9Wood's Assemblies. Test Evaluation Report [tiešsaiste]. Oregon Wood Innovation Center. [Skatīts 2015. gada 6. janvārī]. Pieejams: http://www.9wood.com/files/rd_reports/screw_withdrawl.pdf
22. Gorman T. M. (1998) Relationship between moisture changes and dimensional change in wood. *Journal of Materials Education*, Vol. 20 (5&6), p. 335-340.
23. Gount D. *The effect of thread geometry on screw withdrawal strength* [tiešsaiste]. New Zealand Forest Research Institute, Rotorua, New Zealand. [Skatīts 2015. gada 5. janvārī]. Pieejams: <http://www.timberdesign.org.nz/files/EffectOfThreadGeometryOnScrewWithdrawal.PDF>
24. Graudiņš A. (2013) *Dendrolight būvpaneļu ražošanas projekts*: ražošanas prakses “Uzņēmējdarbība nozarē” atskaite. Kokapstrādes katedra. Meža fakultāte. LLU. Jelgava. 15 lpp.
25. Hakkarainen T., Mikkola E., Östman B., a.o. (2005) *State -of -the art* [tiešsaiste]. Innovative eco-efficient high fire performance wood products for demanding applications: InnoFireWOOD. [Skatīts 2010. gada 5. septembrī]. Pieejams: <http://virtual.vtt.fi/virtual/innofirewood/stateoftheart/ifw-stateoftheart.pdf>
26. Hoadley R. B. (2000) *Understanding Wood: A Craftsman's Guide to Wood Technology*. USA: The Taunton Press. 209 p.
27. Hofstetter K., Eberhardsteiner J., Stürzenbecher R. (2009) Wood and wood products - linking multiscale analysis and structural numerical simulations [tiešsaiste]. **In:** 7th

- European LS-DYNA Conference*. [Skatīts 2009. gada 9. decembrī]. Pieejams: <http://www.dynalook.com/european-conf-2009/A-I-02.pdf>.
28. Iejavs J.^a (2007) The influence of wood moisture content and impregnation on the critical bending strength of fingerjointed spruce wood. *Zbornik referatov, Technicka univerzita vo Zvolene*, XVIII Symposium Adhesives in woodworking industry, p. 184-188.
 29. Iejavs J.^b (2007) *Koksnes mitruma un impregnēšanas ietekme uz garumā līmētu egles (Picea Abies L.) terases dēļu robežstiprību liecē*: maģistra darbs inženierzinātņu maģistra (Mg.sc.ing) grāda iegūšanai materiālzinātņu nozarē, koksnes materiālu un tehnoloģiju apakšnozarē. Latvijas Lauksaimniecības universitāte. Meža fakultāte. Kokapstrādes katedra. Jelgava. 68 lpp.
 30. Iejavs J., Spulle U., Domkins A., Bukšāns E. (2009) Dendrolight tipa vieglās plātnes no mīksto lapkoku koksnes. No: *Valsts pētījumu programma, 2005-2009. Rakstu krājums. Lapu koku audzēšanas un racionālas izmantošanas pamatojums jaunu produktu ieguvei*. Rīga: LVKĶI, 115.-119. lpp.
 31. Iejavs J., Spulle U., Jakovļevs V. (2011) Comparison of three layer cellular material and wood based panel properties. *Drewno-Wood*. Poznan: Institut Technologii Drewno, Vol. 54, No.185, p. 40-49.
 32. Iejavs J., Spulle U., Jakovļevs V. (2011) Evaluation of bending properties of three layer cellular wood panels using six different structural models. In: *Proceedings of Annual 17th International Scientific Conference Research for Rural Development 2011*. Jelgava: LLU, Vol. 2, p. 85-90.
 33. Iejavs J., Jakovļevs V. (2012) Gluability and bonding quality of cellular wood material. In: *Proceedings of the 8th Meeting of Northern European Network for Wood Science and Engineering (WSE)*. Kaunas: Kaunas University of Technology, p. 207-213.
 34. Iejavs J., Spulle U.^a (2013) Compression strength of three-layer cellular wood panels. *Drewno-Wood*. Poznan: Institut Technologii Drewno, Vol. 56, No. 189, p. 101-113.
 35. Iejavs J., Spulle U.^b (2013) Structural properties of cellular wood material. *International Journal in the Field of Wood Engeneering ProLigno*. Braşov: Editura Universităţii „Transilvania” din Braşov, Vol. 9, No. 4, Part 2, p. 491-497.
 36. Iejavs J., Jakovļevs V., Tuherm H. (2013) Koksnes šūnveida materiāla fizikālās un mehāniskās īpašības. No: *Valsts pētījumu programma, 2010-2013. Rakstu krājums, “Vietējo resursu ilgtspējīga izmantošana - jauni produkti un tehnoloģijas (NatRes)”*. Rīga: LVKŅI, 117.-121. lpp.
 37. Iejavs J., Ješauskis E. (2014) Ģeometrisko izmēru ietekme uz koksnes šūnveida materiāla mehāniskajām īpašībām. No: *Zinātne un prakse nozares attīstībai. LLU Meža fakultātes zinātniski praktiskās konferences tēzes*. Jelgava: LLU, 84.-87. lpp.
 38. Iljinen A. (1942) *Über den Einfluss der Probekorpegrosse auf die Biegefestigkeit des Holzes*. Holz als Roh-und Werkstoff, Bd.6.
 39. Kalniņš A., Liepiņš R. (1933) Latvijas koku vidējās tehniskās īpašības pēc līdzšinējiem pētījumiem LU mežu tehnoloģijas laboratorijā. *Latvijas Universitātes Raksti*, Lauksaimniecības fakultātes sērija, 2. sēj., Nr. 9-13. 273.-291. lpp.
 40. Kokins L., Staprāns J. (1984) *Koksnes hidrotermiskā apstrāde un konservēšana*. Rīga: Zvaigzne. 221 lpp.
 41. Kol H.Ş. (2009) *Thermal and dielectric properties of pine wood in the transverse direction* [tiešsaiste]. BioRecources 4 (4), p. 1663-1669. [Skatīts 2013. gada 3. martā]. Pieejams: https://www.ncsu.edu/bioresources/BioRes_04/BioRes_04_4_1663_SahinKol_Thermal_Dielec_Prop_Pine_Wood_Trans_Direc_687.pdf
 42. Kristoffersen B., Steen Hansen A., Hakkarainen T., a.o. (2003) *Using the Cone Calorimeter for screening and control testing of fire retarded wood products* [tiešsaiste]. Report Nordtest project 1526-01. Trondheim: Norwegian Fire Research

- Laboratory, 63 p. [Skatīts 2010. gada 6. septembrī]. Pieejams: http://www.researchgate.net/publication/242485819_Nordtest_project_1526-01_Using_the_Cone_Calorimeter_for_screening_and_control_testing_of_fire_retarded_wood_products
43. Kūliņš L. (2004) *Līmētu koksnes konstrukciju materiālu ražošana. Mācību programma un metodiskie materiāli*. Jelgava: Kokapstrādes tehnoloģijas centrs. 246 lpp.
 44. Kupča K. (2012) „DendroLight®” šūnmateriālu skaitliskā modelēšana un eksperimentālā validācija: maģistra darbs inženierzinātņu maģistra (Mg.sc.ing) grāda iegūšanai. Rīgas Tehniskā universitāte. Būvniecības fakultāte. Materiālu un konstrukciju institūts. Rīga. 87 lpp.
 45. Kūms J. (2015) *Koksnes šūnveida materiāla būvbloka ūdens tvaika caurlaidība*: maģistra darbs. Latvijas Lauksaimniecības universitāte. Meža fakultāte. Kokapstrādes katedra. Jelgava. 61 lpp.
 46. Labans E., Kalnins K. and Bikovs A. (2012) *Simulation of Mechanical and Thermal Properties for Sandwich Panels with Cellular Wood Cores* [tiešsaiste]. Scotland. [Skatīts 2013. gada 11. oktobrī]. Pieejams: <http://webapp.tudelft.nl/proceedings/ect2012/pdf/labans.pdf>
 47. Labans E., Kalnins K. (2012) Numerical Modelling and Experimental Validation of Dendrolight Cellular Wood Material. **In: Proceedings of the 8th Meeting "Northern European Network for Wood Science and Engineering (WSE)"**. Lithuania, Kaunas, p. 177-184.
 48. Labans E., Kalniņš K., Ozoliņš O. (2010) Experimental and Numerical Identification of Veneers Mechanical Properties. *RTU Construction Science*, Vol. 11, p. 38-43.
 49. Liepiņš, S. (2011) *Risinājumi un būvniecības tehnoloģija ēku energoefektivitātes paaugstināšanai* [tiešsaiste]. Jelgava. [Skatīts 2013. gada 11. oktobrī]. Pieejams: http://energoauditors.files.wordpress.com/2011/02/llu-tehnologijas_ee_paaugstinasanai_s-liepins.pdf
 50. Lūsēna I., Ozola L., Rūsiņa L. (2007) *Koks būvniecībā*. Rīga: Stilus. 255 lpp.
 51. Madsen B. (1975) Duration of load test for wet lumber in bending. *Forest Products Journal*, No. 5, p. 33-40.
 52. Mayes D., Oksanen O. (2003) *Thermowood handbook* [tiešsaiste] [skatīts 2015. gada 5. februārī]. Pieejams: <http://www.vandormaeltimber.com/TW%20handbook%20FF.pdf>
 53. Mikkola E. (1990) *Charring of Wood*. Espoo: Technical Research Centre of Finland, Research report 689, Espoo, 35 p.
 54. Miljković J., Popović M., Diporović-Momčilović M., Gavrilović-Grmuša I. (2007) Edge screw withdrawal resistance in conventional particleboard and OSB - influence of the particle type. **In: Гласник Шумарског Факултета**, бр. 95, Београд, с. 109-117.
 55. Mirski R., Dziurka D. (2013) *The effect of ambient conditions on dimensional stability of OSB/4* [tiešsaiste]. Wood research. [Skatīts 2015. gada 8. martā]. Pieejams: http://www.woodresearch.sk/articles/7-25-134844_10_Mirski.pdf
 56. Nedbal F. (1960) *Drevarsky viskum*. Bd. 6.
 57. Niemz P. (1993) *Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe*. DRW-Verlag Weinbrenner GmbH & Co., Leinefelden- Echterdingen, B. 243.
 58. Nussbaum R. (1988) The effect of low concentration fire retardant impregnations on wood charring rate and char yield. *Journal of Fire Science*, Vol. 6, p. 290-306.
 59. Ozoliņš A. (2005) *Praktiskā koksne*. Rīga: Jumava. 96 lpp.
 60. Östman B, Mikkola E. (2006) European classes for the reaction to fire performance of wood products [tiešsaiste]. **In: Holz als Roh- und Werkstoff** 64. [Skatīts 2014. gada 3. septembrī]. Pieejams: <http://timberprotection.com/pdf/5-1%20Euroclass.pdf>
 61. Östman B., Rydholm D. (2002) *National fire regulations in relation to the use of wood in European and some other countries* [tiešsaiste]. Stockholm: Swedish Institute for Wood Technology Research. [Skatīts 2010. gada 5. septembrī]. Pieejams:

- http://lnu.se/polopoly_fs/1.42307!Wooden%20Eco-buildings%20%20Report%205%20%28Buiding%20regulations%29-final.pdf
62. Östman B., Voss A., Hughes A., Hovde P. J., Grexa O. (2001) Durability of fire retardant treated wood products at humid and exterior conditions - Review of literature. *Fire and Materials*. Vol. 25, No. 3, p. 95-104.
 63. Pang S., Herritsch A. (2005) *Physical properties of earlywood and latewood of Pinus radiata D. Don: Anisotropic shrinkage, equilibrium moisture content and fibre saturation point* [tiešsaiste]. *Holzforschung*, Vol. 59. [Skatīts 2014. gada 7. martā]. Pieejams: <http://www.buildingsurveyors.co.nz/sites/default/files/members/documents/hfsg%2059%206%20654.pdf>
 64. Pavlovičs G. (2011) *Latvijas inovatīvā mēbeļu un celtniecības materiāla no saldā ķirša (Prunus avium L.) koksnes īpašību pētījumi*: promocijas darbs inženierzinātņu doktora (Dr.sc.ing.) grāda iegūšanai ķīmijas inženierzinātnes nozarē, koksnes ķīmijas tehnoloģijas apakšnozarē. Rīgas Tehniskā universitāte. Materiālzinātnes un lietišķās ķīmijas fakultāte. Polimērmateriālu institūts. Rīga. 131 lpp.
 65. Pflug J., Vangrimde B., Verpoest I. (2003) Material Efficiency and Cost Effectiveness of Sandwich Materials. **In: Proceeding of Sampe Conference**, Longbeach (USA), p. 1925-1937.
 66. Pfundstein M., Gellert R., Spitzner M., Rudolphi A. (2008) *Detail Practice: Insulating Materials - Principles, Materials, Applications*. Institut Für international Archntectur-Dokumentation GmbH & CO. KG, Basel, 112 p.
 67. *Reaction to fire classification report PK-13-079* (2009) [tiešsaiste]. Centrum stavebního inženýrství. [Skatīts 2014. gada 5. martā]. Pieejams: http://www.kronospan-riga.lv/uploads/files/Reaction_to_fire.OSB_ECO.07.2018.pdf
 68. Repola J. (2006) *Models for vertical wood density of Scots pine, Norway spruce and birch stems and their application to determine average wood density* [tiešsaiste]. [Skatīts 2015. gada 5. februārī]. Pieejams: <http://www.metla.fi/silvafennica/full/sf40/sf404673.pdf>
 69. Rijdsdijk J.F., Laming P.B. (1995) *Physical and Related Properties of 145 Timbers*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 380 p.
 70. Rozins R., Iejavs J. (2014) Evaluation of thermal properties of wood based composite panel walls. **In: Proceedings of Annual 20th International Scientific Conference Research for Rural Development 2014**. Jelgava: LLU, Vol. 2, p. 109-114.
 71. Rozins R., Iejavs J., Jakovlevs V., Spulle U. (2020) The properties of lightweight stabilised blockboard panels. *Drewno-Wood*. Poznan: Institut Technologii Drewno, Vol. 63, No. 206, p. 103-119.
 72. Rowell R.M. (2005) *Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites*. Boca Raton: Taylor & Francis group. 487 p.
 73. Rudzītis E. (2013) *Priedes (Pinus Sylvestris L.) koksnes šūnveida materiāla ugunsdrošība un tās uzlabošanas iespējas*: maģistra darbs inženierzinātņu maģistra (Mg.sc.ing) grāda iegūšanai materiālzinātņu nozarē, koksnes materiālu un tehnoloģiju apakšnozarē. Latvijas Lauksaimniecības universitāte. Meža fakultāte. Kokapstrādes katedra. Jelgava. 66 lpp.
 74. Semple K.E., Smith G.D. (2006) Prediction of internal bond strength in particleboard from screws withdrawal resistance models. *Wood and Fiber Science*, Vol. 38, issue2, Society of Wood Science and Technology, p. 256-267.
 75. Serrano E., Enquist B. (2010) Compression Strength Perpendicular to Grain in Cross-Laminated Timber (CLT) [tiešsaiste]. **In: Proceedings of World Conference on Timber Engineering**. [Skatīts 2015. gada 5. februārī]. Pieejams: https://online.tugraz.at/tug_online/voe_main2.getVollText?pDocumentNr=207962&pCurrPk=59886

76. Simpson W.T. (1973) Predicting equilibrium moisture content of wood by mathematical models. *Wood and Fiber*, Vol. 5, issue 1, p. 41-49.
77. Skuratov N. (2010) New Lightweight solid wood panels for green building [tiešsaiste]. *In: Proceedings of the International Convention of Society of Wood Science and Technology and United Nations Economic Commission for Europe - Timber Committee*. Geneva. [Skatīts 2013. gada 26. februārī]. Pieejams: <http://www.swst.org/meetings/AM10/pdfs/IW-4%20skuratov%20paper.pdf>
78. Spulle U., Bukšāns E., Iejavs J., Roziņš R. (2017) Swelling pressure and form stability of cellular wood material. *Agronomy Research* 16(1), p. 263-275. (SCOPUS, EBSCO, CABI).
79. Stalnakar J. J., Harris E. C. (1997) *Structural Design in Wood*. 2d ed. New York etc.: Chapman & Hall: International Thomson Publishing. 448 p.
80. Strazdiņš M. (2011) *Koksnes šūnveidu plātņu materiālu skaņas absorbcijas pētījumi*: maģistra darbs. Latvijas Lauksaimniecības universitāte. Meža fakultāte. Kokapstrādes katedra. Jelgava. 53 lpp.
81. Sviták M., Gašparík M., Penc J. (2014) *Heat Resistance of Glued Finger Joints in Spruce Wood Constructions* [tiešsaiste] [skatīts 2015. gada 5. februārī]. Pieejams: http://www.ncsu.edu/bioresources/BioRes_09/BioRes_09_4_7529_Svitak_GP_Heat_Resist_Glued_Finger_Joints_Spruce_6267.pdf
82. Suleiman B. M., Larfeldt J., Leckner B., Gustavsson M. (1999) *Thermal conductivity and diffusivity of wood*. *Wood Science and Technology* 33, Springer-Verlag, Berlin, p. 465-473.
83. Šķēle K., Alksne A., Cīrule D., Hrols J. (2002) Parastās priedes (*Pinus Sylvestris* L.) koksnes anatomiskā uzbūve un fizikālās īpašības Latvijā. *Latvijas Lauksaimniecības Universitātes Raksti* 5. Jelgava. 68.-74. lpp.
84. Štrausa S., Ziemeļniece A., Brencis R., Vulāns A. (2011) *Ēku energoefektivitāte klimata maiņas apstākļos*. Mācību palīgglīdzeklis, Klimata pārmaiņu finanšu instruments. Jelgava. 90 lpp.
85. Taghiyari H.R., Gholamiyan H. and Karimi A. (2012) Effect of heat-treatment on screw and nail withdrawal resistance of nanosilver-impregnated and untreated solid wood. *Current Nanoscience*, Vol. 8, No. 4, p. 637-642.
86. *Termiski modificētas koksnes ražošanas iespējas Latvijā: koksnes īpašības, pielietojums un tirgus vērtējums* (2005). Rīga: LR Zemkopības ministrija. 147 lpp.
87. Thelanderson S., Larsen H. J. (2003) *Timber Engeneering*. England: John Wiley & Sons, ltd. 446 p.
88. *Wood handbook - Wood as an Engineering Material* (2010). Forest Products Laboratory, United States of America, p. 4-11.
89. Wagenführ R. (1996) *Holzatlas. Anatomiedes Holzes*. Leipzig: Fachbuchverlag. 688 p.
90. Wu Q., Piao C. (1998) *Thickness Swelling and its Relationship to Internal Bond Strength Loss of Comercial Oriented Strandboard* [tiešsaiste]. Working Paper #32. [Skatīts 2015. gada 14. martā]. Pieejams: http://www.lfpdc.lsu.edu/publications/working_papers/wp32.pdf
91. Vaņins A. (1950) *Koksnes zinātne*. Rīga: Latvijas Valsts izdevniecība. 96 lpp.
92. Ulpe J., Kupče L. (1991) *Koka un plastmasu konstrukcijas*. Rīga: Zvaigzne. 304 lpp.
93. Voth C.R. (2009) *Lightweight sandwich panels using small-diameter timber wood-strands and recycled newsprint cores* [tiešsaiste]. PhD thesis. [Skatīts 2015. gada 15. janvārī]. Pieejams: http://www.dissertations.wsu.edu/Thesis/Fall2009/c_voth_120609.pdf
94. Zabauskis A.L. (2006) *Būvakustika. Teorija un realitāte. Nr.10*. Rīga. 90 lpp.
95. Боравиков А. М., Уголев Б. (1989) *Справочник по древесине: Справочник*. Москва: Лесная пром-сть. 296 с.

96. Волынский В.Н. (2000) *Взаимосвязь и изменчивость физико-механических свойств древесины*: монография. Архангельск: Изд-во АГТУ. 196 с.
97. Ермолаева Н. С., Лукачев С. В., Терентьева В. Я. (1977) *Прочностные и упругие характеристики пиломатериалов 5 и 4 сортов по ТУ 13-02-04*. В кн.: Исследования конструкций из клееной древесины и пластмасс. Ленинград: ЛИСИ, № 1 (132), с. 67-72.
98. Королев В.И. и др. (1987) Исследование влияния сучков на прочность клееной древесины при статическом изгибе. *Научные труды МЛТИ*, 107, с. 8-19.
99. Леонтьев Н.Л. (1949) *Влияние пороков на модули упругости древесины*. Инф. листок ЦНИИМОД, № 28(173). 14 с.
100. Малыгина Л. Н., Хавратова Е. М. (1980) Прочностные показатели хвойных пиломатериалов. *Деревообрабатывающая промышленность*, № 11, с. 7-8.
101. Полубояринов О.И. (1976) *Плотность древесины*. Москва: Лесная промышленность. 160 с.
102. Савков Е.И. (1962) *Прочность пиломатериалов*. Москва: Гослесбумиздат. 88 с.
103. Соболев Ю.С. (1982) Соотношение между пределами прочности древесины при статическом изгибе, растяжении и сжатии. *Научные труды МЛТИ*, № 140, с. 85-89.
104. Хмелидзе Т.П. и др. (1986) Изменение модуля упругости древесины сосны и лиственницы при тепловых воздействиях. *Деревообрабатывающая промышленность*, №7, с. 8-9.

Standarti un normatīvi

1. ASTM C 273-00. *Standard Test Method for Shear Properties of Sandwich Core Materials*. Annual Book of the ASTM Standards, The American Society for Testing and Materials, 2000.
2. DIN 4108-2:2003-06. *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz*. Deutsches Institut für Normung. 2006.
3. DIN 52184:1979-05. *Bestimmung der Quellung und Schwindung*. No: DIN-Taschenbuch 31. *Normen über Holz*. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1992. B. 89-94.
4. DIN 68100:1984-12. *Toleranzsystem für Holzbe- und -verarbeitung - Begriffe, Toleranzreihen, Schwind- und Quellmaße*. No: DIN - Taschenbuch 209. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1994. B. 56-72.
5. DIN 68364:2003-05. *Prüfung von Holz; Bestimmung der Quellung und Schwindung*. No: DIN - Taschenbuch 359. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2004. B. 8-14.
6. ISO 3131:1975. *Wood - Determination of density for physical and mechanical tests*. International Organization for Standardization. Switzerland, 1975.
7. LVS CEN/TS 12872:2007. *Koksnes plātnes. Norādījumi slodzi nesošu plātņu lietošanā grīdu, sienu un jumta konstrukcijās*. Rīga: Latvijas Valsts standarts, 1998.
8. LVS EN 12086:2014. *Siltumizolācijas materiāli lietošanai būvniecībā. Ūdens tvaika pārvades raksturojumu noteikšana*. Rīga: Latvijas Valsts standarts, 1998.
9. LVS EN 12667:2002. *Būvmateriālu un būvizstrādājumu termiskā efektivitāte - Termiskās pretestības noteikšana ar aizsargātās karstās plāksnes un kalorimetra metodi - Izstrādājumi ar zemu un vidēju termisko pretestību*. Rīga: Latvijas Valsts standarts, 1998.
10. LVS EN 13183-1:2003. *Zāgmateriālu mitrums - 1.daļa: Noteikšana ar žāvēšanas metodi*. Rīga: Latvijas Valsts standarts, 1998.
11. LVS EN 13238:2010. *Būvizstrādājumu testēšana pēc to reakcijas uz uguni. Kondicionēšanas metodika un vispārējie noteikumi, izvēloties substrātus*. Rīga: Latvijas Valsts standarts, 1998.

12. LVS EN 13501-1+A1:2011. *Būvkonstrukciju un būvelementu klasifikācija pēc to reakcijas uz uguni. 1. daļa: Klasifikācija, pielietojot testēšanas datus no ugunsreakcijas testiem.* Rīga: Latvijas Valsts standarts, 1998.
13. LVS EN 13501-2+A1:2011. *Būvkonstrukciju un būvelementu klasifikācija pēc to reakcijas uz uguni. 2. daļa: Klasifikācija, pielietojot ugunsizturības testa datus, izņemot ventilācijas sistēmām paredzētos izstrādājumus.* Rīga: Latvijas Valsts standarts, 1998.
14. LVS EN ISO 13788:2013. *Ēku būvmateriālu un būvelementu higrosiltumtehnikas īpašības. Iekšējās virsmas temperatūra kritiskā virsmas mitruma un iekšējās kondensācijas novēršanai. Aprēķina metodes (ISO 13788:2012).* Rīga: Latvijas Valsts standarts, 1998.
15. LVS EN 13823:2010. *Būvizstrādājumu testēšana pēc to reakcijas uz uguni. Būvizstrādājumi, izņemot grīdas segumus, kas pakļauti atsevišķa degoša priekšmeta siltuma ietekmei.* Rīga: Latvijas Valsts standarts, 1998.
16. LVS EN 13986:2005 *Celtniecībā lietojamās koksnes plātnes - Īpašības, atbilstības novērtēšana un marķēšana.* Rīga: Latvijas Valsts standarts, 1998.
17. LVS EN 14080:2013. *Koka konstrukcijas. Līmēti kokmateriāli. Prasības.* Rīga: Latvijas Valsts standarts, 1998.
18. LVS EN 14358:2007. *Koka būvkonstrukcijas. 5 procentīļu raksturvērtību aprēķins un paraugkopas pieņemamības kritēriji.* Rīga: Latvijas Valsts standarts, 1998.
19. LVS EN 310:2001. *Koka skaidu plāksnes - Elastības moduļa un lieces spēka noteikšana.* Rīga: Latvijas Valsts standarts, 1998.
20. LVS EN 318:2002. *Koksnes plātnes - Izmēru izmaiņu noteikšana, mainoties relatīvajam mitrumam.* Rīga: Latvijas Valsts standarts, 1998.
21. LVS EN 319:2000. *Koka skaidu plāksnes un kokšķiedru plāksnes - Stiepes stiprības noteikšana perpendikulāri pret plāksnes plakni.* Rīga: Latvijas Valsts standarts, 1998.
22. LVS EN 320:2011. *Kokskaidu un kokšķiedru plātnes. Pretestības noteikšana skrūvju aksiālai izraušanai.* Rīga: Latvijas Valsts standarts, 1998.
23. LVS EN 338:2010. *Konstrukciju kokmateriāli. Stiprības klases.* Rīga: Latvijas Valsts standarts, 1998.
24. LVS EN 384:2010. *Konstrukciju kokmateriāli. Mehānisko īpašību raksturlielumu un blīvuma noteikšana.* Rīga: Latvijas Valsts standarts, 1998.
25. LVS EN 392:2000. *Līmētā koksne - Līmes klājuma bīdes tests.* Rīga: Latvijas Valsts standarts, 1998.
26. LVS EN 408+A1:2012. *Koka konstrukcijas. Konstrukciju kokmateriāli un līmētie koka izstrādājumi. Dažu fizikālo un mehānisko īpašību noteikšana.* Rīga: Latvijas Valsts standarts, 1998.
27. LVS ISO 5660-1:2005. *Ugunsreakcijas testi - Siltuma izdalīšanās, dūmu veidošanās un masas zuduma ātrums - 1. daļa: Siltuma izdalīšanās ātrums (koniskā kalorimetra metode).* Rīga: Latvijas Valsts standarts, 1998.
28. LVS ISO 8301:2001. *Siltuma izolācija - Siltuma pretestība un ar to saistīto īpašību noteikšana stacionārā režīmā - Siltuma plūsmas mērīšanas ierīce.* Rīga: Latvijas Valsts standarts, 1998.
29. LVS EN ISO 10140-1:2011. *Akustika. Būvelementu skaņas izolācijas mērīšana laboratorijas apstākļos. 1. daļa: Lietošanas noteikumi specifiskiem produktiem (ISO 10140-1:2010).* Rīga: Latvijas Valsts standarts, 1998.

30. LVS EN ISO 10140-2:2011. *Akustika. Būvelementu skaņas izolācijas mērīšana laboratorijas apstākļos. 2. daļa: Gaisā radītās skaņas izolācijas mērīšana (ISO 10140-2:2010)*. Rīga: Latvijas Valsts standarts, 1998.
31. LVS EN ISO 10140-3:2011. *Akustika. Būvelementu skaņas izolācijas mērīšana laboratorijas apstākļos. 3. daļa: Triecienskaņas izolācijas mērīšana (ISO 10140-3:2010)*. Rīga: Latvijas Valsts standarts, 1998.
32. LVS EN ISO 10140-4:2011. *Akustika. Būvelementu skaņas izolācijas mērīšana laboratorijas apstākļos. 4. daļa: Mērīšanas procedūras un prasības (ISO 10140-4:2010)*. Rīga: Latvijas Valsts standarts, 1998.
33. LVS EN ISO 10140-5:2011. *Akustika. Būvelementu skaņas izolācijas mērīšana laboratorijas apstākļos. 5. daļa: Prasības testēšanas iekārtām un aprīkojumam (ISO 10140-5:2010)*. Rīga: Latvijas Valsts standarts, 1998.
34. LVS EN ISO 10456:2007. *Būvmateriāli un būvizstrādājumi. Higrotermiskās īpašības. Projektos lietojamo vērtību tabulas un deklarēto un aprēķina siltumtehnisko vērtību noteikšanas procedūras*. Rīga: Latvijas Valsts standarts, 1998.
35. LVS EN ISO 11654:2000. *Akustika - Skaņas absorbētāji ēkās - Skaņas absorbcijas parametri*. Rīga: Latvijas Valsts standarts, 1998.
36. LVS EN ISO 11925-2:2004. *Ugunsreakcijas testi - Būvizstrādājumu aizdedzināmība no tiešas liesmas iedarbības - 2. daļa: Atsevišķa liesmas avota tests*. Rīga: Latvijas Valsts standarts, 1998.
37. LVS EN ISO 12572:2002. *Būvmateriālu un būvizstrādājumu higrotermiskās īpašības - Ūdens tvaika caurlaidības noteikšana*. Rīga: Latvijas Valsts standarts, 1998.
38. LVS EN ISO 140-1:2001. *Akustika - Būvelementu un būvju skaņas izolācijas mērīšana - 1. daļa: Prasības laboratoriju pārbaudes ietaisēm ar apslāpētu pārnesei*. Rīga: Latvijas Valsts standarts, 1998.
39. LVS EN ISO 140-3:2000. *Akustika - Ēku un būvelementu skaņas izolācijas mērīšana - 3. daļa: Būvelementu sadzīves trokšņu izolācijas mērījumi laboratorijas apstākļos*. Rīga: Latvijas Valsts standarts, 1998.
40. LVS EN ISO 354:2003. *Akustika - Skaņas absorbcijas mērīšana reverbācijas kamerā*. Rīga: Latvijas Valsts standarts, 1998.
41. LVS EN ISO 6946:2009. *Ēku būvkomponenti un būvelementi. Siltumpretestība un siltumapmaiņas koeficients. Aprēķināšanas metodika (ISO 6946:2007)*. Rīga: Latvijas Valsts standarts, 1998.
42. LVS EN ISO 717-1:2000. *Akustika - Ēku un būvelementu skaņas izolācijas novērtējums - 1. daļa: Sadzīves trokšņu izolācija*. Rīga: Latvijas Valsts standarts, 1998.
43. LVS EN ISO 8990:2007. *Siltumizolācija. Stacionāru siltumpārvades raksturlielumu noteikšana. Kalibrētas un norobežotas karstās kastes metode*. Rīga: Latvijas Valsts standarts, 1998.
44. LVS EN 1995-1-1+AC+A1:2012 5. *Eiropas kodekss: Koka konstrukciju projektēšana. 1-1. daļa: Vispārīgi. Vispārīgie noteikumi un noteikumi būvēm*. Rīga: Latvijas Valsts standarts, 1998.
45. Ministru kabineta noteikumi Nr. 499, LBN 016-11 "Būvakustika". Rīga, 2011.
46. Ministru kabineta noteikumi Nr.495, LBN 002-01 "Ēku norobežojošo konstrukciju siltumtehnika". Rīga, 2001.
47. Ministru kabineta noteikumi Nr. 498, LBN 201-10 "Būvju ugunsdrošība". Rīga, 2011.

48. *Regulation (EU) No. 305/2011 of the European Parliament and of the Council.* Official Journal of the European Union No. 4.4.2011, 2011.
49. ГСССД 69-84. *Древесина. Показатели физико-механических свойств малых чистых образцов. Издание Госстандарта.* СССР, М., 1984.