

Ģirts Frolovs

## PLĀTŅU AR DOBĀM KOKSNES RIBĀM RACIONĀLAS STRUKTŪRAS PROJEKTĒŠANAS PAMATPRINCIPI

Promocijas darba kopsavilkums

## DESIGN PRINCIPLES OF RATIONAL STRUCTURE FOR PLATES WITH HOLLOW WOODEN RIBS

Summary of the Doctoral Thesis



**RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE**

Būvniecības inženierzinātņu fakultāte  
Būvniecības un rekonstrukcijas institūts

**RIGA TECHNICAL UNIVERSITY**

Faculty of Civil Engineering  
Institute of Structural Engineering and Reconstruction

**Ģirts Frolovs**

Doktora studiju programmas “Būvniecība” doktorants  
Doctoral Student of the Study Programme “Construction”

**PLĀTŅU AR DOBĀM KOKSNES RIBĀM  
RACIONĀLAS STRUKTŪRAS  
PROJEKTĒŠANAS PAMATPRINCIPI**

**Promocijas darba KOPSAVILKUMS**

**DESIGN PRINCIPLES OF RATIONAL  
STRUCTURE FOR PLATES WITH HOLLOW  
WOODEN RIBS**

**Summary of the Doctoral Thesis**

Zinātniskie vadītāji / Scientific supervisors

Asoc. Prof., *Dr. sc. ing.*

JĀNIS ŠLISERIS

Prof., *Dr. habil. sc. ing.*

**KĀRLIS ROCĒNS**

RTU Izdevniecība

RTU Press

2018

Frolovs Ģ. Plātņu ar dobām koksnes ribām racionālas struktūras projektēšanas pamatprincipi. Promocijas darba kopsavilkums. Rīga: RTU Izdevniecība, 2018. 62 lpp.

Frolovs, G. Design Principles of Rational Structure for Plates with Hollow Wooden Ribs. Summary of the Doctoral Thesis. Riga: RTU Press, 2018. 62 p.

Iespiests saskaņā ar promocijas padomes "RTU P-06" 2018. gada 29. jūnija lēmumu, protokols Nr. 4-2018.

Published in accordance with the decision of the Promotion Council "RTU P-06" of 29 June 2018, Minutes No. 4-2018.

Darbs izstrādāts ar Valsts pētījumu programmas "Inovatīvi materiāli un viedās tehnoloģijas vides drošumam (IMATEH)" (4. projekts „Slāpains koksnes kompozītmateriāls ar racionālu struktūru un palielinātu īpatnējo lieces nestspēju") finansējumu.



Darbs izstrādāts ar Baltijas-Vācijas augstskolu biroja, Fraunhofer ITWM un RTU sadarbības projekta „Koksnes šķiedru plātņu racionāls pielietojums vieglo konstrukciju paneļiem ar paaugstinātu īpatnējo stiprību un stingumu" ietvaros.



The project is promoted through the AiF and the International Association for Technical Issues related to Wood e.V. in the programme for promoting industrial joint research and development (IGF) of the Federal Ministry of Economics and Technology (BMBF) on the basis of a decision of the German Bundestag and the grant "Simulationsgestützte Entwicklung von mitteldichten Faserplatten für den Leichtbau" number IGF 17644N.



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Darbs izstrādāts ar RTU Doktorantūras pētniecības granta finansējumu 2016./2017. studiju gadā.

ISBN 978-9934-22-114-9 (print)

ISBN 978-9934-22-115-6 (pdf)

# PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS INŽENIERZINĀTŅU DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2018. gada 7. septembrī plkst. 14.15 Rīgas Tehniskās universitātes Būvniecības inženierzinātņu fakultātē, Ķīpsalas ielā 6 A, Sēžu zālē.

OFICIĀLIE RECENZENTI:

Profesors *Dr. sc. ing.* Ainārs Paeglītis,  
Rīgas Tehniskā universitāte  
Pēcdokorantūras (*Postdoc*) pētniece *Dr. sc. ing.* Ieva Paegle,  
Dānijas Tehniskā universitāte, Dānija  
Asociētais profesors *Dr. sc. ing.* Andrejs Pupurs,  
Lūleo Tehniskā universitāte, Zviedrija

## APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājis šo promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai. Promocijas darbs zinātniskā grāda iegūšanai nav iesniegts nevienā citā universitātē.

Ģirts Frolovs ..... (paraksts)

Datums: .....

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, tajā ir ievads, piecas nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 76 attēli, 16 tabulu, kopā 103 lappuses, neieskaitot pielikumu. Literatūras sarakstā ir 165 nosaukumi.

## SATURS / CONTENTS

PROMOCIJAS DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS .....	6
Tēmas aktualitāte un pētījuma problēmas nostādne .....	6
Darba mērķis.....	6
Darba uzdevumi.....	6
Pētījuma zinātniskā novitāte .....	7
Promocijas darba praktiskais nozīmīgums .....	7
Pētīšanas metodika .....	7
Pētījuma teorētiskā un metodoloģiskā bāze.....	8
Pētījumu diapazons un iegūto rezultātu lietojuma robežas .....	8
Aizstāvēšanai izvirzītie darba rezultāti.....	8
Promocijas darba iegūto rezultātu aprobācija.....	8
Dalība starptautiskās konferencēs .....	9
Publikācijas.....	9
Oriģinalitāte .....	10
Promocijas darba sastāvs un apjoms .....	11
DARBA SATURS.....	12
Koksnes kompozītmateriālu ribotās plātnes .....	12
Plātņu ar šūnu tipa dobām ribām lieces nestspējas aprēķinu metodika .....	14
Plātņu racionālas struktūras un īpatnējās nestspējas aprēķinu metodikas .....	19
Šūnu tipa dobo ribu izgatavošanas paņēmieni un plātņu salīmēšanas pamatprincipi.....	22
Plātņu ar šūnu tipa dobām ribām projektēšanas rekomendācijas .....	23
Secinājumi .....	27
DOCTORAL THESIS PROPOSED TO RIGA TECHNICAL UNIVERSITY FOR THE PROMOTION TO THE SCIENTIFIC DEGREE OF DOCTOR OF ENGINEERING SCIENCES .....	29
GENERAL DESCRIPTION OF THE DOCTORAL THESIS .....	30
Topicality of the research and formulation of the problem.....	30
The aim of the research .....	30
The tasks of the research .....	30
Scientific novelty of the research .....	31
Application of the research results .....	31
Methodology of the research .....	31
Theoretical and methodological basis of the research.....	32
Scope of the study.....	32
Results presented for the defense .....	32
Approbation of the results .....	33
List of international conferences .....	33
List of scientific publications on the subject of the Doctoral Thesis.....	33
Originality of the research .....	35
Structure and contents of the Doctoral Thesis.....	35

CONTENTS OF THE DOCTORAL THESIS .....	37
Ribbed plates of wood composites .....	37
The methodology for calculation of plate's load bearing capacity in bending .....	39
Methodology for determination of rational structure and determination of specific load bearing capacity in bending for plates .....	44
Basic principles of manufacturing of ribs and gluing of plates .....	47
Recommendations for rational structure design of plate's geometrical parameters .....	48
Conclusions .....	51
LITERATŪRAS SARAKSTS / BLIOGRAPHY .....	53

# PROMOCIJAS DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS

## Tēmas aktualitāte un pētījuma problēmas nostādne

Pēdējos trīs gadu desmitos koksnes patēriņš arvien pieaug, sevišķi tas attiecas tieši uz materiāliem, kas izgatavoti uz koksnes bāzes. Atjaunojamo dabas resursu, tajā skaitā – mežu, racionālas izmantošanas nozīme arvien vairāk pieaug, jo arī mežu resursi ir ierobežoti. Viens no plaši izmantotiem koksnes materiāliem ir saplāksnis. Taču arī šim materiālam piemīt vairāki trūkumi un nepilnības, piemēram, pieaugot saplākšņa biežumam, tā vidējie slāņi lieces gadījumā netiek pilnībā izmantoti, kas tiek atrisināts, veidojot sendvičtipa vai ribotās konstrukcijas, kurām savukārt arī ir trūkumi (samazināts lieces un bīdes stingums un stiprība). Šos trūkumus var novērst, izmantojot plātnes ar šūnu tipa dobām ribām, kurām ir paaugstināta īpatnējā nestspēja (nestspēja uz masas vienību) gan plātnes garenvirzienā, gan šķērsvirzienā, palielināti slodžu pārnese ceļi un samazinātas mitruma izraisītās deformācijas. Ir zināmi vairāki slāņaino materiālu aprēķinu paņēmieni, taču trūkst metodikas, kas adekvāti un detalizēti veiktu aprēķinu, ņemot vērā ne tikai veidojošo elementu materiālu īpašības, bet arī ribojuma ģeometriskos parametrus, nelineārās līmes šuves un izmantoto materiālu sabrukuma kritērijus. Šādas plātnes dod iespēju veidot racionālu struktūru, pielāgojot to lietojuma mērķim un uzdevumam, ievērojami samazināt materiāla un enerģijas patēriņu, kā arī izmaksas. Veidojot racionālu struktūru, jāņem vērā šādu plātņu izgatavošanas tehnoloģiskās iespējas (līmēšanas spiediens, struktūras formas iegūšanas paņēmieni u. c.).

## Darba mērķis

Izstrādāt aprēķinu metodiku lieces un īpatnējās lieces nestspējas noteikšanai un optimizēšanai plātnēm ar šūnu tipa dobām ribām, ievērtējot apšuvumu un ribojuma ģeometrisko formu un savstarpējo savienojumu līmes šuves ietekmi uz plātņu stingumu un stiprību, kā arī izstrādāt pamatprincipus šādu plātņu izgatavošanas tehnoloģijai un rekomendācijas to projektēšanai.

## Darba uzdevumi

1. Izstrādāt aprēķinu metodiku lieces nestspējas noteikšanai ribojuma garenvirzienā un šķērsvirzienā plātnēm ar šūnu tipa dobām ribām, ievērtējot plātņu veidojošo elementu un nelineāro līmes šuvju darbību.
2. Skaitliski noteikt plātņu ar šūnu tipa dobām ribām lieces nestspēju un veikt plātņu eksperimentālās pārbaudes liecē tipiskākajiem gadījumiem.
3. Izstrādāt aprēķinu metodiku īpatnējās lieces nestspējas noteikšanai plātnēm ar šūnu tipa dobām ribām un, izmantojot šo metodiku, veikt optimizāciju iepriekš definētam nestspējas līmenim.
4. Izstrādāt pamatprincipus plātņu ar šūnu tipa dobām ribām izgatavošanai.



5. Izstrādāt rekomendācijas plātņu ar šūnu tipa dobām ribām racionālas struktūras ģeometrisko parametru projektēšanai.

## **Pētījuma zinātniskā novitāte**

Izstrādāta aprēķina metodika galīgo elementu programmas *ANSYS APDL* valodā, kas dod iespēju noteikt plātnes lieces nestspēju, ievērtējot plātnes veidojošo elementu (apšuvumu un ribojuma) ģeometriju, materiālu un līmes šuves darbību to savienojuma zonās. Eksperimentāli noteikta ribojuma un apšuvuma līmes šuvju darbība, un veiktas plātņu eksperimentālas pārbaudes liecē. Ar eksperimentālās plānošanas pieeju izstrādāta metodika plātnes īpatnējās nestspējas noteikšanai, un noteikti racionāli ģeometriskie parametri atbilstoši definētajai slodzes kombinācijai un balstījuma veidam. Veikta konceptuāla iegūto rezultātu eksperimentālā validācija, un parādītas izstrādātās aprēķinu metodikas izmantošanas iespējas, nosakot racionālu saplākšņa ribojumu uzdotajai plātnes nestspējai. Izstrādāti šūnu tipa dobā ribojuma un plātnes izgatavošanas un siltumizolācijas ieviešanas tehnoloģiskie pamatprincipi.

## **Promocijas darba praktiskais nozīmīgums**

Izmantojot piedāvātās metodikas, ir iespējams detalizēti aprēķināt un noteikt spriegumstāvokļus plātnes veidojošajos elementos un to savienojuma zonās, ņemot vērā materiālu īpašības, t. sk. līmes šuves darbību, un plātņi veidojošo elementu ģeometriju, kā arī veikt to optimizāciju, harmonizējot materiāla pretestības lauku un konstrukcijas piepūļu laukus. Šīs plātnes nodrošina samazinātas mitruma maiņas izraisītās deformācijas, pēc skaita palielinātus slodžu pārnese ceļus no apšuvuma uz ribojumu un palielinātu stingumu ribojuma šķērsvirzienā, salīdzinot ar iepriekš zināmajiem ribojuma veidiem, piemēram, taisnām ribām. Atrisināts šūnu tipa dobo riba formas iegūšanas paņēmieni, sniegti varianti siltumizolācijas iestrādei ribotajās plātnēs.

## **Pētīšanas metodika**

Darbā izstrādāta aprēķinu metodika lieces nestspējas noteikšanai kā speciāls ievades faila kods *ANSYS ADPL* programmēšanas valodā, kurā parametriskā veidā definēta plātnes ģeometrija, robežnosacījumi un materiālu mehānisko īpašību raksturlielumi. Komerציālā galīgo elementu programma *ANSYS*, izmantojot šo kodu, uzģenerē galīgo elementu aprēķinu modeli un izskaitļo plātnes nestspēju un spriegumu-deformāciju lauku.

Šajā darbā par struktūras projektēšanas pamatprincipiem tiek uzskatīti:

- metodika, ar kuras palīdzību iespējams noteikt plātnes lieces nestspēju;
- metodika, ar kuras palīdzību iespējams noteikt plātņu racionālos parametrus definētajām lieces nestspējas prasībām;
- plātņu izgatavošanas pamatprincipi.

Izmantojot šo aprēķinu metodiku, tiek noteikti attiecīgās struktūras elementu ģeometriskie parametri, tādējādi plātnes šķēluma piepūļu lauks tiek harmonizēts ar plātnes struktūras pretestības lauku. Izstrādātā aprēķinu metodika dod iespēju salīdzināt dažādu ribojumu



efektivitāti definētās nestspējas nodrošināšanai un noteikt īpatnējo lieces nestspēju, kas raksturo materiāla patēriņu atbilstošajam ribojuma veidam. Balstoties uz iegūtajiem rezultātiem, izstrādātas projektēšanas rekomendācijas.

Aprēķinu rezultāti tika validēti, pārbaudot samazināta izmēra konstrukcijas elementa modeļus (prototipus), vadoties pēc EN 789 standarta, ribota saplākšņa konstrukcijas elementa darbību lieces gadījumā, ievērtējot līmes šuves nelineāro darbību.

Šajā darbā noteikts, ka, plātnēm darbojoties liecē, noteicošās piepūles ir lieces moments un šķērsspēks, līdz ar to arī par plātnes lieces nestspēju tiek uzskatīta lieces momenta vai šķērsspēka vērtība, ko var uzņemt plātne, sasniedzot stiprības vai lietojamības robežstāvokļus īslaicīgas, statistiskas slodzes iedarbības rezultātā.

## **Pētījuma teorētiskā un metodoloģiskā bāze**

Darbā izmantotas šādas inženierzinātņu sadaļas:

- būvkonstrukcijas;
- kompozītmateriālu mehānika;
- būvmehānika;
- koksnes zinātne;
- konstrukciju optimizācija.

## **Pētījumu diapazons un iegūto rezultātu lietojuma robežas**

Izstrādātās plātnes ir racionālas tikai aprēķinā izmantotajām slodžu kombinācijām un balstījuma veidam. Piedāvātā aprēķinu metodika ir spēkā gadījumos, kad maksimālie spriegumi plātnes elementos nepārsniedz aprēķina pretestību vai pārvietojumus, ko limitē lietojamības robežstāvoklis (*SLS* – ja nav norādīts citādi, tad līdz 1/200 no plātnes laiduma). Aprēķini un eksperimenti veikti, izmantojot statistiskas, īslaicīgas slodzes. Tiek pētītas plātnes, kuru biezums ir no 25 mm līdz 200 mm.

## **Aizstāvēšanai izvirzītie darba rezultāti**

- Aprēķinu metodika un tās eksperimentāla validācija lieces nestspējas noteikšanai plātnēm ar šūnu tipa dobām ribām plātnes ribojuma garenvirzienā un šķērsvirzienā atkarībā no apšuvumu un ribojuma elementu ģeometriskajiem parametriem, ievērtējot līmes šuves nelineāro darbību.
- Aprēķinu metodika īpatnējās lieces nestspējas un racionālas struktūras noteikšanai plātnēm ar šūnu tipa dobām ribām.
- Plātņu ar šūnu tipa dobām ribām izgatavošanas paņēmiena pamatprincipi un iekārta.
- Rekomendācijas plātņu ar šūnu tipa dobām ribām projektēšanai un izgatavošanai.

## **Promocijas darba iegūto rezultātu aprobācija**

Promocijas darba rezultāti ziņoti un apspriesti 11 starptautiskās konferencēs. Galvenie darba rezultāti izklāstīti 12 zinātniskās publikācijās. Septiņas no tām ir indeksētas *Scopus* datubāzē.

## Dalība starptautiskās konferencēs

1. 3. starptautiskā zinātniskā konference „Innovative Materials, Structures and Technologies”, 27.–29. septembris 2017, Rīga, Latvija (mutiskais referāts).
2. Rīgas Tehniskās universitātes 57. starptautiskā zinātniskā konference Rīga, Valsts pētījumu programmas "IMATEH" sekcija 14.–18. oktobris 2016 (mutiskais referāts).
3. 5. starptautiskā konference “Advanced Construction” 6.–7. oktobris 2016, Kauna, Lietuva (stenda referāts).
4. 12 starptautiskā konference „Modern Building Materials, Structures and Techniques 2016” 26.–27. maijs 2016, Viļņa Lietuva (mutiskais referāts + stenda referāts).
5. 2. starptautiskā zinātniskā konference „Innovative Materials, Structures and Technologies”, 30. septembris–2. oktobris 2015, Rīga, Latvija (mutiskais referāts).
6. 10. starptautiskā zinātniski praktiskā konference “Environment. Technology. Resources” 18. – 20. jūnijs 2015, Rēzekne, Latvija (1 mutiskais referāts).
7. 4. starptautiskā konference ”Advanced Construction”, 9. –10. oktobris 2014, Kauna, Lietuva (mutiskais referāts).
8. Starptautiskā zinātniskā konference „Innovative Materials, Structures and Technologies”, 8. novembris 2013, Rīga, Latvija. (divi mutiskie referāti + stenda referāts).
9. Rīgas Tehniskās universitātes 54. starptautiski zinātniskā konference 14. – 16. oktobris 2013, Rīga Latvija (Mutiskais referāts).
10. XVIII Starptautiskā konference “Mechanics of Composite Materials” 2. – 6. jūnijs 2014, Rīga, Latvija (1 mutiskais referāts + 1 līdzdalība mutiskā referāta sagatavošanā).
11. 4. starptautiskā zinātniskā konference "Civil Engineering'13”, 16.-17. maijs, 2013, Jelgava, Latvija (1 mutisks referāts).
12. 54. RTU Studentu zinātniskā un tehniskā konference. 2009, 6.maijs, Rīga. (1 mutisks referāts).

## Publikācijas

1. Frolovs, G.; Rocens, K; Sliseris, J. 2017. “Optimal design of plates with cell type hollow core” IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 251 (1) doi:10.1088/1757-899X/251/1/012075 (Scopus; Web of Science).
2. Frolovs, G.; Rocens, K; Sliseris, J. “Shear and tensile strength of narrow glued joint depending on the grain direction of plywood plies” Procedia Engineering Vol. 172, (2017), pp. 292–299 ISSN: 1877-7058 doi:10.1016/j.proeng.2017.02.117 (Scopus; Web of Science).
3. Kukule A., Rocens K., Lukasenoks A., Frolovs G. “Change of moisture distribution in ribbed plate with different opposite surface temperatures” Procedia Engineering Vol. 172, (2017), pp. 612–619 ISSN: 1877-7058 doi:10.1016/j.proeng.2017.02.071 (Scopus; Web of Science).
4. Frolovs, G.; Rocens, K; Sliseris, J. “Glued Joint Behavior of Ribs for Wood-Based Composite Plates” IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 96 (1) doi:10.1088/1757-899X/96/1/012048 (Scopus; Web of Science).

5. Frolovs, G.; Rocens, K.; Sliseris, J. "Comparison of a load bearing capacity for composite sandwich plywood plates" Environment. Technology. Resources. Proceedings of the 10th International Scientific and Practical Conference. Volume 1 June 18–20, 2015 Rezekne, Latvia pp. 39–45; ISSN: 1691-5402 doi:10.17770/etr2015vol1.633 (Scopus).
6. Sliseris J., Andrā H., Kabel M, Dix B., Plinke B., Wirjadi O., Frolovs G. "Numerical prediction of the stiffness and strength of medium density fiberboards" Mechanics of Materials ISSN: 0167-6636, Volume 79, December 2014, Pages 73–84 (SNIP 2016 1.546) doi:10.1016/j.mechmat.2014.08.005 (Scopus, Web of Science).
7. Frolovs, G.; Sliseris, J.; Rocens, K.; 2014 Numerical experimental investigations of composite plywood plates with vertically placed waved ribs 4th International Conference Advanced Construction 2014 Proceedings 9–10 October, 2014 Kaunas, Lithuania pp. 71–77; ISSN 2029–1213.
8. Frolovs, G.; Sliseris, J.; Rocens, K.; Goremikins V. 2013. "Optimal design of rational fiber orientation for variable stiffness plywood-plastic plate – Numerical and experimental investigations". International Scientific Conference „Innovative Materials, Structures and Technologies” Proceedings, Nov. 8th 2013 Riga, Latvia. pp. 34–41; ISBN978-9934-10-583-8.
9. Frolovs, G.; Rocens, K.; Sliseris, J. 2013. "Numerical investigations of waved ribs shape's influence on specific stiffness of a plate" International Scientific Conference „Innovative Materials, Structures and Technologies” Proceedings, November 8th 2013, Riga, Latvia. pp 29–32; ISBN 978-9934-10-583-8.
10. Goremikins V.; Rocens K.; Serdjuks D.; Ozolins R.; Frolovs G.; "Hybrid Composite cable for prestressed suspension structure". International Scientific Conference „Innovative Materials, Structures and Technologies” Proceedings, November 8th 2013, Riga, Latvia. pp. 47–51; ISBN 978-9934-10-583-8; ISSN: 2256-0114.
11. Sliseris, J.; Frolovs G.; Rocens, K.; Goremikins, V. 2013. Optimal design of variable stiffness plywood- plastic plate. Procedia Engineering Volume 57 (2013), pp. 1060–1069. ISSN: 1877-7058 doi:10.1016/j.proeng.2013.04.134 (Scopus; Web of Science).
12. Sliseris, J.; Frolovs, G.; Rocens, K. 2013 Optimization of wood fiber orientation angle in outer layers of variable stiffness plywood plate. 4th International Scientific Conference "Civil Engineering'13": Proceedings, Part I, Vol. 4.: Civil Engineering'13, Latvija, Jelgava, 16.-17. maijs, 2013. Jelgava: LLU, 2013, 75.–81. lpp. ISBN9789984480480 ISSN 2255-7776 (Web of Science).

## Originalitāte

Darba oriģinalitāti apliecina:

1. Latvijas Republikas patenti:
  - 1) K. Rocēns, A. Kukule, Ģ. Frolovs, J. Šliseris, Ģ. Bērziņš. "Ribotu plātņu izgatavošanas paņēmiens." LV 14978, 20.06.2015. LV patentu valde oficiālais vēstnesis, 785. lpp.;

- 2) K. Rocēns, Ģ. Frolovs, A. Kukule, J. Šliseris. “Ribotas kompozītplātnes ar centrālo gofrēto slāni uz koksnes bāzes izgatavošanas paņēmieni un iekārta.” LV 15083, 20.12.2015. LV patentu valde oficiālais vēstnesis, 1749. lpp.
2. Izstrādāts komercializācijas pieteikums “Daudzslāņains ribots konstrukciju materiāls ar regulējamu īpatnējo nestspēju”.
3. Starptautiskajā izgudrojumu un inovāciju izstāde MINOX 2016. 1. vieta par izgudrojumu “Daudzslāņains ribots konstrukciju materiāls ar regulējamu īpatnējo nestspēju”.
4. Darba aktualitāti apliecina autora Hirša indekss 3,0 (Scopus).

## Promocijas darba sastāvs un apjoms

Promocijas darbā aplūkotas jauna veida plātnes, kas sastāv no apšuvumiem un šūnu tipa dobā ribojuma, kas izgatavots no saplākšņa vai kāda cita kompozītmateriāla šūnu tipa dobām ribām. Šādām plātnēm ir samazināts materiāla patēriņš un paaugstināta īpatnējā lieces nestspēja (nestspēja uz masas vienību) un citas uzlabotas īpašības, salīdzinot ar citiem tradicionāli lietotiem materiāliem. Salīdzinot ar saplākšni, šo plātņu īpatnējo lieces nestspēju iespējams paaugstināt līdz 60 %.

Promocijas darbā ir piecas nodaļas.

1. nodaļā veikts literatūras apskats, kurā aplūkotas sendvičtipa plātnes, kas darbojas liecē, to klasifikācija, esošās aprēķinu un optimizācijas metodikas, kā arī izgatavošanas tehnoloģijas.
2. nodaļā izstrādāta aprēķinu metodika plātņu ar šūnu tipa dobām ribām lieces nestspējas noteikšanai, izvērtējot izmantoto materiālu stiprības un deformējamības raksturlielumus, t. sk. arī līmes šuves īpašības starp ribojumu un apšuvumiem, kā arī veiktas eksperimentālās pārbaudes liecē aprēķinu metodikas validācijai.
3. nodaļā izstrādāta īpatnējās lieces nestspējas un racionālas struktūras parametru noteikšanas metodika šādām plātnēm definētai nestspējai, kas balstīta uz eksperimentu plānošanas pieeju, ietverot 2. nodaļā izstrādāto aprēķinu metodiku.
4. nodaļā izstrādāti pamatprincipi plātņu ar šūnu tipa dobām ribām izgatavošanai. Nodaļas pirmajā daļā aprakstīts paņēmieni šūnu tipa dobā ribojuma izgatavošanai no saplākšņa loksnēm un distancējošām līstēm, savukārt nodaļas otrajā daļā noteikts optimāls līmēšanas spiediens rezultātu izklīdes samazināšanai.
5. nodaļā izstrādātas rekomendācijas plātņu racionālas struktūras ģeometrisku parametru projektēšanai vadlīniju veidā un dots priekšrocību novērtējums (masas samazinājums, lai nodrošinātu nestspējas vai siltumtehnikās prasības) attiecībā pret saplākšni vai krusteniski līmēto koksni.




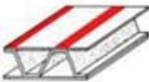
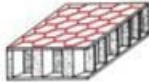
Promocijas darbā ir 76 attēli, 16 tabulu un 165 literatūras atsauces. Darba kopējais apjoms – 103 lappuses un viens pielikums.

## DARBA SATURS

### Koksnes kompozītmateriālu ribotās plātnes

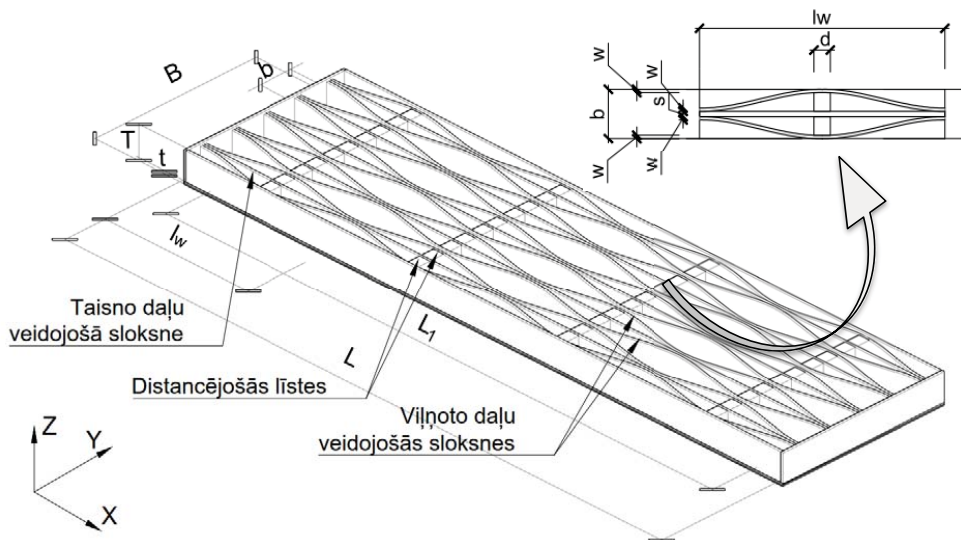
Kokrūpniecība ir viena no nozīmīgākajām tautsaimniecības nozarēm Latvijā – kopējā pievienotā vērtība no iekšzemes kopprodukta ir 3 %, savukārt eksporta vērtības īpatsvars no eksporta kopvērtības sastāda 14,3 % [26]. Kokrūpniecības galvenais uzdevums ir produktivitātes palielināšana, jo produkcijas vērtība uz vienu nodarbināto Baltijas valstīs ir aptuveni piecas reizes mazāka nekā Skandināvijā [107,150]. Patērētāju orientēšanās uz videi draudzīgu materiālu izmantošanu un enerģijas taupīšanu rada priekšnosacījumus plašākai koksnes izmantošanai būvniecībā arī Latvijā.

Promocijas darba 1. nodaļā ir veikts ieskats slāņainu un ribotu konstrukciju klasifikācijā, noteikti esošo konstrukciju trūkumi un iespējamie risinājumi šo problēmu risināšanā. Aplūkots ribotu plātņu iedalījums pēc vidējā slāņa struktūras [133], kas tiek veidota atkarībā no plātnēm definētajām prasībām un tehnoloģiskajām iespējām attiecīgi izmantotajiem materiāliem. Vidējais slānis var tikt veidots, kā: A – homogēns kodols [111,156]; B – punktveida balstījumi [30,89,119,122] C – reģionāls balstījums; D – vienvirziena balstījums [12,13,94]; E – divvirzienu balstījums [63,80,110,115,162] (1. att.).

Sendvičtipa konstrukcijas				
Homogēns apšuvumu balstījums	Strukturēts (nehomogēns) apšuvumu balstījums			
A	B	C	D	E
Homogēns kodols	Punktveida balstījumi	Reģionāls balstījums	Vienvirziena balstījums	Divvirzienu balstījums
				

1. att. Sendvičtipa konstrukciju klasifikācija pēc vidējā slāņa struktūras [36].

Noskaidrots, ka plātnēm ar šūnu tipa dobām ribām ir vērā ņemamas īpašības ne tikai dobā ribojuma garenvirzienā, bet arī ribojuma šķērsvirzienā, tādēļ šādas plātnes pēc iepriekš minētās klasifikācijas būtu pieskaitāmas gadījumam, kas atrodas starp D un E (1. att.). Plātne ar šūnu tipa dobām ribām (2. att.) tiek definēta ar ārējiem ģeometriskajiem izmēriem garumu  $L$  platumu  $B$  un biezumu  $T$ , kā arī apšuvumu (apakšējā  $t_u$  un augšējā  $t_a$ , bet darbā aplūkotās plātnes ar vienādiem apšuvumiem, tāpēc turpmāk izmantots apzīmējums  $t$ ) un šūnu tipa dobā ribojuma izmēriem. Šis ribojums sastāv no savstarpēji salīmētām ribām (atsevišķas ribas platums –  $b$ ), kas sastāv no ribas taisno daļu veidojošās sloksnes (tās biezums –  $s$ ), divām ribas viļņoto daļu veidojošām sloksnēm (katras biezums –  $w$ ) ar noteiktu viļņu skaitu pa plātnes garumu ( $n_w$ ) un distancējošām līstēm (to platums –  $d$ ).



2. att. Plātnes ar šūnu tipa dobām ribām uzbūve (augšējais apšuvums zīmējumā nav parādīts). Visā darbā, ja nav definēts atsevišķi, par standarta gadījumu pieņemti plātnes ribojuma ģeometriskie parametri: ribas platums ( $b$ ) 60 mm (parauga platums 300 mm), četri viļņi 300 mm ( $l_w$ ) garumā, plātnes laidums  $L_l = 1100$  (50 mm pārslaidums uz abām pusēm). Apšuvumi ( $t = 4,0$  mm) ar orientāciju plātnes ribojuma garenvirzienā. Ribas taisno daļu veidojošās sloksnes biezums ( $s = 6,5$  mm) ar ārējo slāņu šķiedru orientāciju plātnes ribojuma garenvirzienā, ribas viļņoto daļu veidojošās sloksnes biezums ( $w = 4,0$  mm) ar ārējo slāņu šķiedru orientāciju plātnes biezuma virzienā un distancējošo listu biezums 20,0 mm ar šķiedru orientāciju plātnes biezuma virzienā.

Noskaidrots, ka līdzīgas plātnes uzrāda augstas stiprības vai stinguma īpašības attiecībā pret plātnes masu [139,140] ar iespēju regulēt materiāla īpašības atkarībā no sloģojuma un balstījuma veida u. c. topoloģijas [136].

Kopējo lieces nestspēju var aprakstīt kā minimālo lieces nestspēju (lieces momentu, ko var uzņemt plātne) no stiprības robežstāvokļa  $LBC_{uls}$  un nestspējas no lietojamības robežstāvokļa  $LBC_{sls}$ .

$$LBC = \min(LBC_{uls}, LBC_{sls}) \quad (1)$$

Īpatnējā lieces nestspēja (vai lieces stingums) izsakāma kā lieces nestspējas (vai lieces stinguma) attiecība pret masas vienību uz kvadrātmetru.

$$LBC_{sp} = \frac{LBC}{AMD} \quad (2)$$

kur

$LBC_{sp}$  – īpatnējā lieces nestspēja,  $N \cdot m^2/kg$ ;

$LBC$  – 1 m platas joslas nestspēja,  $N \cdot m/m$ ;

$AMD$  – plātnes viena kvadrātmetra masa,  $kg/m^2$ .

Šādām plātnēm, pateicoties viļņu formai, ir pastiprināts arī šķērsvirziens, tādēļ plātne darbojas liecē abos virzienos. Atkarībā no ribojuma struktūras var tikt mainīta ribojuma intensitāte un ribojuma viļņu formu (ģeometriju).

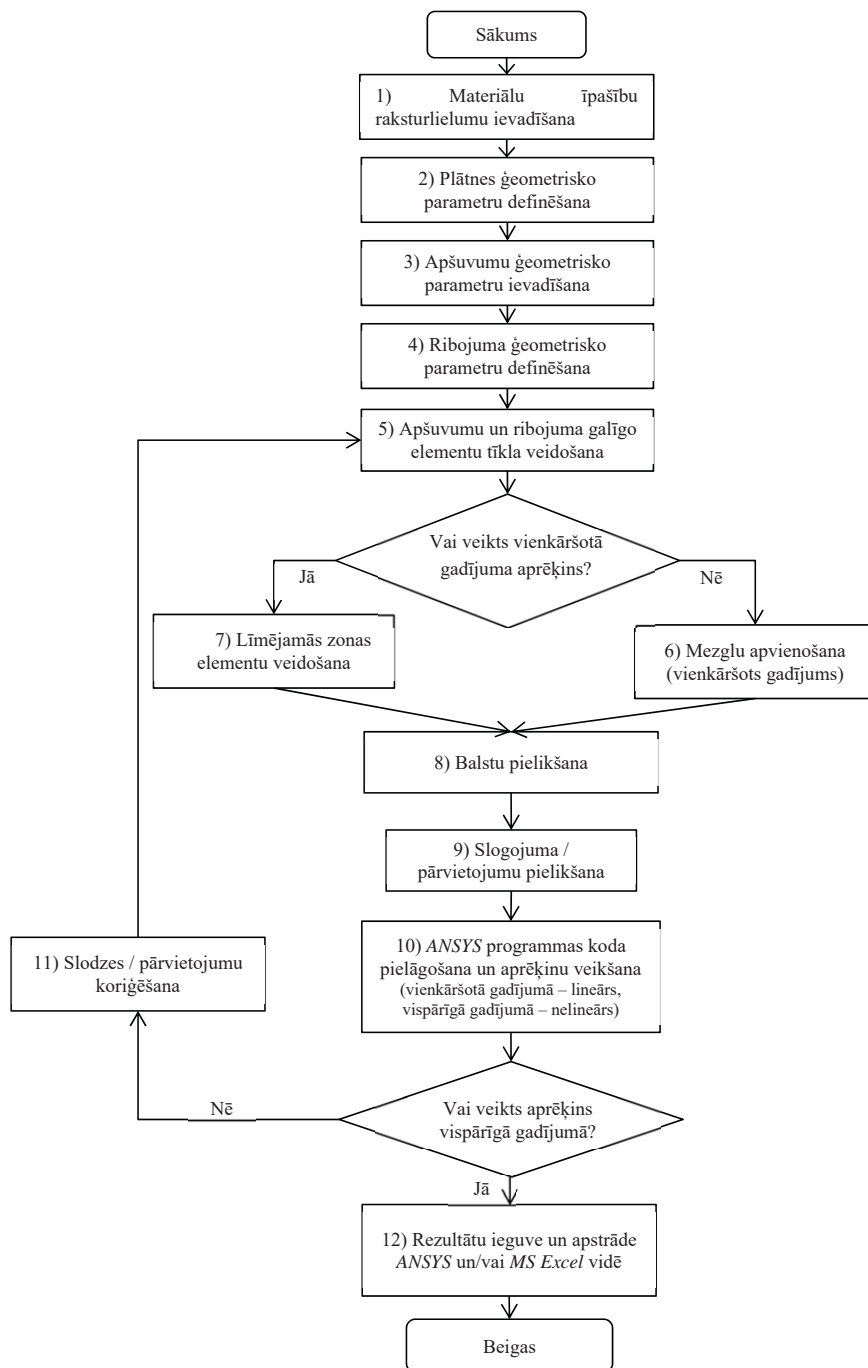
Ribojuma un apšuvumu saskares virsmas var tikt modelētas ar speciāliem saskarnes (*interface*) vai kontaktu (*contact*) elementiem, un kohēzijas zonas materiāla (*CZM*) modeļus var izmantot, lai raksturotu salīmēto virsmu darbību [3]. Līmes šuves atvērums tiek sadalīts normālajā  $\delta_n$  un tangenciālajā  $\delta_t$  komponentē. Tiek definēti arī maksimālie normālspriegumi  $\sigma_{max}$  un maksimālie tangenciālie spriegumi  $\tau_{max}$ . Līmes slāņa īpašības tiek aprakstītas atsevišķi normālās un bīdes komponentēs, kurām katrai piešķirtas eksponenciālas [157] vai bilineāras sakarības [1,65].

Konstrukciju optimizēšanai parasti tiek risināts viens no diviem uzdevumiem – iegūt maksimālo nestspēju pie konstanta biezuma vai arī iegūt minimālo biezumu pie definētās slodzes [14,144], kā optimizējamo parametru izvēloties minimālo masu, tādā veidā iegūstot maksimālo īpatnējo lieces nestspēju. Visas optimizācijas metodes var iedalīt arī pēc mērķa funkcijas: maksimāls stingums; maksimāla stiprība; minimāls svars; minimāla/maksimāla pašsvārstību frekvence; specifiskas vibrāciju īpašības; citu nepieciešamo īpašību optimizēšana [24]. Bieži, risinot kādu problēmu, šīs metodes vispārīgi vienkāršo, ierobežojot mainīgo apgabalu aproksimējamās funkcijas vai veicot kādu citu parametru ierobežošanu vai specificēšanu. Tā rezultātā, lai vienkāršotu optimizēšanas procesu, tiek veidoti speciāli algoritmi konkrētai struktūrai un aplūkotajai problēmai. Aplūkoto plātņu struktūra ļauj veiksmīgi izmantot gradienta metodi [67], kas šajā gadījumā balstīta uz eksperimentu plānošanas pieeju.

## **Plātņu ar šūnu tipa dobām ribām lieces nestspējas aprēķinu metodika**

Plātnes ar šūnu tipa dobām ribām tiek veidotas no taisnām un viļņotas (liektas) formas ribām un saplākšņa, MDF vai kāda cita materiāla apšuvumiem. Aprēķinu metodika tiek veidota kā ievades faila kods *ANSYS ADPL* programmēšanas valodā [3], kurā tiek parametriskā veidā definēta plātnes ģeometrija, robežnosacījumi un mehānisko īpašību raksturotājlīelumi. *ANSYS* galīgo elementu aprēķinu modelis, izmantojot šo kodu, izskaitļo plātnes lieces nestspēju. *ANSYS ADPL* programmā izšķir divus gadījumus – pirmais (vispārējais), kas ievērtē nelineārās līmes šuves īpašības, kas saistītas ar plaisu veidošanos līmes šuvēs un to apkārtņē, un saplākšņa materiāla mehāniskās īpašības, kas saistītas ar sabrukuma kritērijiem plātnes elementos, un otrs (vienkāršots) gadījums, kad plātnes mezgli tiek stingri savienoti savā starpā un sabrukuma kritērijus tiešā veidā neievērtē. Lietojot aprēķinu metodiku, gadījumiem, kad līmes šuves darbs netiek ievērtēts, lineāri elastīgas stadijas robežās lieto vienkāršoto aprēķinu, bet gadījumos, kad jāievērtē līmētā savienojuma uzvedība arī lineāri elastīgo deformāciju robežās, jālieto vispārīgās aprēķinu metodikas pieeja.





3. att. Aprēķinu algoritms.

Plātnes ar šūnu tipa dobām ribām aprēķinu metodikas algoritms (3. att.) sastāv no šādiem galvenajiem etapiem:

1) tiek definēti materiālu īpašību raksturlielumi – elastība moduļi, Puasona koeficienti, bīdes moduļi un materiāla blīvums, kā arī sabrukuma kritēriji stiepē, spiedē un bīdē un to kopdarbības koeficienti; papildus tam atsevišķi tiek definētas stiepes un bīdes īpašības kohēzijas zonas materiāliem;

2) – 4) tiek definēts plātnes garums, platums un biezums un – atkarībā no uzdotajiem ģeometriskajiem parametriem – arī ribojums tā, lai būtu iespējama atsevišķu elementu grupu (apšuvumu, ribojuma, distancējošo līstu) savienošana savā starpā;

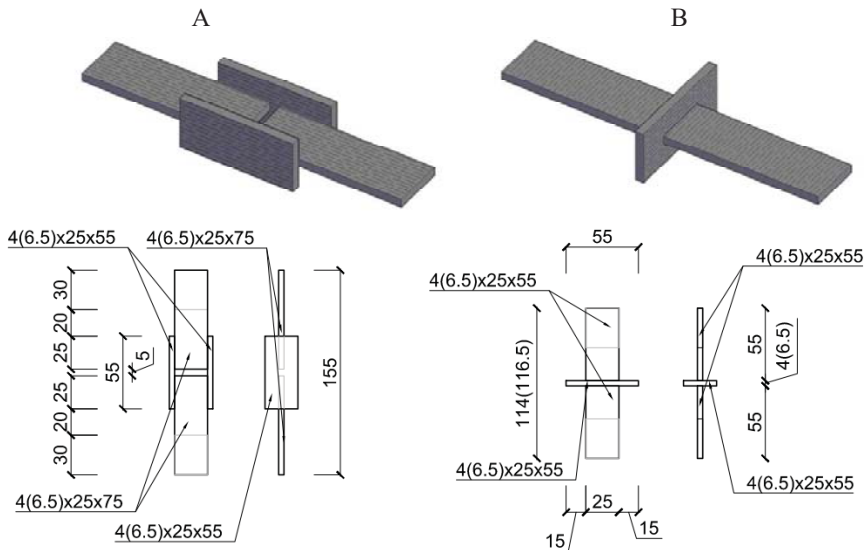
5) – 6) apšuvuma un ribojuma galīgie elementi jāaskaņo savā starpā – apvienojamajiem mezgliem vai mezgliem, starp kuriem tiks veidoti kohēzijas galīgie elementi, šajās zonās jāsakrīt; visu elementu izmēru pieņem ne mazāku par biežākā no plātni veidojošajām komponentēm (apšuvumiem, ribojuma utt.); tiek piešķirts atbilstošais materiāls katram no plātni veidojošajiem elementiem; uzmanība jāpievērš viļņu virsotnēm, kur apšuvumam var rasties nekorekti galīgie elementi, kas var radīt kļūdas aprēķinos; ja nav veikts vienkāršotais lineārais aprēķins, tad apvieno mezglus, kas, veidojot dobās ribas elementus vai apšuvumus, pārklājas;

7) līmes šuvēs ar kohēzijas galīgajiem elementiem (*INTER205*) tiek veidots līmes slānis, izmantojot iepriekš definēto kohēzijas zonas modeli; līmējamās zonas materiāls tiek ģenerēts plātnes ribojuma sadurvietās, ja nepieciešams – arī distancējošo līstu un saplākšņa sadurvietās, kā arī apšuvumu pielīmēšanai pie ribojuma vai arī atsevišķi tikai apšuvuma pielīmēšanai pie ribojuma; līmējums tiek veidots starp divu elementu virsmām un mezgliem, kas cieši pieguļ cits citam, bet savā starpā nav savienoti;

8) – 9) tiek pielikts izvēlētais balstījums, slogojums vai pārvietojums; gadījumā, ja tie tiek pielikti vairākos virzienos, darbību var atkārtot.

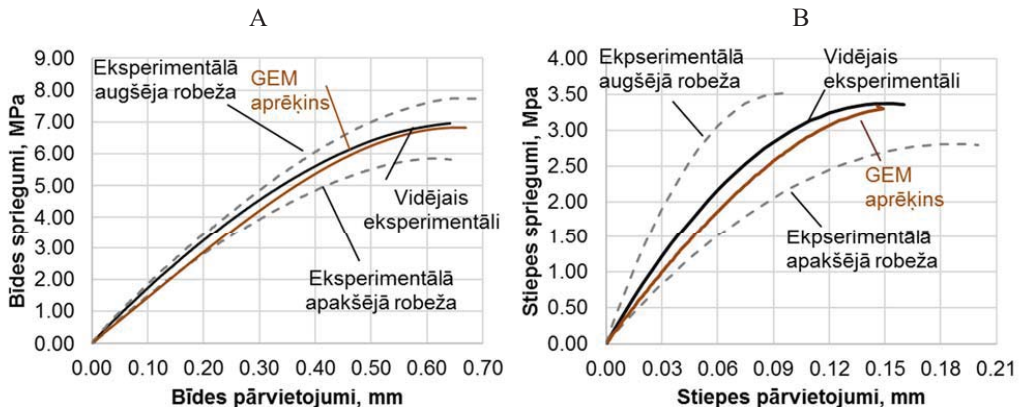
10) – 11) pēc plātnes aprēķina modeļa izveidošanas tiek sarēķināta plātne, un *ANSYS* pēcapstrādes režīmā var iegūt plātnes elementu spriegumstāvokli katrā slodzes solī, kā arī iegūt informāciju par šķēlumiem ar maksimālajiem spriegumiem un maksimālajiem pārvietojumiem grafiskā vai tabulu veidā tālākai datu apstrādei, vai arī koriģē slogojuma līmeni un veic vispārīgā gadījuma aprēķinu, ja tas nav veikts.

Lai nodrošinātu iespēju adekvāti modelēt plātnes struktūru un uzvedību lieces gadījumā atkarībā no nepieciešamās nestspējas, ir jānosaka līmes šuves starp saplākšņa virsmu un malu stiepes un bīdes robežstiprības un robeždeformāciju lielumi dažādiem saplākšņa biežumiem un divām loksnes ārējo lobskaidu šķiedru orientācijām, jo plātnēm ar šūnu tipa dobām ribām tiek veidoti dubult-T savienojumi, kad parasti ribas taisno daļu veidojošās sloksnes ārējo slāņu orientācija ir paralēla līmes šuvei, bet viļņoto daļu veidojošās sloksnes ārējie slāņi perpendikulāri līmētās šuves līnijai. Tika veiktas eksperimentālās pārbaudes aprēķinu modelim nepieciešamo konstanšu noteikšanai. Abos gadījumos (bīdes (4. att. A), stiepes (4. att. B) īpašību noteikšanai) tika izveidoti speciāli paraugi, kas apraksta saplākšņa malas savienojumu ar saplākšņa virsmu



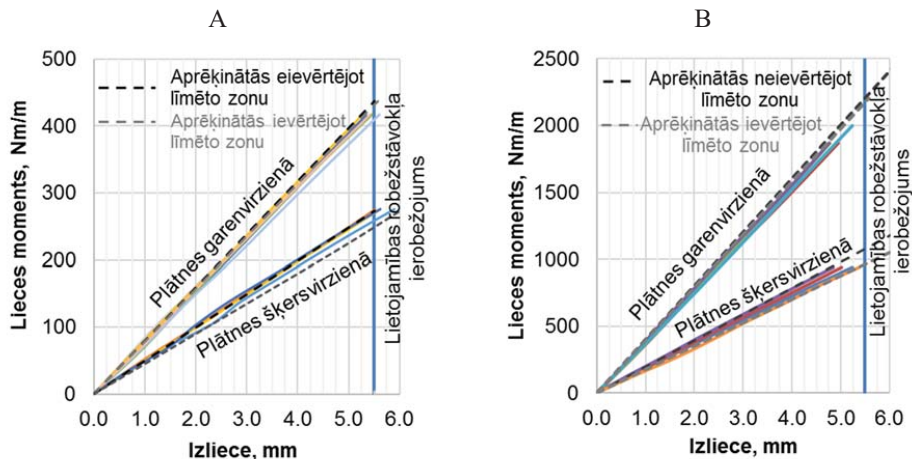
4. att. Speciāli izveidoti paraugi stinguma un nestspējas noteikšanai līmes šuvei starp saplākšņa virsmu un šauro malu. A – paraugs līmes šuves bīdes īpašību noteikšanai, B – paraugs līmes šuves stiepes īpašību noteikšanai.

Eksperimentāli noteikta mitrumizturīgas D3 kategorijas atbilstoši EN 204 PVA līmes savienojuma vidējā bīdes (5. att. A) robežstiprība –  $7,11 \pm 0,12$  MPa (5 % fraktīle bīdes robežstiprībai noteikta 5,33 MPa), vidējais pārvietojums sabrukšanas brīdī –  $0,64 \pm 0,01$  mm. Vidējā stiepes (5. att. B) robežstiprība līmes savienojumam ar saplākšņa virsmu –  $3,39 \pm 0,18$  MPa (5 % fraktīle stiepes robežstiprībai noteikta 2,16 MPa), vidējais pārvietojums sabrukšanas brīdī –  $0,15 \pm 0,1$  mm.



5. att. Līmēto savienojumu spriegumu-pārvietojumu raksturīgās līknes. A – bīdes robežstiprības noteikšanas paraugiem (paraugu sērijai ar 6,5 mm biezu ribas saplākšni un 4,0 mm biezu apšuvumu; abiem ārējo šķiedru orientācija paralēla spēka pielikšanas asij); B – stiepes robežstiprības noteikšanas paraugiem (paraugu sērijai ar 6,5 mm biezu ribas saplākšni un 4,0 mm biezu apšuvumu; abiem ārējo šķiedru orientācija perpendikulāra spēka pielikšanas asij). Rautstītās līnijas norāda uz augšējo un apakšējo eksperimentālo pārbaužu robežām.

Veicot plātņu eksperimentālās pārbaudes četru punktu liecē, vadoties pēc standarta EN 789 [53], noskaidrots, ka aprēķinu rezultāti praktiski sakrīt ar eksperimentāli iegūtajiem. Slogojot gan dobā ribojuma garenvirzienā, gan arī šķērsvirzienā līdz izliecei 1/200 no plātnes laiduma, atšķirība starp analītisko aprēķinu rezultātu ar eksperimentāli iegūtajiem rezultātiem nepārsniedz 15 %.



6. att. Plātņu ar šūnu tipa dobām ribām slodzes-izlieces teorētiskā un eksperimentālās līknes A – plātnēm ar biezumu  $T = 25$  mm; B – plātnēm ar biezumu  $T = 50$  mm.

Izskaitļotie plātņu deformatīvie lielumi atrodas eksperimentāli noteikto variācijas koeficientu (vidēji 5 % garenvirzienam un 9 % šķērsvirzienam) robežās, kas ir zemākas par 10 % un liecina par plātnes deformatīvo īpašību zemo izkliedi. Lieces nestspēja un stingums, slogojot līdz lietojamības robežstāvokļa sasniegšanai, aplūkojami 1. tabulā, bet lieces momenta-izlieces līknes aplūkojamas 6. att. Datu ticamības intervāli aprēķināti ar varbūtību 95 %, pieņemot, ka rezultāti atbilst normālajam sadalījumam.

1. tabula

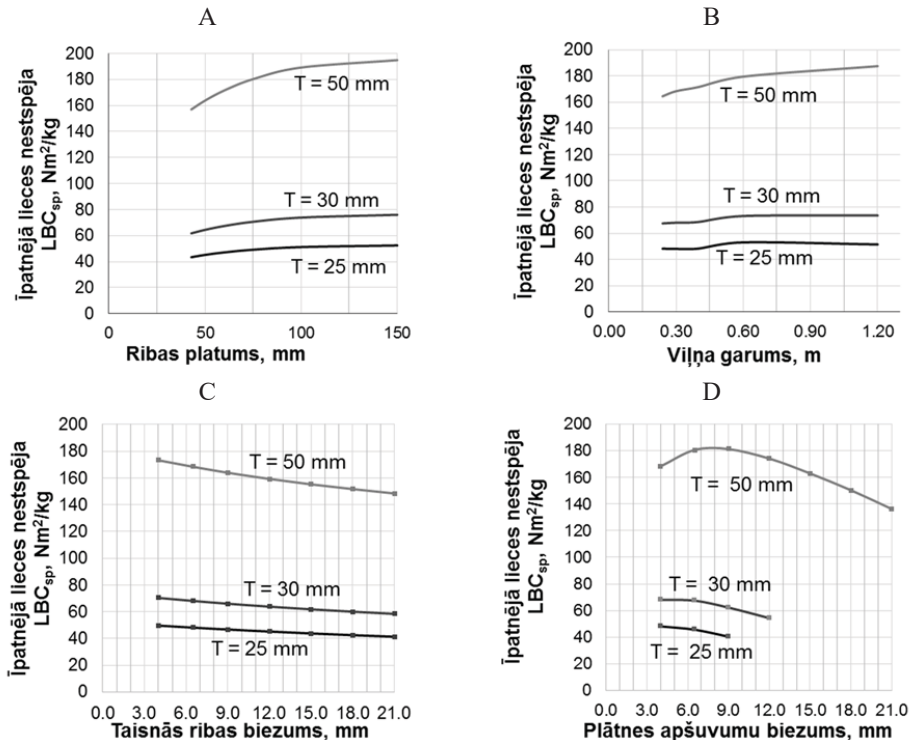
Eksperimentālie rezultāti plātnēm ar šūnu tipa dobām ribām

	Plātnes biezums	Stingums		Nestspēja					
		mm	$\text{kNm}^2/\text{m}$	$\text{kNm}^2/\text{m}$	$\text{Nm}/\text{m}$	$\text{Nm}/\text{m}$	Atšķirība	Standart-novirze	Variācijas koeficients
		Teor.	Eksp.	Teor.	Eksp.	%		%	
Garenvirziens	25	9,38	9,58	413,9	423,0	2,14 %	8,17	1,93	$\pm 6,54$
	50	49,76	48,97	2196,4	2162,1	-1,59%	68,47	3,17	$\pm 54,79$
Šķērsvirziens	25	6,03	5,98	266,1	264,0	-0,78%	11,67	4,42	$\pm 10,23$
	50	21,43	21,76	945,7	960,5	1,54 %	0,95	4,35	$\pm 0,76$

## Plātņu racionālas struktūras un īpatnējās nestspējas aprēķinu metodikas

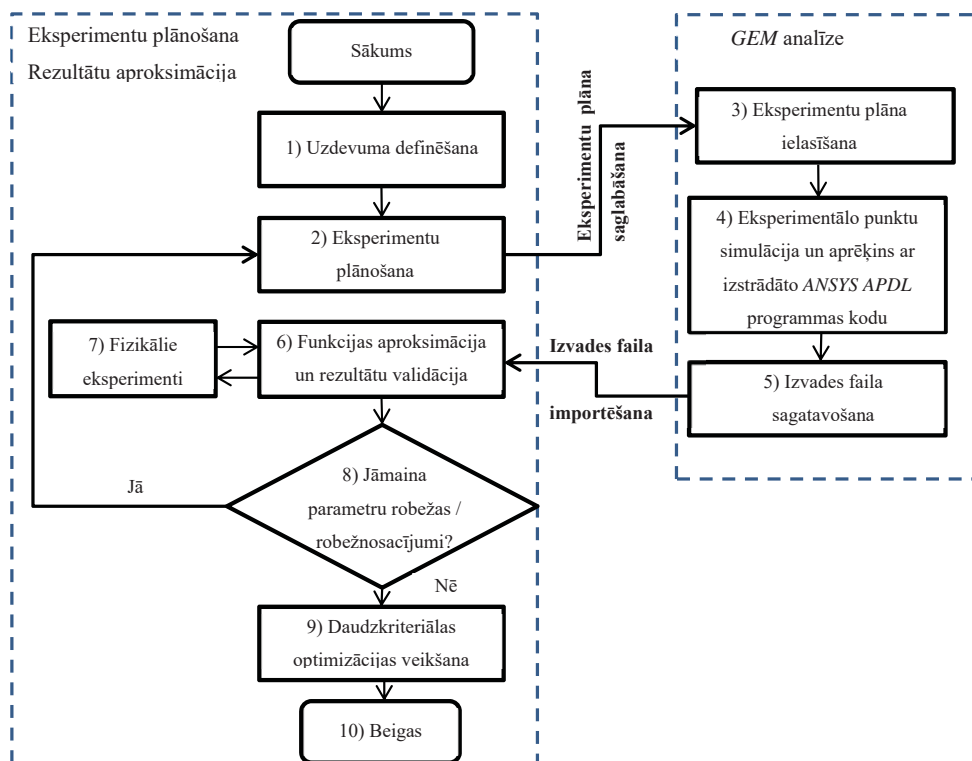
Darbā izstrādāta metodika plātņi veidojošo elementu optimizācijai, izmantojot metamodeļus globālo polinomu aproksimāciju veidā. Sākumā tiek definēta mērķa funkcijas un to maināmie parametri – (skaits, robežas u. c.), kuriem tiek veikta optimizācija. Ja nepieciešams samazināt parametru skaitu, tiek noteikta maināmo parametru ietekme uz mērķa funkcijām, un mazāk būtiskie parametri tiek izslēgti. Atkarībā no šiem datiem tiek veidots eksperimentu plāns un papildus pielāgots ANSYS ADPL programmas kods, kas izstrādāts pēc 2. nodaļā aprakstītās metodikas, izmantojot ANSYS Probabilistic Design funkcijas. Izsaucot šo pielāgoto programmas kodu, eksperimentālajiem punktiem tiek aprēķinātas aproksimētās funkcijas vērtības. Iegūtie rezultāti tiek eksportēti atpakaļ uz eksperimentu plānošanas programmu, ar kuras palīdzību arī definētās funkcijas tiek aproksimētas ar otrās kārtas polinomiem. Šīs funkcijas tiek validētas, pārbaudot to adekvātumu eksperimenta plāna ietvaros un atsevišķos punktos rezultātus salīdzinot ar eksperimentāli iegūtajiem. Izpildoties šīm pārbaudēm var veikt optimizāciju (minimizējot vai maksimizējot) kādai no mērķa funkcijām atkarībā no jauna definētiem parametru vai arī pārējo mērķa funkciju ierobežojumiem.

7. attēlā aplūkota atsevišķo mainīgo ietekme uz plātnes īpatnējo lieces nestspēju. Redzams, ka tā bez plātnes biezuma lielā mērā ir atkarīga arī no apšuvumu biezuma attiecībā pret pārējiem parametriem.



7. att. Īpatnējā lieces nestspēja plātnei ar laidumu 1,1 m un ribu veidojošo elementu biezumu 4,0 mm: A – atkarībā no dobās ribas platuma; B – atkarībā no dobās ribas viļņa garuma; C – atkarībā no taisnās ribas biezuma; D – atkarībā no apšuvumu biezuma.

Izveidots eksperimentu plānošanas pieejas algoritms (8. att.), kura lietošanas gaitā tiek izveidoti: *ANSYS APDL* programmas kods; eksperimentu plāns; eksperimentu plāna atbildes; mērķa funkciju aproksimācijas parametri un/vai optimālie parametri.



8. att. Optimizācijas procesa vienkāršota blokhēma, kas balstīta uz eksperimentu plānošanu (metamodelēšanu) un *ANSYS* galīgo elementu analīzi.

Eksperimentu plānošanas pieeja balstīta uz šādiem etapiem (8. att.):

1) nosaka attiecīgās robežas katram mainīgajam atkarībā no definētā optimizācijas uzdevuma – plātnes ģeometriskajiem izmēriem, apšuvumu un ribojuma ģeometriskajiem un fizikālajiem parametriem, slodžu līmeņiem u. c.;

2) izveido eksperimentu plānu, ņemot vērā mainīgo variēšanas iespējas – to diskretumu, robežas u. tml.; veidojot eksperimentu plānu, jāņem vērā ierobežojumi, kas rodas lietoto materiālu īpašību (piemēram, saplākšņa ražotāja piedāvāto biezumu sortimenta u. c.), praktiski iespējamā dobās ribas viļņoto daļu veidojošās sloksnes izliekuma, kā arī plātnes izmēru dēļ (piemēram, viļņa garums būs atkarīgs no laiduma un viļņu skaita laidumā, bet ribas platums būs atkarīgs no plātnes platuma un ribu skaita plātnes platumā); ja maināmo parametru ir maz (< 5), tad var lietot pilnu faktoru eksperimentu plānu, taču, pieaugot vadāmo faktoru skaitam, eksperimentālo punktu skaits pieaug eksponenciāli; tādā gadījumā vēlams lietot kādu no

literatūrā aplūkotajiem piedāvātajiem eksperimentu plāniem vai arī lietot ģenētiskā algoritma pieeju; eksperimentu plāns tiek saglabāts attiecīgi formatētā teksta failā (\*.txt);

3) – 5) tiek izveidots *ANSYS APDL* programmas kods (pierakstīts \*.txt failā), kas balstās uz 2. nodaļā aprakstīto metodiku; optimizācijai papildus izmantotas *ANSYS Probabilistic Design* funkcijas; tiek definēti optimizējamie parametri, kā arī mērķa funkcijas, kas tiek aproksimētas un tālāk izmantotas optimizācijai vai ierobežojumu definēšanai; *ANSYS* programmas vidē tiek ielasīts izveidotais eksperimentu plāns (ar *response surface simulation* režīmu) un, izmantojot iepriekš izstrādāto metodiku, izrēķina uzdotās mērķa funkciju vērtības;

6) – 8) plātnes ģeometrisko parametru ietekmes noteikšanai uz tās nestspēju un arī pārējiem parametriem izmanto kādu no aproksimācijas programmatūras, šajā gadījumā – *EdaOpt* [9], kas dod iespēju izmantot atbildes virsmas metodi; visbiežāk tiek izmantots 2. kārtas polinoms; izvēloties eksperimentu plānošanu, jāņem vērā mērķa funkciju diapazons; ja šī atšķirība ir liela, tas var radīt palielinātu kļūdas rašanos apakšējā apgabalā, jo, polinomam summējot kvadrāta vērtības, augšējā apgabala kvadrātu ietekme rada lielāku iespaidu uz kopējo kvadrātu summu; tādā veidā iegūstot adekvātu aproksimēto funkciju tikai šajā augšējā apgabalā, bet apakšējā apgabalā rezultāti var ievērojami nobīdīties uz vienu vai otru pusi; atsevišķiem eksperimentālajiem punktiem veikta validācija ar fiziskajiem eksperimentiem, vadoties pēc EN 789 [53], un iegūtās vērtības salīdzinātas ar aproksimācijas paņēmienā iegūtajām;

9) veic atbildes virsmas daudzkriteriālu (piemēram, pie definētas plātnes nestspējas un/vai plātnes biezuma sasniedzot minimālo plātnes masu) optimizāciju, nosakot, kura mērķa funkcija tiks optimizēta, kāds būs optimizējamais lielums, kuri būs maināmie parametri, kādi būs to ierobežojumi; optimizācijai tiek izmantoti iegūtie aproksimācijas vienādojumi, minimizējot vai maksimizējot šīs funkcijas;

10) pēc optimizācijas validācijas veikšanas saglabā optimālo parametru vērtības, un plātni ar pieņemtajiem ģeometriskajiem parametriem izmanto tālākajos inženieraprēķinos vai plātņu izgatavošanas tehnoloģijas risināšanai.

Pēc nebūtisko faktoru atsijāšanas vispārīgā veidā polinoms pierakstāms šādā formā:

$$\begin{aligned} P_i = & b_{i,0} + b_{i,1} \cdot T + b_{i,2} \cdot t + b_{i,3} \cdot b + b_{i,4} \cdot s + b_{i,11} \cdot T \cdot T + \\ & + b_{i,12} \cdot T \cdot t + b_{i,13} \cdot T \cdot b + b_{i,14} \cdot T \cdot s + b_{i,22} \cdot t \cdot t + b_{i,23} \cdot t \cdot b + b_{i,24} \cdot \\ & \cdot t \cdot s + b_{i,33} \cdot b \cdot b + b_{i,34} \cdot b \cdot s + b_{i,44} \cdot s \cdot s, \end{aligned} \quad (3)$$

kur

$P$  – aproksimācijas polinoms vispārīgā veidā;

$b_{ij}$  – polinoma koeficienti, ja  $i = 1$ , tad biežumam 25–50, ja  $i = 2$ , tad

biežumam 50–150, ja  $i = 3$ , tad biežumam 100–200 mm.

$T, t, b, s$  – mainīgie parametri (skatīt 2. att.).

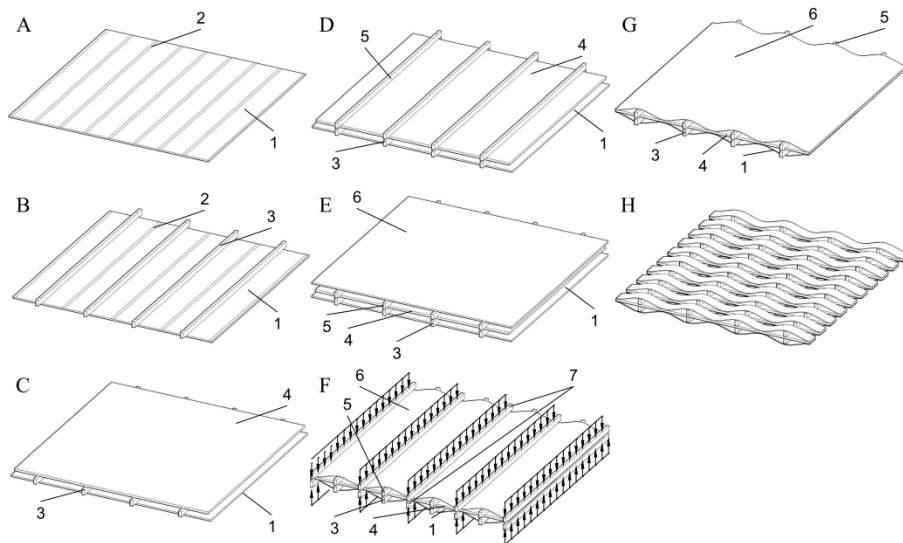
Noteikta lieces nestspējas un īpatnējās lieces nestspējas aproksimācijas globālo otrās pakāpes polinomu koeficientu vērtības. Aplūkotajās robežās pārbaudīts, ka lieces nestspēja pēc lietojamības robežstāvokļa tiek sasniegta vispirms (pēc stiprības robežstāvokļa maksimālā noslodze, sasniedzot lietojamības robežstāvokli, visos aplūkotajos gadījumos nepārsniedz 53 %). Noteiktās nestspējas, stinguma un masas vērtības paver iespējas aproksimēt šīs funkcijas un veikt plātnes struktūras optimizāciju, minimizējot masu pie definētās nestspējas



(vai stinguma) vērtības, nosakot optimālos parametrus un īpatnējās nestspējas (vai stinguma) vērtības.

## Šūnu tipa dobo ribu izgatavošanas paņēmieni un plātņu salīmēšanas pamatprincipi

Izstrādāts paņēmieni šūnu tipa dobo ribojuma izgatavošanai un tehnoloģiskie principi ribojuma iestrādāšanai. Šūnu tipa dobas ribas un apšuvumi var būt izgatavoti no vienādiem vai atšķirīgiem materiāliem, tāpat arī ribojuma elementi (piemēram, ņemot atšķirīgus materiālus, ribas taisno daļu veidojošām sloksnēm, distancējošām līstēm un viļņoto daļu veidojošām sloksnēm). Principa pamatā ir viļņotu sagatavju uz koksnes materiālu bāzes izgatavošanas paņēmieni, kad viļņotās daļas veidojošās sloksnes viļņotā forma tiek iegūta ar distancējošām līstēm, atsevišķās zonās tās salīmējot ar viļņoto daļu veidojošām loksnēm un/vai taisno daļu veidojošām loksnēm. Iegūtās viļņotās sagataves tiek sazāģētas sloksnēs, kuru platums vienāds ar veidojamā ribojuma biezumu, lai galarezultātā iegūtu plātņi ar šūnu tipa dobo ribojumu. Ribojuma izgatavošanai ir raksturīgas operācijas, ar kurām no saplākšņa vai cita materiāla loksnēm tiek iegūta ribojuma sagatave un pēc tam arī ribojums, veicot 9. att. parādītās darbības.



9. att. Šūnu tipa dobo ribu izgatavošanas paņēmieni 1, 6 – saplākšņa loksne viļņotās daļas veidošanai; 2 – uzklātais līmes slānis; 3, 5 – līstes, kuru biezums vienāds ar veidojamā dobuma maksimālo augstumu; 4 – saplākšņa loksne taisnās daļas veidošanai; 7 – pieliktais līmēšanas spiediens.

Plātņu ar šūnu tipa dobas ribām ribojuma iestrāde ietver šādu etapus:

- ārējo apšuvumu uz koksnes bāzes sagādāšanu;
- šūnu tipa dobo ribu, kas iegūtas saskaņā ar izstrādāto paņēmieni, savstarpēju savienošanu blokos, tās savienojot ar līmi viļņu virsotņu zonās;
- solī b) iegūto viļņu bloku savstarpēju savienošanu ar līmi, iegūto dobo ribu struktūru dimensionāli salāgojot ar solī a) izvēlēto apšuvumu gabarītmēriem;

d) solī c) iegūtās dobās ribas struktūras salīmēšanu ar apšuvumiem vienlaikus no abām pusēm vai secīgi no vienas puses un pēc tam no otras puses, izmantojot solī a) minētos ārējos apšuvums uz koksnes bāzes un iedarbojoties ar spiedienu.

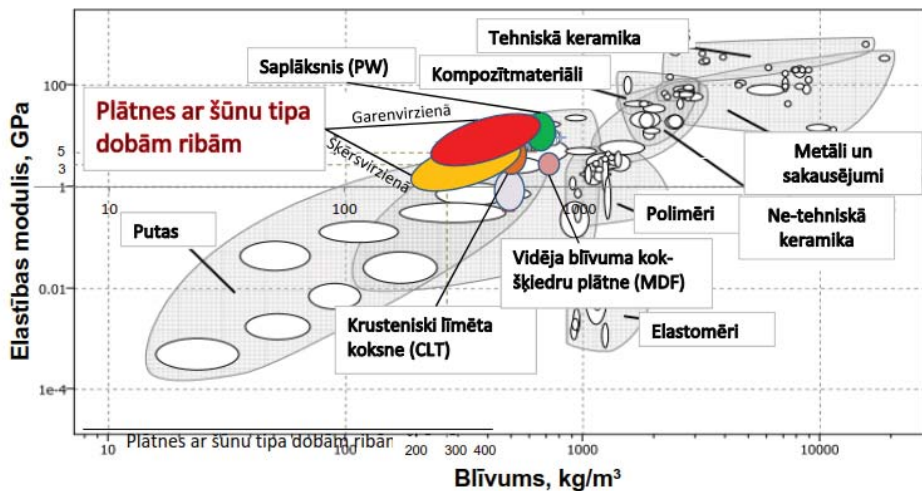
Ja nepieciešams, dobumus starp ribām var aizpildīt ar kādu no beramajiem siltumizolācijas materiāliem, piemēram, putuplasta granulām. Lai nodrošinātu aplūkotās īpašības plātnes šķērsvirzienā, nepieciešama ribojuma salīmēšana savā starpā. Tas iespējams, uzklājot līmes slāni uz dobās ribas viļņoto daļu virsotnēm, bet gadījumā, ja tiek veidoti aizpildīti ribu bloki ar siltumizolāciju, tad uzklājot līmi pa visu salīmējamo ribu bloku sānu virsmām, un saspiežot ribojumu no sāniem.

Ribotām kompozītām plātnēm apšuvuma pielīmēšanai pie ribojuma ir liela ietekme uz plātnes kopējām īpašībām. Līmēšanas procesā ir jānodrošina vienmērīgs spiediens pa plātnes laukumu. Iegūtie eksperimentālie rezultāti rāda, ka ieteicamais līmēšanas spiediens atkarīgs no saplākšņa slāņu skaita perpendikulāri līmes šuvei – jo vairāk šo slāņu, jo ieteicams palielināt spiedienu virs 0,5 MPa augstākas savienojuma stiprības sasniegšanai, savukārt, ja šī attiecība ir mazāka par 1/2, tad spiediens 0,5 MPa būtu rekomendējams. Līmēšanas spiediens ietekmē rezultātu izkliedi – pieaugot spiedienam, variācijas koeficients savienojuma stiprībai samazinās. Palielinot spiedienu no 0,3 MPa līdz 0,5 MPa savienojuma stiprības variācijas koeficients samazinās vidēji par 30 %, bet, palielinot spiedienu no 0,3 MPa līdz 1,0 MPa, tas samazinās vidēji par 50 %.

## **Plātņu ar šūnu tipa dobām ribām projektēšanas rekomendācijas**

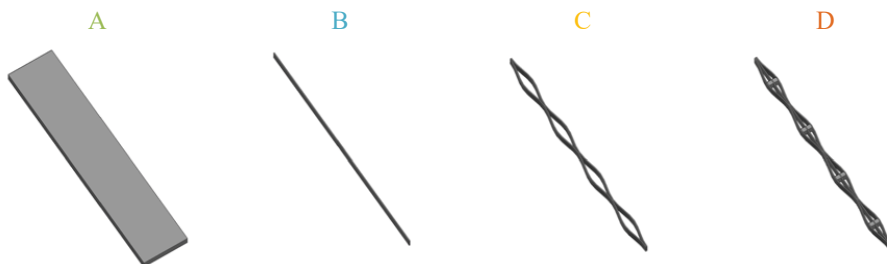
Plātņu projektēšanas rekomendācijas balstās uz iepriekšējās nodaļās aprakstīto metodiku un principu lietošanu. Lietojamības apgabals ir sadalāms vairākās grupās, kurās ir paredzēts plātnes ar šūnu tipa dobām ribām izmantošana kā alternatīvs nesošais elements (pamatā saplākšņa un krusteniski līmētas koksnes aizstāšanai). 5. nodaļā aprakstīta plātņu struktūras projektēšanas secība, lai, izmantojot izstrādātās metodikas, būtu iespējama plātņu racionālu parametru projektēšana. Piemēra veidā veiktas visas algoritmos aprakstītās darbības un parādīti galvenie iegūtie rezultāti iepriekš definētam nestspējas vai stinguma līmenim, kas ļauj aizstāt iepriekš minētos materiālus.

Ja salīdzināšanas nolūkā plātnes ar šūnu tipa dobām ribām uzskata kā homogenizētu materiālu, tad iespējams novērtēt vietu materiālu saimē atkarībā no materiāla elastības moduļa un blīvuma attiecībām, un noskaidrots, ka plātnes uzrāda ievērojami samazinātu blīvumu, salīdzinot ar elastības moduļa vērtību attiecībā pret pārējiem plašāk izmantotajiem koksnes materiāliem (10. att.).



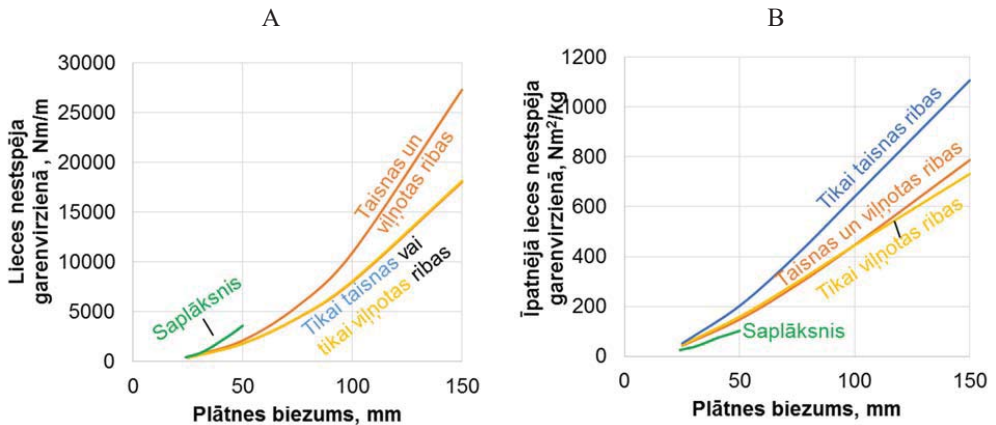
10. att. Plātņu ar šūnu tipa dobām ribām u. c. materiālu blīvuma/elastības moduļa attiecība [27].

Salīdzinātas saplākšņa plātnes, ribotas plātnes ar taisnām ribām, ribotas plātnes ar viļņotām ribām un ribotas plātnes ar šūnu tipa dobām ribām.



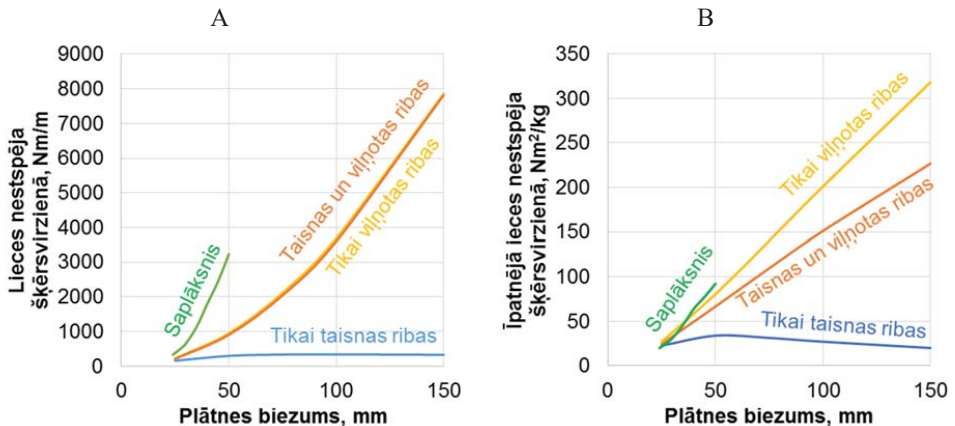
11. att. Aplūkoto plātņu struktūra: A – masīvais saplākšnis; B – plātnes ar taisnām ribām; C – plātnes ar viļņotām ribām; D – plātnes ar šūnu tipa dobām ribām.

Salīdzinot īpatnējo nestspēju atkarībā pēc lietojamības robežstāvokļa, redzams, ka visas aplūkotās ribotās plātnes uzrāda augstāku īpatnējo lieces nestspēju – plātnes ar šūnu tipa dobām ribām un plātnes tikai ar viļņotām ribām uzrāda līdz 50 % lielāku, savukārt plātnes ar taisnām ribām – līdz 100 % lielāku īpatnējo nestspēju, salīdzinot ar saplākšni (12. att.).



12. att. Saplākšņa, plātņu ar taisnām ribām un plātņu ar šūnu tipa dobām ribām salīdzinājums garenvirzienā pēc lietojamības robežstāvokļa. A – pēc lieces nestspējas; B – pēc īpatnējās lieces nestspējas.

Ja salīdzina nestspēju pēc lietojamības robežstāvokļa plātnes šķērsvirzienā, var secināt, ka plātnes tikai ar viļņotām ribām uzrāda labākus rādītājus (par 17 % lielāka īpatnējā nestspēja) attiecībā pret plātnēm ar šūnu tipa dobām ribām, jo ribas taisno daļu veidojošā sloksne ir perpendikulāra laidumam un tādā veidā pa garumu nekādu nestspējas pieaugumu nedod, bet materiālu patēriņu palielina. Savukārt, salīdzinot ar plātnēm ar taisnām ribām, nestspēja šķērsvirzienā ir par 58 % augstāka 50 mm biežām plātnēm, un atšķirība pieaug, palielinot plātnes biežumu (13. att.) un līdz ar to arī biežuma laiduma attiecību. Saplākšnis uzrāda līdzīgu īpatnējās nestspējas pieaugu šķērsvirzienā kā plātnes ar viļņotām ribām.



13. att. Saplākšņa, plātņu ar taisnām ribām un plātņu ar šūnu tipa dobām ribām salīdzinājums šķērsvirzienā pēc lietojamības robežstāvokļa. A – pēc lieces nestspējas; B – pēc īpatnējās lieces nestspējas.

Šajā gadījumā ir veikts salīdzinājums, aizstājot saplākšni ar ribām plātnēm ar šūnu tipa dobām ribām. Aproximācijas vienādojumi izmantoti īpatnējā stinguma noteikšanai un optimizēšanai, lai noteiktu minimālo materiālu patēriņu. Tā kā plātnes biežumam ir vislielākā

ietekme uz tās nestspēju, tad optimizācija galvenokārt tiek veikta, mainot plātnes biežumu, bet, ja tas ir ierobežots, tad arī plātnes apšuvumu biežumu un pēc tam arī taisno ribu biežumu. Veicot aizstāšanu saplāksnim, redzams, ka biežuma pieaugums ir robežās no 11–29 %. Pieaugot saplākšņa, kurš tiek aizstāts, biežumam, nepieciešamais biežuma pieaugums plātnēm ar šūnu tipa dobām ribām palielinās.

1. tabula

Plātnes ar šūnu tipa dobām ribām ekvivalents saplāksnim

Saplākšņa biežums	Stingums	Viena kvadrātmetra masa	Plātņu ar šūnu tipa dobām ribām biežums	Biezuma pieaugums	Plātņu ar šūnu tipa dobām ribām viena kvadrātmetra masa	Viena kvadrātmetra masas samazinājums
mm	N·m <sup>2</sup> /m	kg/m <sup>2</sup>	mm		kg/m <sup>2</sup>	
27	14 473	18,9	30,03	11 %	9,56	– 49 %
30	19 491	21,0	34,19	14 %	10,24	– 51 %
35	32 760	24,5	41,37	18 %	11,51	– 53 %
40	50 996	28,0	48,50	21 %	12,55	– 55 %
45	68 412	31,5	55,67	24 %	13,48	– 57 %
50	89 392	35,0	64,38	29 %	14,22	– 59 %

Pēc analogiska principa rīkojas arī plātnes šķērsvirzienā vai arī kāda cita balstījuma/slogojuma veida gadījumā.

## Secinājumi

Izstrādāta aprēķinu metodika plātņu ar šūnu tipa dobām ribām (turpmāk sauktas vienkārši par plātnēm) lieces nestspējas noteikšanai, aprēķinu metodika īpatnējās lieces nestspējas noteikšanai un optimizēšanai, kā arī pamatprincipi plātņu izgatavošanai un rekomendācijas plātņu projektēšanai.

1. Izstrādāta aprēķinu metodika plātņu lieces nestspējas (lieces moments, ko uzņem plātne, sasniedzot robežstāvokli īslaicīgas, statiskās slodzes gadījumā) noteikšanai ribojuma garenvirzienā un šķērsvirzienā atkarībā no plātnes apšuvumu biezuma, ribojuma elementu formas, saplākšņa stiprības un deformatīvajiem raksturlielumiem, ievērtējot nelineāro līmes šuvju darbību ar saskarnes galīgajiem elementiem, kas ņem vērā plaisu veidošanos līmes slānī. Lai novērtētu līmes šuvju darbību starp ribojumu un saplākšņa apšuvumu virsmām, izstrādāta metodika līmes šuvju īpašību noteikšanai stiepes un bīdes gadījumos, kā rezultātā tika noskaidrotas līmēto savienojumu stiprības un deformējamības vidējā aritmētiskā vērtības ticamības intervāla robežās ar varbūtību 95 %. Darbā izmantota D3 kategorijas (atbilstoši EN 204) PVA līme, presējot bez apsildāmiem plauktiem. Iegūto līmēto savienojumu vidējā bīdes robežstiprība ir  $7,11 \pm 0,12$  MPa, un savienojumu sabrukšanas brīdī to relatīvās deformācijas ir  $1,28 \pm 0,03$  %. Līmēto savienojumu vidējā stiepes robežstiprība ir  $3,39 \pm 0,18$  MPa, vidējais pagarinājums sabrukuma brīdī ir  $0,15 \pm 0,01$  mm.
2. Eksperimentāli noteikta lieces nestspēja 25 mm līdz 150 mm biežām plātnēm četru punktu liecē, slogojot tās līdz lietojamības robežstāvokļa sasniegšanai (no izgatavošanas viedokļa tipiskākajam gadījumam, kam ribas taisno daļu veidojošās sloksnes biezums ir 6,5 mm un viļņotā daļa ar 4 viļņiem pa laidumu, ticamības intervāla robežās ar varbūtību 95 %). Tika noteikts, ka 50 mm biežajām plātnēm lieces nestspēja ribojuma garenvirzienā ir  $2162 \pm 55$  N·m/m, savukārt ribojuma šķērsvirzienā ir  $960 \pm 33$  N·m/m. Atšķirība starp teorētiski un eksperimentāli noteiktajām nestspējas vērtībām nepārsniedza 15 %.
3. Izstrādāta aprēķinu metodika plātņu īpatnējās lieces nestspējas (nestspējas, kas dalīta ar laukuma vienības masu) noteikšanai, kas ietver racionālas ribojuma struktūras parametru projektēšanu, minimizējot materiālu patēriņu. Ribojuma struktūras optimizācija veikta, izmantojot speciāli pielāgotu algoritmu, kas ietver aproksimācijas modeļus globālo polinomu veidā, un 90 % gadījumu atšķirības starp aproksimētajām vērtībām un aprēķinātajām vērtībām nepārsniedz 5 %. Piemēram, lai nodrošinātu tādu pašu lieces nestspēju ribojuma garenvirzienā, kāda ir 30 mm biežam bērza saplākšnim (E klase, EN 636:2012+A1:2015), izmantojot globālos polinomus ar iegūtajiem koeficientiem, noteikts, ka plātņu ar šūnu tipa dobām ribām nepieciešamais biezums ir par 14 % lielāks, turpretī koksnes materiālu patēriņš samazinās par 50 %.
4. Izstrādāti pamatprincipi plātņu izgatavošanai, kas ietver paņēmieni šūnu tipa dobo riba iegūšanai un šī ribojuma iestrādi plātnēs. Ribojuma izgatavošanas paņēmiens balstās uz ribas viļņotās daļas formas iegūšanu un nepieciešamo dobuma platumu nodrošināšanu ar distancējošo listu palīdzību un salīmēšanu viļņu virsotnēs ar taisno daļu veidojošo loksni un/vai distancējošām listēm. Izveidotās viļņotas dobā ribojuma sagataves tiek sazāģētas sloksnēs ar platumu, kas vienāds ar veidojamā ribojuma biezumu, un eksperimentāli

noskaidrots, ka apšuvumu pielīmēšanai, līmēšanas spiediens līmes šuvēs starp ribojumu un apšuvumiem ietekmē līmes slāņa bīdes stiprības un stiepes stiprības vērtību izkliedi: palielinot spiedienu no 0,3 MPa līdz 0,5 MPa, savienojuma stiprības variācijas koeficients samazinās vidēji par 30 %; palielinot spiedienu no 0,3 MPa līdz 1,0 MPa, tas samazinās vidēji par 50 %.

5. Izpētīta plātņu ribojuma struktūra un piedāvātas rekomendācijas vadlīniju veidā to racionālas struktūras ģeometrisku parametru projektēšanai, harmonizējot plātnes pretestības lauku un tās piepūļu lauku. Noteikts, ka ar šādām plātnēm iespējams aizstāt saplāksni vai krusteniski līmēto koksni (*CLT*), sasniedzot ekvivalentu lieces nestspēju, vienlaikus samazinot konstrukcijas masu, turklāt, salīdzinot ar saplāksni, līdz 60 % iespējams palielināt īpatnējo lieces nestspēju.

Apliecinājums iegūto rezultātu aktualitātei un oriģinalitātei ir darba gaitā izstrādātās 12 zinātniskās publikācijas, dalība 11 starptautiskajās zinātniskajās konferencēs, kā arī divi saņemtie Latvijas Republikas patenti.



# DOCTORAL THESIS PROPOSED TO RIGA TECHNICAL UNIVERSITY FOR THE PROMOTION TO THE SCIENTIFIC DEGREE OF DOCTOR OF ENGINEERING SCIENCES

To be granted the scientific degree of Doctor of Engineering Sciences, the present Doctoral Thesis has been submitted for the defence at the open meeting of RTU Promotion Council on 7 September 2018 at the Faculty on Civil Engineering of Riga Technical University, 6A Kipsalas Street, Assembly Hall.

## OFFICIAL REVIEWERS:

Professor *Dr. sc. ing.* Ainārs Paeglītis  
Riga Technical University

Postdoctoral Researcher *Dr. sc. ing.* Ieva Paegle  
Technical University of Denmark, Denmark

Associate Professor *Dr. sc. ing.* Andrejs Pupurs  
Luleå University of Technology, Sweden

## DECLARATION OF ACADEMIC INTEGRITY

I hereby declare that the Doctoral Thesis submitted for the review to Riga Technical University for the promotion to the scientific degree of Doctor of Engineering Sciences is my own. I confirm that this Doctoral Thesis had not been submitted to any other university for the promotion to a scientific degree.

Girts Frolovs ..... (signature)

Date: .....

The Doctoral Thesis has been written in Latvian. It consists of an Introduction; 5 Chapters; Conclusion; 76 figures; 16 tables; the total number of pages is 103 not including appendices. The Bibliography contains 165 titles.

# GENERAL DESCRIPTION OF THE DOCTORAL THESIS

## Topicality of the research and formulation of the problem

The consumption of wood has been steadily increasing over last decades, especially in the production of wood based materials. The significance of rational application of renewable resources (including forest products) is increasing because the forest resources also are limited. One of the most commonly used wood based material is plywood. However, this material also has some imperfections, e.g. when the thickness of plywood increases, the middle layer is not fully used. It has been solved by using sandwich type or ribbed structures, though they also have several imperfections (reduced bending and shear stiffness and strength). These imperfections could be eliminated by using plates with cell type hollow core, which increases specific load bearing capacity (load bearing capacity to the unit mass) in the longitudinal direction as well as in transversal direction, increased number of load transferring paths and reduces deformations caused by the changes of moisture. Several calculation methods are well known for layered materials. However, the methodology of calculations is needed to make adequate detailed calculations by taking into account not only the properties of consisting elements, but also the geometrical parameters of core structure elements, nonlinear glued joint properties, and the failure criteria of used materials. These plates provide the possibility to make rational structure by adapting them for the aim and tasks of use and noticeably reduce material and energy consumption and costs. The technological possibilities of manufacturing (bond pressure, the shape of ribbed structures, etc.) should be taken into account when making rational structure of plate.

## The aim of the research

To develop a method for calculation of plates with cell type hollow core taking into account the geometry of skins and core and the influence of cohesive glued joint on plate's stiffness and strength for the determination of load bearing capacity in bending, and method of calculation for the determination of specific load bearing capacity by using the developed optimization algorithm, as well as to develop the basic principles of manufacturing technology and recommendations for the design of such plates.

## The tasks of the research

1. To develop a calculation method for determining the load bearing capacity in bending in the longitudinal and transversal directions of plates with cell type hollow core taking into account the behaviour of consisting elements and non-linear glued joints of plates.
2. To numerically determine the load bearing capacity in bending of plates with cell type hollow core and experimentally investigate the plates for most typical cases.
3. To develop the methodology of calculations for determination of specific load bearing capacity of plates with cell type hollow core and, using this methodology, to optimize the structure for the given level of load bearing capacity.
4. To develop the fundamental principles of manufacturing plates with cell type hollow core.

5. To develop the recommendations for the design of geometrical parameters of rational structure for plates with cell type hollow core.

### **Scientific novelty of the research**

The method of calculations in finite element program in *ANSYS* parametric design language (*APDL*) that provides the possibility to determine the load bearing capacity in bending taking into account the material properties of consisting elements (skins and core elements) of plates and glued joint properties in their connections has been developed. The behaviour of glued joint between the core and the skins was experimentally determined and the experimental testing of these plates in bending was performed. Using the experimental design approach the method for determination of the specific load bearing capacity in bending was developed and the rational geometrical parameters for given loading and support type were determined. The experimental validation of most important results was implemented and the possibilities of use for determination of rational plywood ribs for required load bearing capacity were shown. Fundamental principles for manufacturing of cell type ribs and plates as well as placement of insulation were developed.

### **Application of the research results**

By using the provided methods it is possible to calculate and determine the stress states in elements consisting of plates and in their connection zones by taking into account the material properties of skins and core elements, including the behaviour of glued joints and geometrical parameters of consisting elements, and to optimize the structure by harmonizing the section stress field with material resistance field of the developed structure. These plates ensure reduced deformations caused by moisture changes, increased number of load transfer paths from the skin to ribbed core, and increased stiffness in transversal direction to ribs, as compared to previously known types of ribs, e.g. straight ribs. The method of production cell type hollow ribs has been developed and possibilities of inserting insulation in ribbed plates have been demonstrated.

### **Methodology of the research**

The calculation method for the determination of load bearing capacity in bending has been developed as an input file code for *ANSYS APDL*, where the geometry of plate, restrictions and mechanical properties of materials have been parametrically defined. By using this code the commercial finite element program *ANSYS* generates the finite element model for calculations and calculates the load bearing capacity in bending and stress-strain field.

The design principles of plate's structure are considered to be the following:

- methodology for determination of plate's load bearing capacity in bending;
- methodology for determination of rational parameters of plate's structure for given load bearing capacity requirements;
- principles for manufacturing plates;

Using this calculation methodology the geometrical parameters of elements of the designed structure have been determined, thus harmonizing the section stress field with material

resistance field of the developed structure. The developed method of calculations provides the possibility to compare the efficiency of various ribs that ensure the defined load bearing capacity and to determine the specific load bearing capacity in bending, which characterizes the consumption of materials for the related type of ribbed core. Design recommendations have been developed based on the achieved results.

The results of calculations have been validated by testing scaled size structure element models (prototypes), guided by EN 789 standard, for ribbed structure element in bending, taking into account the nonlinear behaviour of glued joints.

Bending moment and shear force are the determinant stress resultants for behaviour in bending of such plates. Therefore, the load bearing capacity includes the value of bending moment or shear force that plate can carry by reaching the ultimate or serviceability limit state under static short term loading.

## **Theoretical and methodological basis of the research**

Scientific methods of the following branches of engineering sciences were used in research:

- Construction Science;
- Mechanics of Composite Materials;
- Structural Analysis;
- Wood Science;
- Structural Topology Optimization;

## **Scope of the study**

The developed plates are rational only for the used load combinations and support types. The provided method of calculations is valid when the stresses in elements of plates do not exceed the design resistance or displacements, which are limited with serviceability limit state (SLS), if it is not given different, then up to deflection 1/200 of the span of plate. The calculations and experimental investigations have been done by using static, short term loading. The investigations have been done for the plates with thicknesses from 25 to 200 mm.

## **Results presented for the defense**

- Methodology for the determination of load bearing capacity in bending and experimental validation for plates with cell type hollow core in longitudinal and transversal direction of ribs depending on geometrical parameters of skins and core taking into account the non-linear behaviour of glued joints.
- Methodology for the determination of specific load bearing capacity and for determination of rational parameters of plate's structure.
- Basic principles of the method and equipment for manufacturing plates with cell type hollow core.
- Recommendations for design and manufacturing of plates with cell type hollow core.

## **Approbation of the results**

The results of the Thesis have been presented and discussed at 11 international scientific conferences. The main results have been published in 12 scientific publications, including 7 publications indexed in Scopus data basis.

### **List of international conferences**

1. 3rd International Scientific Conference “Innovative Materials, Structures and Technologies”, 27–29 September 2017, Riga, Latvia (oral presentation).
2. Riga Technical University 57th International Scientific Conference. State research programm IMATEH session, 14–18 October 2016, Riga, Latvia (oral presentation).
3. 5th International Conference “Advanced Construction” 6–7 October 2016, Kaunas, Lithuania (poster presentation).
4. 12th International Conference “Modern Building Materials, Structures and Techniques 2016” 26–27 May 2016, Vilnius, Lithuania (oral presentation and poster presentation).
5. 2nd International Scientific Conference “Innovative Materials, Structures and Technologies”, 30 September– 2 October 2015, Riga, Latvia (oral presentation).
6. 10th International Scientific and Practical Conference “Environment. Technology. Resources”, 18–20 June 2015, Rezekne, Latvia (oral presentation).
7. 4th International Conference “Advanced Construction”, 9–10 October 2014, Kaunas, Lithuania (oral presentation).
8. International Scientific Conference “Innovative Materials, Structures and Technologies”, 8 November 2013, Riga, Latvia (2 oral presentations and a poster presentation).
9. Riga Technical University 54th International Scientific Conference”, 14–16 October 2013, Riga, Latvia (oral presentation).
10. The XVIII International Conference “Mechanics of Composite Materials”, 2–6 June 2014, Jurmala, Latvia (1 oral presentation and participation in preparation of oral presentation).
11. 4th International Scientific Conference "Civil Engineering'13", 16–17 May 2013, Jelgava, Latvia (oral presentation).
12. Riga Technical University Student Scientific and Technical Conference, 6 May 2013, Riga, Latvia (oral presentation).

### **List of scientific publications on the subject of the Doctoral Thesis**

1. Frolovs, G., Rocens, K., Sliseris, J. 2017. “Optimal design of plates with cell type hollow core”, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 251(1), doi:10.1088/1757-899X/251/1/012075 (indexed in Scopus and Web of Science).
2. Frolovs, G., Rocens, K., Sliseris, J. “Shear and tensile strength of narrow glued joint depending on the grain direction of plywood plies”, Procedia Engineering, Vol. 172, (2017), pp. 292–299, ISSN: 1877-7058, doi:10.1016/j.proeng.2017.02.117 (Indexed in Scopus and Web of Science).

3. Kukule, A., Rocens, K., Lukasenoks, A., Frolovs, G. "Change of moisture distribution in ribbed plate with different opposite surface temperatures", *Procedia Engineering*, Vol. 172, (2017), pp. 612–619, ISSN: 1877-7058, doi:10.1016/j.proeng.2017.02.071 (Indexed in Scopus and Web of Science).
4. Frolovs, G., Rocens, K., Sliseris, J. "Glued Joint Behavior of Ribs for Wood-Based Composite Plates", *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 96(1), doi:10.1088/1757-899X/96/1/012048 (Indexed in Scopus and Web of Science).
5. Frolovs, G., Rocens, K., Sliseris, J. "Comparison of a load bearing capacity for composite sandwich plywood plates", *Environment. Technology. Resources. Proceedings of the 10th International Scientific and Practical Conference*. Volume 1, 18–20 June 2015, Rezekne, Latvia, pp. 39–45, ISSN: 1691-5402, doi:10.17770/etr2015vol1.633 (Indexed in Scopus).
6. Sliseris, J., Andrā, H., Kabel, M., Dix, B., Plinke, B., Wirjadi, O., Frolovs, G. "Numerical prediction of the stiffness and strength of medium density fiberboards", *Mechanics of Materials*, ISSN: 0167-6636, Volume 79, December 2014, pp. 73–84 (SNIP 2016 1.546), doi:10.1016/j.mechmat.2014.08.005 (Indexed in Scopus and Web of Science).
7. Frolovs, G., Sliseris, J., Rocens, K.. Numerical experimental investigations of composite plywood plates with vertically placed waved ribs. 4th International Conference on Advanced Construction, Proceedings 9–10 October, 2014 Kaunas, Lithuania pp. 71–77; ISSN: 2029-1213.
8. Frolovs, G., Sliseris, J., Rocens, K., Goremikins, V. "Optimal design of rational fiber orientation for variable stiffness plywood-plastic plate – numerical and experimental investigations". *International Scientific Conference „Innovative Materials, Structures and Technologies”*, Proceedings, 8 November 2013, Riga, Latvia, pp. 34–41, ISBN978-9934-10-583-8.
9. Frolovs, G., Rocens, K., Sliseris, J. "Numerical investigations of waved ribs shape's influence on specific stiffness of a plate". *International Scientific Conference “Innovative Materials, Structures and Technologies”*, Proceedings, 8 November 2013, Riga, Latvia. pp. 29–32, ISBN 978-9934-10-583-8.
10. Goremikins, V., Rocens, K., Serdjuks, D., Ozolins, R., Frolovs, G. "Hybrid Composite cable for prestressed suspension structure". *International Scientific Conference “Innovative Materials, Structures and Technologies”*, Proceedings, 8 November 2013, Riga, Latvia. pp. 47–51, ISBN 978-9934-10-583-8, ISSN: 2256-0114.
11. Sliseris, J., Frolovs, G., Rocens, K., Goremikins, V. Optimal design of variable stiffness plywood- plastic plate. *Procedia Engineering*, Volume 57 (2013), pp. 1060–1069, ISSN: 1877-7058, doi:10.1016/j.proeng.2013.04.134 (Indexed in Scopus and Web of Science).
12. Sliseris, J., Frolovs, G., Rocens, K. Optimization of wood fiber orientation angle in outer layers of variable stiffness plywood plate. 4th International Scientific Conference "Civil Engineering'13": Proceedings, Part I, Vol. 4.: Civil Engineering'13, Latvija, Jelgava, 16–17 May 2013, Jelgava: LLU, pp. 75–81, ISBN: 9789984480480, ISSN: 2255-7776 (Indexed in Web of Science).

## **Originality of the research**

The originality of the Thesis is approved by:

1. Latvian patents:
  - 1) K. Rocens, G. Frolovs, A. Kukule, J. Sliseris “Method and equipment of production for ribbed composite plate with goffered wood-based core”, LV 15083, The Official Gazette of the Patent Office of the Republic of Latvia, 20.12.2015, pp. 1749;
  - 2) K. Rocens, A. Kukule, G. Frolovs, J. Sliseris, G. Berzins “Method for producing ribbed plates”, LV 14979, The Official Gazette of the Patent Office of the Republic of Latvia, 20.06.2015., pp. 785.
2. Developed innovation application “Ribbed Plywood Panels with Adjustable Specific Load-Bearing Capacity”;
3. The 1st Prize won at the by International Invention and Innovation Exhibition MINOX 2016 with invention “Ribbed Plywood Panels with Adjustable Specific Load-Bearing Capacity”.

The topicality of the Thesis is approved by author’s h-index 3.0 (Scopus).

## **Structure and contents of the Doctoral Thesis**

The thesis is based on a research on new composite sandwich plates that consist of skins and a cell type hollow core, which is made of cell type hollow ribs of plywood or another composite. Such plates provide reduced material consumption and increased specific load bearing capacity (load bearing capacity of unit mass) and other improved properties as compared to the traditionally used materials. Specific load bearing capacity of these plates in bending can be increased up to 60 % if compared to plywood.

The Thesis consists of 5 chapters.

The first chapter presents a literature review on the sandwich type plates subjected to bending, their classification, existing methodology of calculations and optimization, as well as manufacturing technologies.

The methodology for calculation of plate’s load bearing capacity in bending, taking into account the characteristics of strength and deformability of core and skins, including properties of glued joint between the core and the skins, has been developed and the experimental investigations for validation of the developed methodology has been done in the second chapter.

The methodology for determination of the specific load bearing capacity for these plates in bending and rational parameters for given load bearing capacity have been developed in the third chapter, which is based on experimental design approach and optimization algorithm using the methodology developed in the second chapter.

The fourth chapter presents the basic principles of manufacturing plates with cell type hollow core. The manufacturing of cell type ribs from plywood sheets and the distancing laths have been described in the first part of the fourth chapter and the estimation of optimal bond



pressure to reduce the dispersion of results have been determined in the second part of the fourth chapter.

Recommendations for rational structure design of plate's geometrical parameters have been provided as guidelines, and the advantages (reduction of mass or total thickness of structure to fulfil the load bearing and insulation requirements) in comparison to plywood and CLT plates are shown in the fifth chapter.

The Thesis includes 76 figures and 16 tables. The total volume of the thesis is 103 pages. The Bibliography contains 165 sources.

# CONTENTS OF THE DOCTORAL THESIS

## Ribbed plates of wood composites

Wood industry is one of the most important industries of Latvian national economy – its total added value is 3 % of gross domestic product, but the export value proportion is about 14.3 % [26]. One of the most important tasks is to increase the efficiency because the value of production to one employee is 5 times smaller than it is in Scandinavia [107,150]. The consumer orientation to use environment friendly materials and energy saving creates the preconditions for wider use of wood in buildings also in Latvia.

In the first chapter of the Doctoral Thesis is reviewing the layered and ribbed structures and giving their classification, as well as determining the disadvantages of the existing structures and possible solutions. The classification depending on middle layer structure [133] has been done, that is made depending on requirements and technological possibilities of used materials. The middle core could be made as: A – homogeny core [111,156]; B – point supports [30,89,119,122]; C – regional support; D – unidirectional support [12,13,94]; E – bidirectional support [63,80,110,115,162], (Fig. 1).


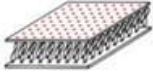



Sandwich structures				
Homogenic support	Structured (non homogenic) support			
A	B	C	D	E
Homogenic core	Point support	Regional support	Unidirectional support	Bidirectional support
				

Fig. 1. Classification of sandwich type structures depending on the core structure [36].

It has been determined that plates with cell type hollow core have noticeable properties not only in longitudinal direction of ribbed core but also in the transversal direction of ribbed core, therefore these plates could be classified between case D and case E in Fig. 1.

A plate with cell type hollow core (Fig. 2) is defined with external dimensions: length  $L$ , width  $B$ , and thickness  $T$ , and thicknesses of skins (the thickness of the bottom skin  $t_b$  and the top skin  $t_a$ , since within the framework of the Thesis both thicknesses are assumed to be equal, the thickness of the skins is defined as  $t$  and the dimensions of cell type hollow core. This core consists of glued ribs (thickness of rib  $b$ ), which consists of straight rib part (with thickness  $s$ ), two waved rib parts (thickness of each  $w$ ) with defined number of waves along the span, and the distancing laths (with width  $d$ ).

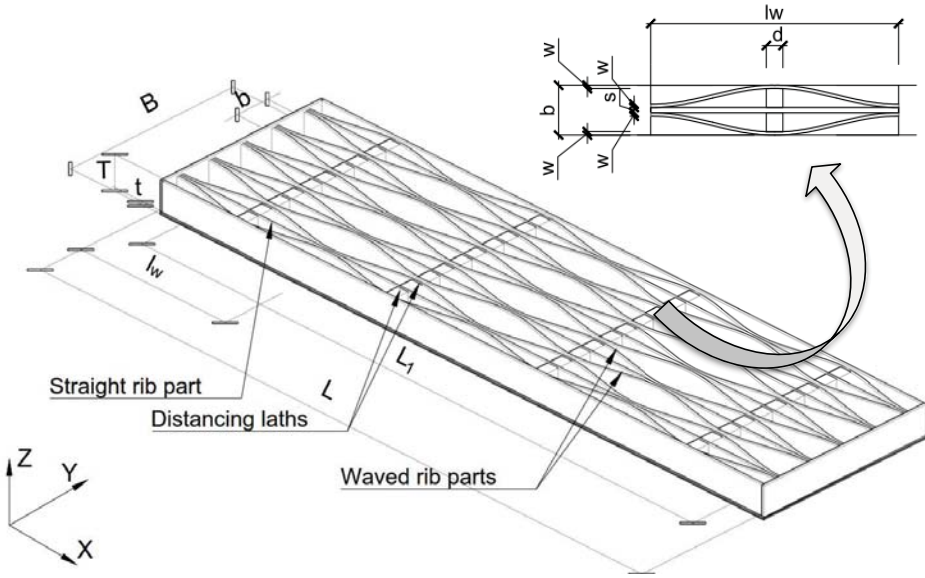


Fig. 2. Structure of plates with cell type hollow core (top skin is not showed). If it is not defined differently, for the standard case the following geometrical parameters have been assumed – width of ribs  $b = 60$  mm (width of plate  $B = 300$  mm, 4 waves along the span with length  $l_w = 300$  mm each that makes total length of plate 1200 mm with the distance between supports 1100 mm. Skins ( $t = 4.0$  mm) with orientation in the direction of the longitudinal direction of ribs, thickness of straight rib part with a thickness of  $s = 6.5$  mm with the direction of outer fibres in longitudinal direction of ribs, waved rib part with thickness of  $w = 4.0$  mm and the direction of outer fibres in the direction of the thickness of plate and the distancing laths with the thickness of  $d = 20.0$  mm and the fibre direction through the thickness of plate.

It has been determined that similar plates show high strength or stiffness properties relating to the mass of plates [139,140] with the possibility to tailor the material properties depending on the type of loading and supports, and other topology [136].

The total load bearing capacity in bending (bending moment that plate is able to carry) could be assumed as minimal load bearing capacity from ultimate limit state  $LBC_{uls}$  and serviceability limit state  $LBC_{sls}$ .

$$LBC = \min(LBC_{uls}, LBC_{sls}) \quad (1)$$

Specific load bearing capacity in bending (or specific bending stiffness) could be written as a ratio between load bearing capacity in bending (or bending stiffness) and area mass density:

$$LBC_{sp} = \frac{LBC}{AMD} \quad (2)$$

where

$LBC_{sp}$  specific load bearing capacity,  $N \cdot m^3/(kg)$ ;

$LBC$  load bearing capacity of lane with the width of 1 m,  $N \cdot m^2/m$ ;

$AMD$  area mass density,  $kg/m^2$ .

In such plates, due to the shape of waves, ribs strengthen also the transversal direction, therefore these plates have considerable bending properties in both directions. It is possible to tailor and adapt the intensity and shape (geometry) of waved rib part.

The connecting surfaces of core and skins could be modelled with special *interface* or *contact* elements. The cohesive zone material (*CZM*) models could be used to characterize the behaviour of glued surfaces [3]. In calculations the corresponding interfacial separation  $\delta$  (displacement jump across the interface) is defined by division in normal  $\delta_n$  and tangential (shear)  $\delta_t$  separation. The ultimate normal  $\sigma_{\max}$  and ultimate tangential stresses  $\tau_{\max}$  have been defined. The properties should be defined separately – normal and shear components, and each of them have exponential [157] or bilinear properties [1,65].

For the optimization of constructions one of the two tasks should be solved – either maximal load bearing capacity at constant thickness or minimal thickness at given loading level [14,144], has to be obtained, and as the parameter for optimization the minimal mass is chosen, thereby achieving the maximal specific load bearing capacity. All methods of optimization could be classified depending on the objective function: maximal stiffness, maximal strength, minimal mass, minimal/maximal self-frequency, specific properties of vibrations, or optimization of other required properties. General simplification is required to solve the problem by limiting the region of variables, approximation functions, or by limiting or specifying other parameters. As a result, in order to simplify the process of optimization, special adapted algorithms should be created for the specific structure or considered problem. The structure of plates allows using the gradient method successfully [67], in this case it is based on experimental design approach.

## **The methodology for calculation of plate's load bearing capacity in bending**

Plates with cell type hollow core are made of straight and waved ribs and skins of plywood, *MDF* or other material. The method of calculations is developed as an input file code in *ANSYS* parametric design language [3], where the geometry, limitations and mechanic properties have been defined in parametric form. *ANSYS APDL* finite element model calculates the load bearing capacity in bending by using this code. *ANSYS APDL* calculates two cases – the first (general) case that takes into account the nonlinear glued joint properties with crack development in these joints and the failure criteria for plate elements, and the second case when the joints of the plate's elements are merged and the failure criteria are not directly taken into account. For the cases when the behaviour of glued joint should not be taken into account in the linear elastic stage, simplified case could be used, but if the behaviour of glued joint part is taken into account in linear elastic stage, the first (general) approach should be used.

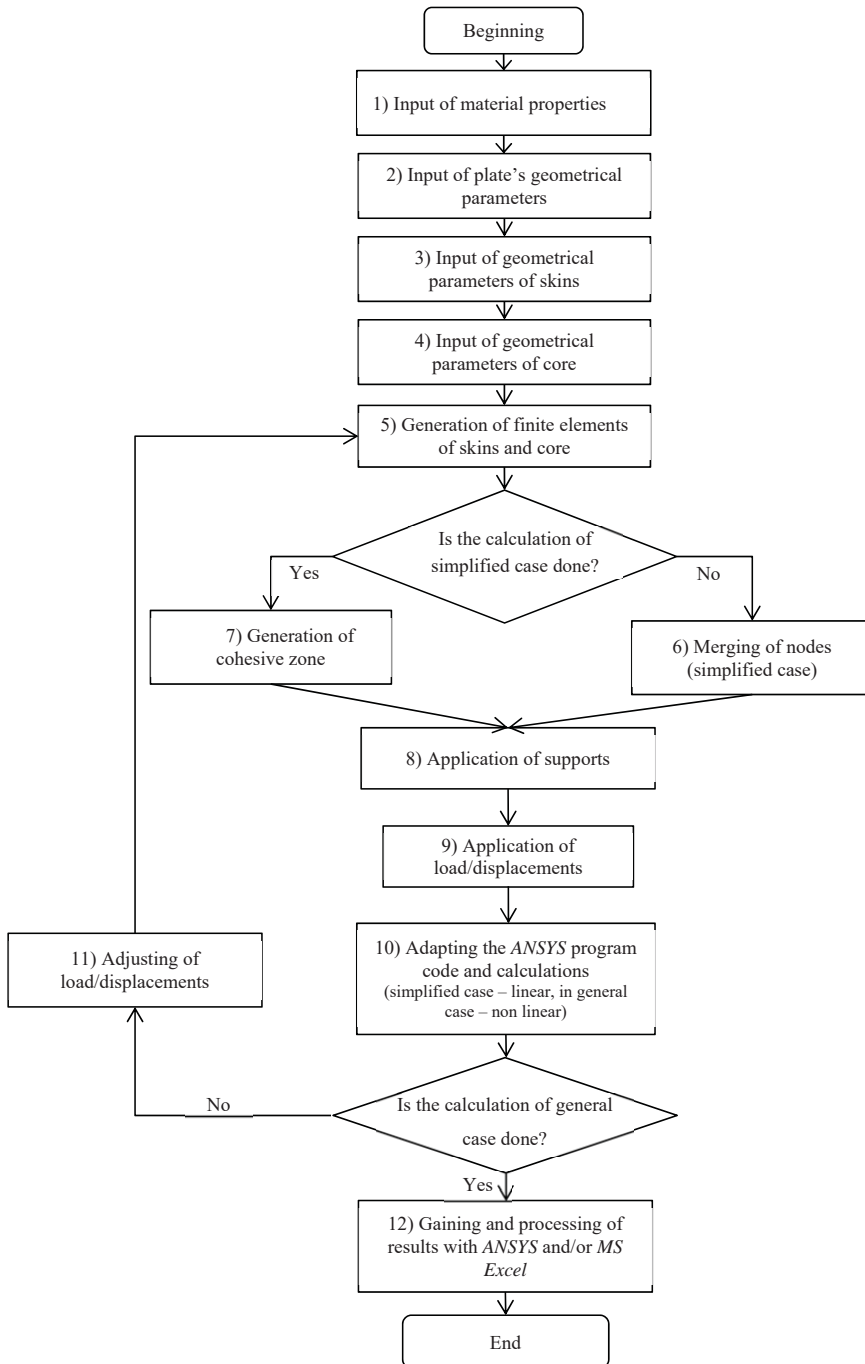


Fig. 3. Algorithm for calculations.

The algorithm for the method of calculations (Fig. 3) for the plates with cell type hollow core consists of the following main phases.

1) Definition of the characteristics of material properties – modulus of elasticity, Poisson's ratio, shear stiffness, density of material as well as failure criteria in tension, compression, shear and the coupling coefficients. Additionally, the tensile and shear properties of cohesive zone materials were separately defined.

2) – 4) The definition of the length, width and thickness of a plate and core elements dependent on geometrical parameters of a plate so that it is possible to connect separate parts together (skins, core elements and distancing laths).

5) – 6) The finite elements of skins and core should be matched to each other – the joints that should be merged or the joints, which will be used for connection of cohesive finite elements in these zones, should coincide. The size of elements should not be smaller than the maximal thickness of plate's consisting elements (skins, core elements etc.). Then the related material properties should be applied to each of the plate's consisting elements. Special attention should be paid to the peaks of waves, where incorrect finite elements may appear in the skin, which could lead to significant mistakes in modelling and results. If the simplified nonlinear calculations are not made, the joints making core or skin elements that coincide should be merged.

7) The glued layer is made in glue lines with cohesive finite elements (*INTER 205*) by applying predefined model of cohesive zone. The cohesive zone material is generated in the connection points of closely lying ribs and the connections between the consisting elements within the ribs, as well as for the skin to core glued joints or only the skin to core glued joint is modelled. The *CZM* between two element surfaces and joints that coincide but do not merge.

8) – 9) Application of chosen supports, loading or displacements, in case they are applied in the multiple directions, could be repeated.

10) – 11) After the generation and calculation of the plate's model, in *ANSYS* post processing the stress state in each load step can be acquired as well as the information about the maximal stresses or displacements can be gathered in graphical or table view for the data processing. Corrections in the load level can be made and it is possible to get back to the general case calculation if it has not been performed.

To provide a possibility of adequate design of plate's structure and behaviour in bending depending on required load bearing capacity, the ultimate strength and ultimate deformations have been determined for various thicknesses of plywood and fibre orientations of outer layers.

For the plates with cell type hollow core double T joints are made where the outer fibre direction of straight rib part is parallel to the glued joint, but the outer fibre direction of waved rib part is perpendicular to the glued joint line. The experimental investigations were made to determinate the required input data for the calculation model. In both cases (to determinate the tension and shear properties) special specimens were made that describes the shear (Fig. 4 A) and tension (Fig. 4 B) behaviour of glued joint between the plywood surface and plywood edge.

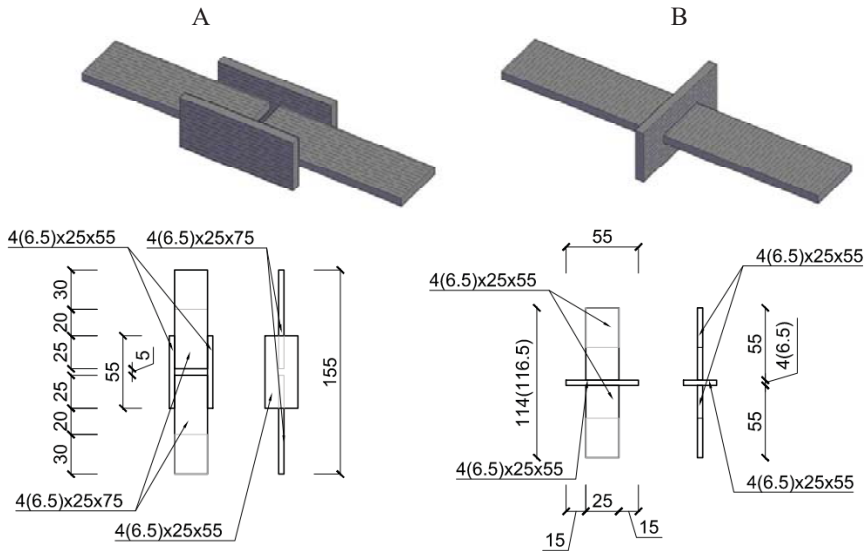


Fig. 4. Specimens for determination of ultimate shear and tensile properties of edge to surface glued joint: A – specimen for determination of glued joint shear properties; B – specimen for determination of glued joint tensile properties.

According to EN 204 water resistant D3 category PVA glued joint was experimentally investigated. It was determined that mean ultimate shear strength (Fig. 4 A) was  $7.11 \pm 0.12$  MPa (5 % fractile was 5.33 MPa), mean displacement at fracture was  $0.64 \pm 0.01$  mm. The mean tensile strength for plywood edge to surface was  $3.39 \pm 0.18$  MPa (5 % fractile was 2.16 MPa) and the mean displacement at fracture was 0.15 mm.

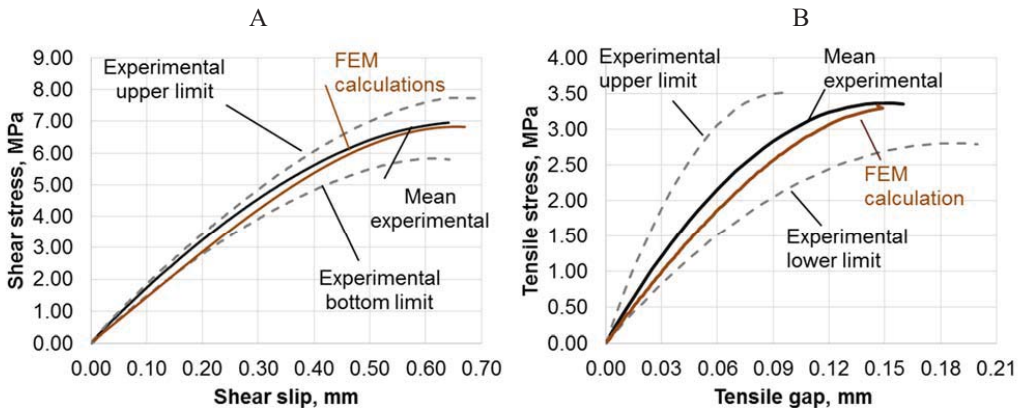


Fig. 5. Stress-displacement characteristic curves of glued joints. A – for determination of shear strength (for series with rib plywood with thickness of 6.5 mm and skin plywood with thickness of 4.0 mm with the same fibre direction as applied force); B – tensile strength (for series with rib plywood with thickness of 6.5 mm and skin plywood with thickness of 4.0 mm with fibre direction orthogonal to the applied force direction). Dashed lines show the upper and lower limitations of experimental investigations.

Experimentally investigated plates in four point bending guided by EN 789 Standard [53], showed that calculated values coincide with the those achieved during experiments – the

difference between calculated and experimentally measured results by loading up to 1/200 of the plate's span in longitudinal and in transversal directions does not exceed 15 %.

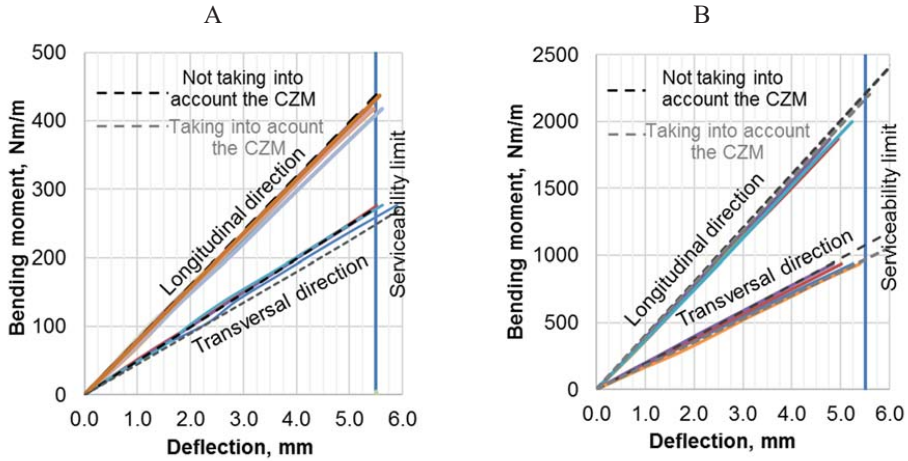


Fig. 6. Bending moment – deflection charts (by loading up to serviceability limit) for the plates with cell type hollow core in longitudinal and transversal directions and the thickness of A –is 25 mm and B is 50 mm (see other dimensions in Fig. 2).

The calculated deformative values are in limitations of experimentally determined coefficient of variation lower than 10 % (for longitudinal direction 5 % and for transversal direction 9 %) that shows low dispersion of plates' deformative properties. The load bearing capacity (by loading up to reaching of serviceability limit state) and the stiffness are shown in Table 1 and Fig. 6. The confidence intervals are calculated by assuming that the results are with probability of 95 % and normally distributed.

Table 1  
Results of Experimental Investigations of Plates with Cell Type Hollow Core

	Thickness	Stiffness (1 m lane)		Load bearing capacity					
	mm	kNm <sup>2</sup> /m	kNm <sup>2</sup> /m	Nm/m	Nm/m	Difference	Standard deviation	Coefficient of variation	Confidence interval
		Theor.	Exp.	Theor.	Exp.	%		%	
Longitudinal direction	25	9.38	9.58	413.9	423.0	2.14%	8.17	1.93	±6,54
	50	49.76	48.97	2196.4	2162.1	-1.59%	68.47	3.17	±54,79
Transversal direction	25	6.03	5.98	266.1	264.0	-0.78 %	11.67	4.42	±10,23
	50	21.43	21.76	945.7	960.5	1.54 %	0.95	4.35	±0,76



## Methodology for determination of rational structure and determination of specific load bearing capacity in bending for plates

The optimization of plate's elements was done by using the metamodeling in the form of global polynomial. The definition of objective function and variables (number of variables, limitations, etc.) for optimization were defined. If it is required after the determination of influence on objective function, the less important variables could be eliminated by fixing their values, thus reducing the number of variables. Depending on these data the plan of experiments is developed and *ANSYS ADPL* programme code that is developed by methodology, described in the 2nd chapter, with the *ANSYS Probabilistic Design* functions is specially adapted. By using this adapted programme code, the values of approximate function are calculated at the design points. The obtained results are exported back to the experimental design programme and the given functions are approximated with this programme in the form of quadratic polynomials. These functions are validated by checking the adequacy in limits of experimental design and in several cases compared to the experimentally achieved values. By fulfilling these validations it is possible to make optimization (minimization or maximization) for the objective functions depending on given parameters or other function restrictions. The influence of variables on the specific load bearing capacity in bending is shown in Fig. 7. It can be seen that in addition to the plate's thickness, it is highly dependent on the thickness of skin in relation to other parameters.

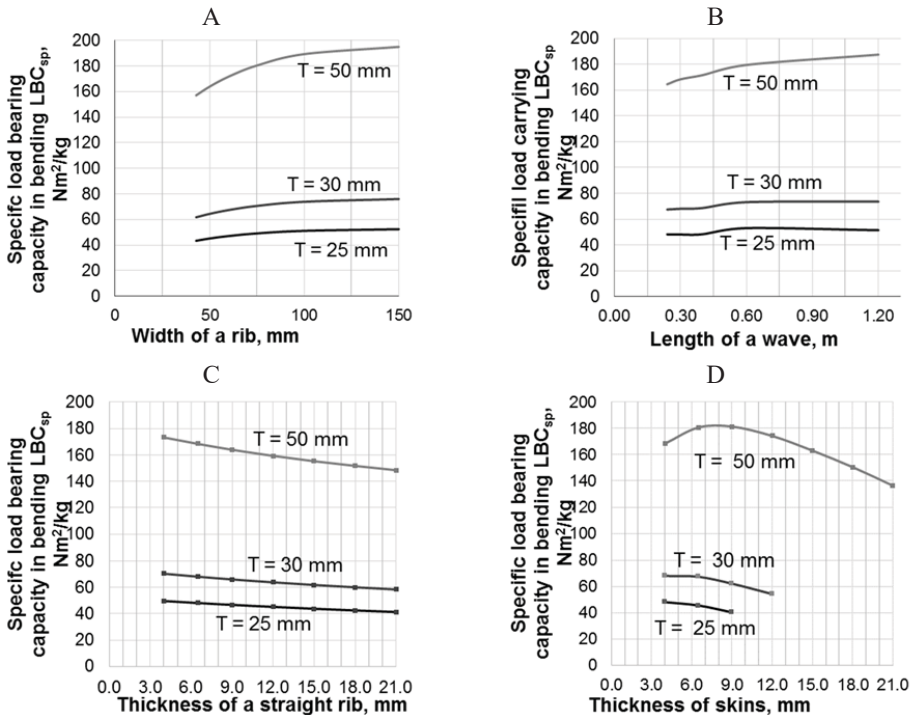


Fig. 7. Specific load bearing capacity in bending for plates with span 1.1 m and all core parts with thickness of 4.0 mm; A – depending on the width of a rib; B – depending on the length of a wave; C – depending on the thickness of straight rib part; D depending on the thickness of skin.

The algorithm of experimental design approach has been developed (Fig. 8). *ANSYS APDL* programme code, experimental design, and responses of experimental design have been created and parameters of objective function parameters and optimal parameters have been determined.

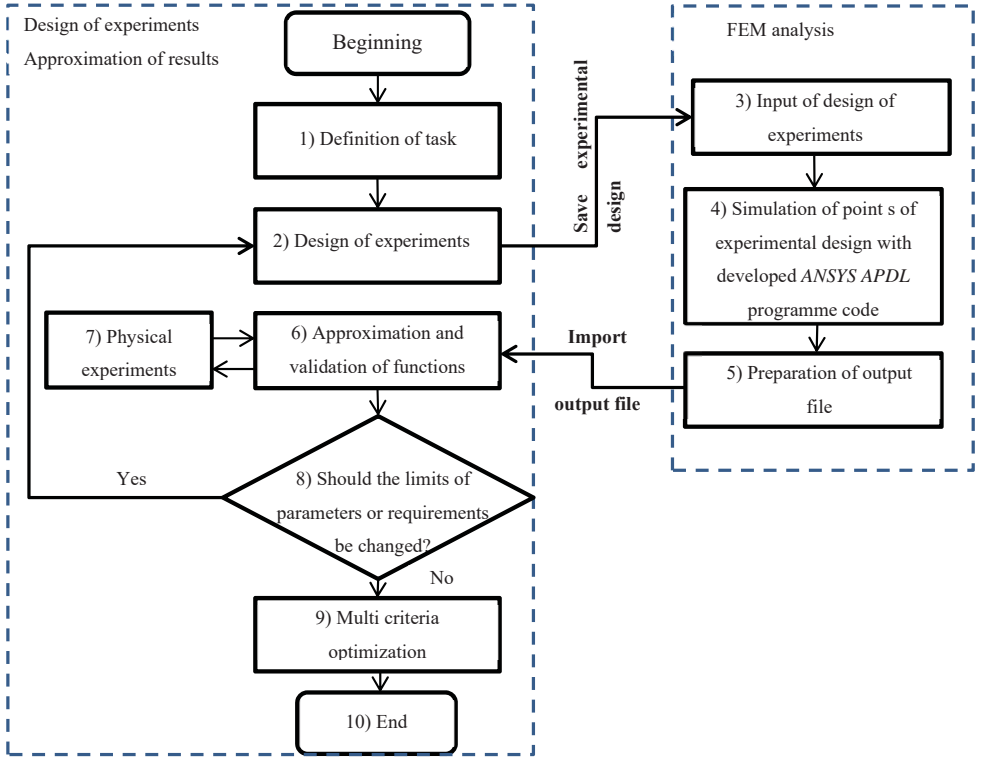


Fig. 8. Simplified block diagram based on experimental design (metamodeling) approach and *ANSYS* finite element analysis.

Approach of experimental design was based on the following phases (Fig. 8).

1) The limitations have been defined for each variable depending on optimization task – geometrical parameters of skins and core and the material properties, load cases and levels, etc.

2) The design of experiments should be done depending on their limitations and discretion. By creation of experimental design the limitations that are due to material options (e.g. nominal thicknesses set by plywood manufacturer), technological possibilities as well as dimensions of a plate (e.g. the length of a wave is dependent on the number of waves along the span and the width of a rib is dependent on width of a plate. If the number of variables is small (<5) then full factor experimental design could be used, although by increasing the number of variables, the experimental points increase exponentially. In that case either one of advanced experimental designs or optimization methodology (e.g. Genetic Algorithm) should be used. Design of experiments is saved in a respectively formatted text file (\*.txt).

3) – 5) The code for *ANSYS APDL* is created (written in \*.txt file) that is based on the methodology described in the second chapter. *ANSYS Probabilistic Design* functions were used additionally for optimization. The parameters for optimization should be defined as well as

objective functions, which should be approximated and used for optimization of definition of restrictions. The created design of experiments should be read in ANSYS programme environment (with *response surface simulation* mode), and the values of objective functions should be calculated with the developed methodology.

6) – 8) The approximation, determination of influence and optimization of the geometrical parameters on load bearing capacity and other parameters are realized by the *EdaOpt* software [9], that allows to use the response surface method. The most widely used response surface method with a 2nd power polynomial for approximation was chosen. By choice of experimental design it is recommended to consider the amplitude of response function values. If the difference is large then the minimization of larger absolute error by larger response values can lead to relatively larger errors by summing the square errors for higher responses, which could lead to higher influence on the total sum of square errors. In that way the approximation is adequate only in the higher regions but in lower regions it can significantly vary in one or other direction. Several experimental design points were experimentally validated and compared to the results of physical experiments achieved in accordance with LVS EN789:2005 [53].

9) Multi-criteria (e.g. minimization of mass of the plate by required load bearing capacity and limited thickness) optimization of response surfaces should be done by using approximated response functions (minimizing or maximizing related functions) for the given parameters and their boundaries. For the optimization the obtained equations were used by minimizing or maximizing these functions.

10) After the validation of optimization the optimal values should be saved and a plate with assumed optimal geometrical parameters could be used for engineering calculations or for the solution of manufacturing technology.

After the eliminations of less important variables the polynomial could be written as:

$$\begin{aligned}
 P_i = & b_{i,0} + b_{i,1} \cdot T + b_{i,2} \cdot t + b_{i,3} \cdot b + b_{i,4} \cdot s + b_{i,11} \cdot T \cdot T + \\
 & + b_{i,12} \cdot T \cdot t + b_{i,13} \cdot T \cdot b + b_{i,14} \cdot T \cdot s + b_{i,22} \cdot t \cdot t + b_{i,23} \cdot t \cdot b + b_{i,24} \cdot t \cdot s \\
 & + b_{i,33} \cdot b \cdot b + b_{i,34} \cdot b \cdot s + b_{i,44} \cdot s \cdot s
 \end{aligned} \quad (3)$$

where

$P$  approximation polynomial in general form;

$b_{ij}$  coefficients of polynomial, if  $i = 1$ , then thickness is 25–50, if  $i = 2$ , then thickness is 50–150, if  $i = 3$ , then thickness is 100–200 mm.

$T, t, b, s$  variables (see Fig. 2)

The values of global quadratic polynomial coefficient for load bearing capacity and specific load bearing capacity in bending have been determined. In the investigated space the serviceability limit is reached at first (the highest value of the ultimate limit state is not larger than 53 % when the serviceability limit state is reached). The determined values of load bearing capacity, stiffness and mass provide the possibility to approximate these functions and make optimization of plate's structure thereby minimizing the mass of plate for required load bearing capacity (or stiffness) by determination of optimal parameters and specific load bearing capacity (or stiffness).

## Basic principles of manufacturing of ribs and gluing of plates

The method of production of cell type hollow core and the technological principles of plate's gluing process have been developed. The skins and core could be made of the same or different materials, as well as the elements of ribbed core (for example different materials for straight rib part, distancing laths and wavy rib parts can be taken). The method of production of cell type hollow core is based on obtaining the shape of wavy rib part with distancing laths and gluing the peaks of wavy rib parts to the straight rib part or to the distancing laths. The produced pre-products of hollow ribs are sawn in lanes with the width equal to the thickness of core so that in the end the plate with cell type hollow core is obtained. The steps in producing cell type ribs from standard plywood or other sheet material, are shown in Fig. 3.

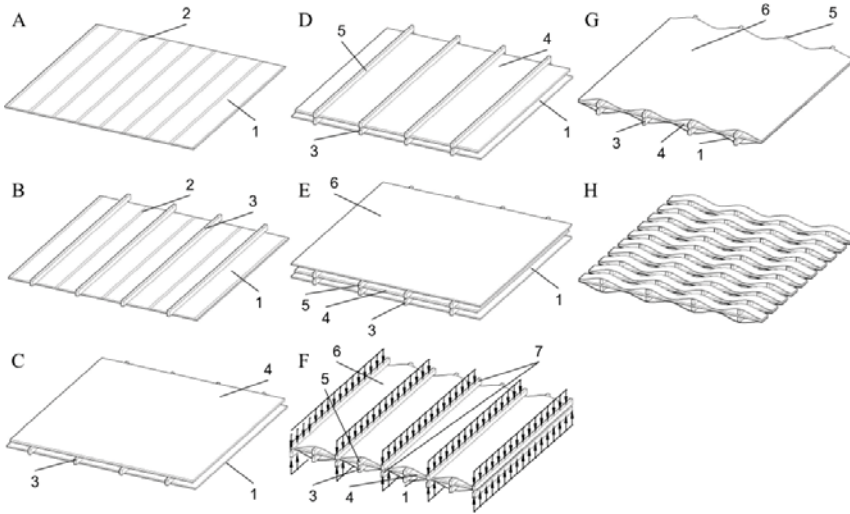


Fig. 9. Method of producing cell type hollow ribs.

1, 6 – plywood sheet for the wavy rib part; 2 – applied glue layer; 3, 5 – laths with thickness equal to the maximal height of hollow; 4 – plywood sheet for straight rib; 7 – applied bond pressure for gluing.

The production of plates with cell type hollow core includes the following phases:

- preparation of sheet materials for plate's skins;
- production of cell type core pre-product and joining the sawn separate rib into blocks;
- in phase b obtained ribs are joined together by gluing peaks of closely placed ribs the dimensions of which match the plate's geometry;
- lamination of core layer structure achieved in phase c) at the same time when from both directions (bottom and top) with the sheet materials produced in phase a) with the pressure till the bond between core and skins are partly or completely provided.

If it is required the hollows could be filled with some of the granulated insulation materials, for example foam plastic granules. To provide the properties in transversal direction of plates, it is required to glue separate ribs together. It is possible to apply the glue on peaks of the waves or on the whole side surface if filled blocks of ribs are used and from the sides pressed for the gluing process.

The gluing of skins to the core has a significant influence on the properties of the ribbed plates, therefore uniform pressure along the surface of plate should be provided in gluing process. Achieved experimental results show that recommended bond pressure is dependent on the number of layers transversal to the glued joint – if there are more layers transversal to the joint, the required pressure should be increased over 0.5 MPa to provide higher strength of the connection, although if this ratio is lower than 1/2 then a pressure of 0.5 MPa is recommended for achieving higher strength. The bond pressure has influence on variation of shear and tensile properties of glued connection between skins and ribs – by increasing the bond pressure from 0.3 MPa to 0.5 MPa the coefficient of variation decreases in average by 30 %, but from 0.3 MPa to 1.0 MPa it decreases in average by 50 %.

### Recommendations for rational structure design of plate’s geometrical parameters

The design recommendations of plates’ rational structure are based on methods and principles developed in previous chapters. The applicability could be divided in several groups where the plates with cell type hollow core are planned to be used as an alternative bearing element (mostly replacing plywood or cross laminated timber). In the fifth chapter the sequence of designing the plate’s structure is described, which ensures a rational design of plate’s structure by applying the developed methods. All the steps described in algorithms were executed and the main achieved results are shown for previously defined load bearing capacity or stiffness level that allows to replace previously mentioned materials. If the plates with cell type hollow core are assumed as homogenized material, it is possible to compare these plates with other materials depending on the ratio between modulus of elasticity and density. It has been determined that the plates with cell type hollow core have significant reduction of density as compared to modulus of elasticity of other widely used wooden materials (Fig. 10).

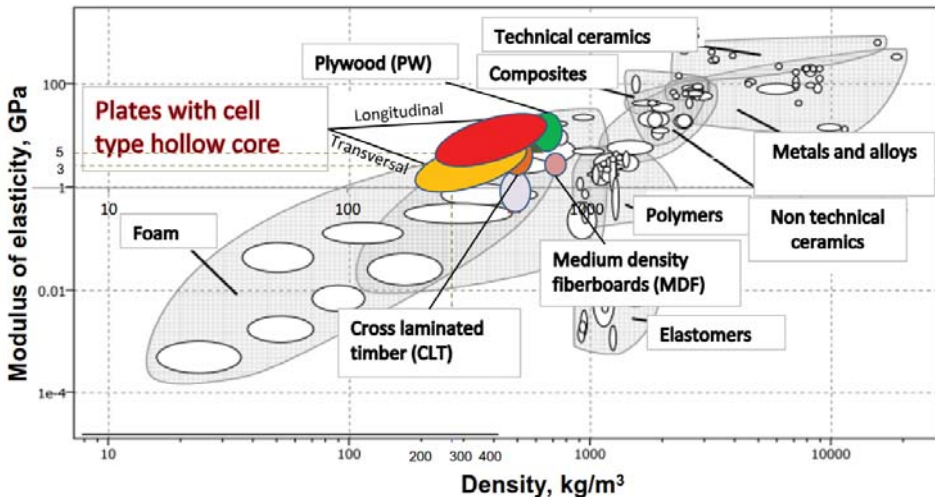


Fig. 10. Modulus of elasticity and density relations for plates with cell type hollow core and other materials [27].

Plywood plates, ribbed plates with straight ribs, plates with waved ribs and plates with cell type hollow core were compared (Fig. 11).

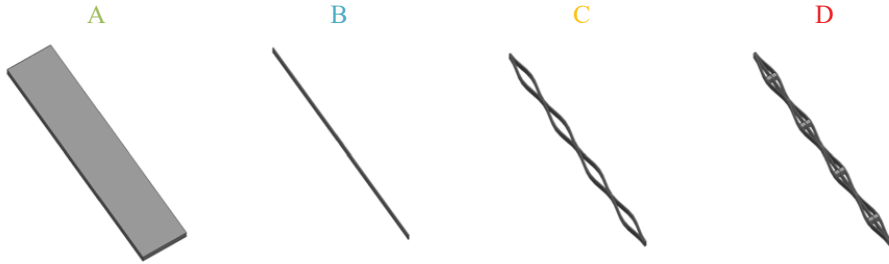


Fig. 11. Structure of investigated plates: A – massive plywood; B – plates with straight ribs; C – plates with waved ribs; D – plates with cell type hollow ribs.

Several ribbed plates were compared to the plywood depending on serviceability limit state. The results showed that ribbed plates have higher specific load bearing capacity – plates with cell type hollow ribs showed up to 50 % higher specific load bearing capacity, but plates with only straight ribs – up to 100 % higher specific load bearing capacity than plywood plates (Fig. 12).

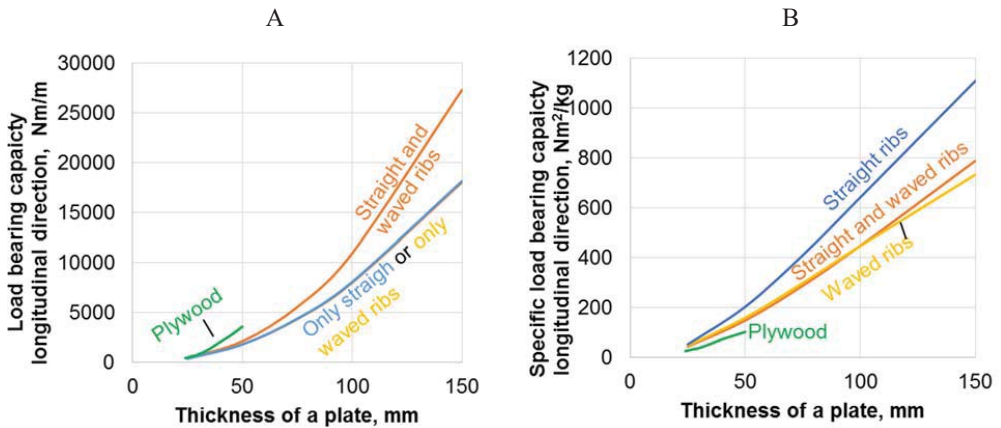


Fig. 12. Plywood, plates with straight ribs, plates with waved ribs and plates with cell type hollow ribs in longitudinal direction. A – load bearing capacity; B – specific load bearing capacity.

When the load bearing capacity in bending is compared in transversal direction, it has been obtained that the plates with waved ribs only show better results (for about 17 %) than the plates with cell type hollow core, because the straight rib part works mostly in longitudinal direction, but in transversal direction it has minor influence, although the mass of plate increases. When compared to the plates with straight ribs only, the specific load bearing capacity in bending is about 58 % higher for plates with a thickness of 50 mm and with the tendency to increase by increasing the thickness or thickness-to-span ratio of a plate. (Fig. 13). Plywood has similar specific load bearing capacity in transversal direction as the plates with waved ribs.

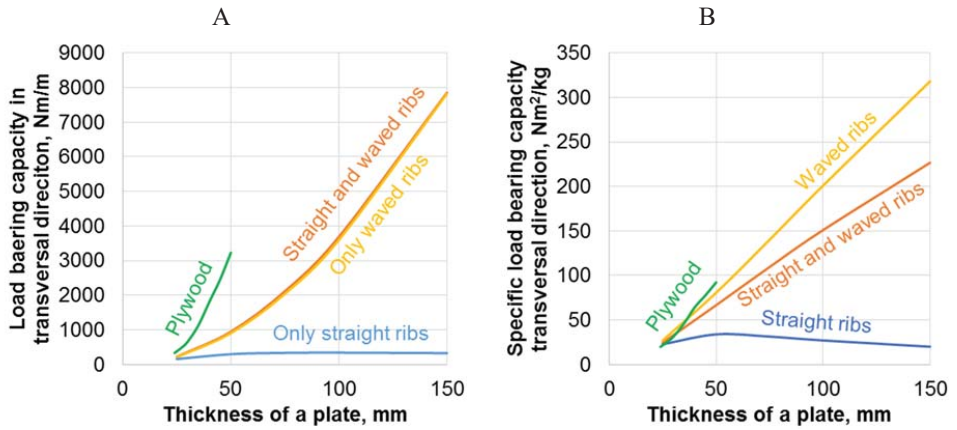


Fig. 13. Plywood, plates with straight ribs, plates with waved ribs and plates with cell type hollow ribs in transversal direction. A – load bearing capacity; B – specific load bearing capacity.

Table 2  
Plates with Cell Type Hollow Core Replacing Equivalent Plywood (Thickness 27–50 mm)

Thickness of plywood	Stiffness	Area mass density of plywood	Thickness of plates with cell type hollow core	Increase of the thickness	Area mass density of plates with cell type hollow core	Decrease of area mass density
mm	$N \cdot m^2/m$	$kg/m^2$	mm		$kg/m^2$	
27	14 473	18.9	30.03	11 %	9.56	-49 %
30	19 491	21.0	34.19	14 %	10.24	-51 %
35	32 760	24.5	41.37	18 %	11.51	-53 %
40	50 996	28.0	48.50	21 %	12.55	-55 %
45	68 412	31.5	55.67	24 %	13.48	-57 %
50	89 392	35.0	64.38	29 %	14.22	-59 %

Similar principles could be used for properties in transversal direction or for different case of loading/support.



## Conclusions

The methodology of calculations has been developed for the plates with cell type hollow core (further in text plates) to determine the load bearing capacity in bending. Another methodology has been developed to determine and optimize the specific load bearing capacity as well as fundamental principles for manufacturing plates, and recommendations for the design of plates are presented.

1. Methodology of determination of load bearing capacity in bending (the bending moment that plate can carry by reaching the limit state in short term static loading) in longitudinal and transversal directions of ribs has been developed depending on thicknesses of skins, shape of elements of hollow ribs, strength and characteristics of plywood, and taking into account the behaviour of glued joints with interface elements that takes into account the crack propagation in glue layer. The methodology of determination of glued joint shear and tensile properties has been developed to evaluate the behaviour of glued joint between the core and the surfaces of plywood skins. As a result the strength and deformability mean values were determined in confidence interval at probability of 95 % for category D3 (according to EN204) PVA glue and curing in cold press. It was determined that mean shear strength was  $7.11 \pm 0.12$  MPa and mean relative deformations were  $1.28 \pm 0.03\%$ , mean tensile strength for the connection was  $3.39 \pm 0.18$  MPa and the mean displacement at fracture was  $0.15 \pm 0.01$  mm.
2. The load bearing capacity of plates with thicknesses from 25 to 150 mm in four point bending by loading up to limit of serviceability limit state (for most typical case according to manufacturing – the thickness of straight rib part is 6.5 mm and waved rib part with 4 waves along the span, in confidence interval with probability of 95 %) has been experimentally determined. The load bearing capacity in bending for the plates with a thickness of 50 mm in longitudinal direction is  $2162 \pm 55$  N·m/m, but in transversal direction of ribs it is  $960 \pm 33$  N·m/m. The difference between calculated and experimentally obtained does not exceed 15 %.
3. The calculation method of specific load bearing capacity in bending has been developed, which includes the design of parameters of ribbed core structure by minimization of material consumption. The optimization of plate's structure has been done by using specifically adapted algorithm that includes the approximation models in a form of global polynomials, using which in 90 % cases the difference between approximate and calculated values does not exceed 5 %. For example, it has been determined that in order to provide the same load bearing capacity in bending as birch plywood with a thickness of 30 mm (class E, EN 636:2012+A1:2015) by using global polynomial with obtained coefficients, the required total thickness of plates with cell type hollow core is 14 % larger but at the same time the material consumption is reduced by 50 %.
4. The technological principles for plate with cell type hollow core have been created. They include the manufacturing of cell type hollow core and the plates consisting of such ribs. The method of production of cell type hollow core is based on obtaining the shape of waved rib part with distancing laths and gluing the peaks of waved rib parts to the straight



rib part or to these distancing laths. The produced pre-products of hollow ribs are sawn in lanes with the width equal to the thickness of core. Experimental investigations show that the bond pressure has influence on variation of shear and tensile properties of glued connection between skins and ribs – by increasing the bond pressure from 0.3 to 0.5 MPa the coefficient of variation decreases in average by 30 %, but from 0.3 to 1.0 MPa it decreases in average by 50 %.

5. The structure of such core has been investigated and recommendations have been provided as guidelines for the design of rational parameters that harmonize the section stress field with material resistance field of the developed structure. It has been determined that it is possible to replace the plywood or cross laminated timber (CLT) providing equal load bearing capacity in bending, and at the same time, reducing mass of structures. As compared to plywood, by using plates with cell type hollow core it is possible to increase the specific load bearing capacity (load bearing capacity to the unit mass) in bending by up to 60 %.

The approval of the topicality and originality of the Thesis are 12 scientific publications, participation at 11 international scientific conferences and 2 obtained Latvian patents.

## LITERATŪRAS SARAKSTS / BLIOGRAPHY

- 1 Alfano G, Crisfield MA. Finite element interface models for the delamination analysis of laminated composites: mechanical and computational issues. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 2001;50(7):1701-1736.
- 2 ANSYS Mechanical APDL Element Reference November 2013 Southpointe USA.
- 3 ANSYS Mechanical APDL Theory Reference ANSYS, Inc. Release 15.0 November 2013 Southpointe USA.
- 4 ASTM D3166-99, Standard Test Method for Fatigue Properties of Adhesives in Shear by Tension Loading (Metal/Metal), ASTM International.
- 5 ASTM D3528-96, Standard Test Method for Strength Properties of Double Lap Shear Adhesive Joints by Tension Loading, ASTM International.
- 6 ASTM E122-00, Standard Practice for Calculating Sample Size to Estimate, With a Specified Tolerable Error, the Average for Characteristic of a Lot or Process.
- 7 Audze P, Eglajs V. New approach to the design of multifactor experiments. *Problems of Dynamics and Strengths*. 1977;35:104-107.
- 8 Auziņš J, Januševskis A. Eksperimentu plānošana un analīze. Rīga 2007.
- 9 Auziņš J, Januševskis A, Januševskis J, Skuķis E. Software EDAOPT for Experimental Design, Analysis and Multiobjective Robust Optimization. *OPT-i International Conference on Engineering and Applied Sciences Optimization*. 2014;ISBN 978-960-99994-5-8. ISSN 2241-9098.:101-123.
- 10 Banerjee S, Bhattacharyya D. Optimal design of sandwich panels made of wood veneer hollow cores. *Composites Science and Technology*. 2011;71:425-432.
- 11 Barenblatt GI. The formation of equilibrium cracks during brittle fracture. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*. 1959;23:622-636.
- 12 Bartolozzi G, Baldanzini N, Pierini M. Equivalent properties for corrugated cores of sandwich structures: A general analytical method. *Composite Structures*. 2014;108:736-76.
- 13 Bartolozzi G, Pierini M, Orrenius U, Baldanzini N. An equivalent material formulation for sinusoidal corrugated cores of structural sandwich panels. *Composite Structures*. 2013;100:173-185.
- 14 Bloomfield MW, Diaconu CG, Weaver PM. On feasible regions of lamination parameters for lay-up optimization of laminated composites. *The Royal Society A*. 2009 1123-1143.
- 15 Blyt CF, inventor. Method of producing a corrugated construction unit US Patent. 1999. US5948198.
- 16 Bourgeois S, Cartraud P, Débordes O. Homogenization of Periodic Sandwiches Numerical and analytical approaches. In: *Mechanics of Sandwich Structures Proceedings of the EUROMECH 360 Colloquium 13–15 May 1997*. Saint-Étienne: France.

- 17 Brauns J, Rocens K. Topology optimization of multi-layered composite structures. *Civil Engineering 11' Proceedings*. 2011 pp. 103 - 108.
- 18 Broughton WR, D. MR. Review of Durability Test Methods and Standards for Assessing Long Term Performance of Adhesive Joints. Teddington, Middlesex TW11 0LW: National Physical Laboratory; 1997.
- 19 BSI Group. BS 5350-C5:2002 Methods of test for adhesives. Determination of bond strength in longitudinal shear for rigid adherends.
- 20 Buddi T, Muttli N, Rao BN, Singh SK. Development of a Soya Based Adhesive in Plywood Manufacturing. *Materials Today: Proceedings*. 2015 3027-3031.
- 21 Bull DJW. Finite Element Analysis of Thin-Walled Structures. Abingdon, Oxon, UK: CRC Press Taylor & Francis Group; 1988.
- 22 Butler NA. Optimal and Orthogonal Latin Hypercube Designs for Computer. *Biometrika*. 2001;88:847-857.
- 23 Campbell FC. *Structural Composite Materials*. USA: ASM International; 2010.
- 24 Campen JMfV, Kassapoglou C, Gürdal Z. Generating realistic laminate fiber angle distributions for optimal variable. *Composites Part B: Engineering*. 2012;43:354-360.
- 25 Campilho RDSG, Banea MD, Neto JABP, da Silva LFM. Modelling adhesive joints with cohesive zone models: Effect of the cohesive law shape of the adhesive layer. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2013;44:48-56.
- 26 Centrālā statistikas pārvalde. *Mežsaimniecība 2015. gadā*. 2016.
- 27 CES EduPack. [Internet]. 2017 [cited 2017 Aug 22]. Available from: <https://www.grantadesign.com/>.
- 28 Cheng QH, Lee HP, Lu C. A numerical analysis approach for evaluating elastic constants of sandwich structures with various cores. *Composite Structures*. 2006;74:226-236.
- 29 Chen DH, Yang L. Analysis of equivalent elastic modulus of asymmetrical honeycomb. *Composite Structures* 93. 2011 767-773.
- 30 Choi J, Shankar K, Tahtali M. Numerical Investigation of Corrugated Wire Mesh Laminate. *Journal of Engineering*. 2013;2013:Article ID 470241, 10 pages.
- 31 Chukhina IG, Bagmet LV. AgroAtlas - Relatives - Range of distribution of *Betula pendula*. [Internet]. 2007 [cited 2017 Aug 22]. Available from: [http://www.agroatlas.ru/en/content/related/Betula\\_pendula/map/](http://www.agroatlas.ru/en/content/related/Betula_pendula/map/).
- 32 Decorative sandwich panel / wood / wood - LIGHTWEIGHT - Compensati toro. [Internet]. [cited 2017 Aug 22]. Available from: <http://www.nauticexpo.com/>.
- 33 Demirkir C, Özsohain Ş, Aydin I, Colakoglu G. Optimization of some panel manufacturing parameters for the best bonding strength of plywood. *International Journal of Adhesion & Adhesives*. 2013;46:14-20.
- 34 Dugdale DS. Yielding of steel sheets containing slits. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 1960;8(2):100-104.

- 35 Ebnesajjad S. Adhesives technology handbook 2nd Edition. Norwich, NY, USA: William Andrew Inc.; 2008.
- 36 EconCore - New technologies and honeycomb cores for economic sandwich material production. [Internet]. [cited 2017 Aug 22]. Available from: <http://www.econcore.com>.
- 37 Eglajs V, Audze P. New approach to the design of multifactor experiments. Problems of Dynamics and Strengths. 1977;35:104-107.
- 38 EN 14279 Laminated Veneer Lumber (LVL) - Definitions, classification and specifications.
- 39 EN 14358 Timber structures - Calculation of characteristic 5-percentile values and acceptance criteria for a sample.
- 40 EN 1465 Adhesives. Determination of tensile lap-shear strength of bonded assemblies.
- 41 EN 15425 Adhesives. One component polyurethane for load bearing timber structures. Classification and performance requirements.
- 42 EN 1995-1-1 Design of timber structures.
- 43 EN 204 Classification of thermoplastic wood adhesives for non-structural applications.
- 44 EN 205 Adhesives — Wood adhesives for non-structural applications — Determination of tensile shear strength of lap joints.
- 45 EN 301 Adhesives, phenolic and aminoplastic, for load-bearing timber structures - Classification and performance requirements.
- 46 EN 310 Wood-based panels: Determination of modulus of elasticity in bending and of bending strength.
- 47 EN 315 Plywood. Tolerances for dimensions.
- 48 EN 324-1 Wood-based panels. Determination of dimensions of boards. Determination of thickness, width and length.
- 49 EN 325 Wood-based panels - Determination of dimensions of test pieces.
- 50 EN 326-1 Wood-based panels. Sampling, cutting and inspection. Sampling and cutting of test pieces and expression of test results.
- 51 EN 635-1 Plywood - Classification by surface appearance - Part 1: General.
- 52 EN 636:2012+A1:2015 Plywood. Specifications.
- 53 EN 789 Timber structures. Test methods. Determination of mechanical properties of wood based panels.
- 54 EN ISO 9664:1995 Adhesives. Test methods for fatigue properties of structural adhesives in tensile shear.
- 55 Eriksson M, Andersson PO, Burman Å. Using Design-of-Experiments techniques for an efficient Finite Element study of the influence of changed parameters in design. In: Bryan WJ, editor. Ansys Conference Proceedings; 1998; Canonsburg PA. p. Eriksson, M.; Andersson, P. O.; Burman, Å.

- 56 Ethan E, inventor. Process for manufacturing corrugated plywood composites. 1989 Mar 28. US 4816103 A.
- 57 Ethan, E., inventor. Apparatus for manufacturing corrugated plywood composites. 1990 Jul 24. US4943339 A.
- 58 EUFORGEN (European Forest Genetic Resources Programme). [Internet]. [cited 2017 Aug 22]. Available from: [http://www.euforgen.org/distribution\\_maps.html](http://www.euforgen.org/distribution_maps.html).
- 59 Evans M. Optimisation of Manufacturing Processes, A Response Surface Approach. Maney 2003.
- 60 Fayazbakhsh K, Ghiasi H, Pasini D, Lessard L. Optimum stacking sequence design of composite materials Part II: Variable stiffness design. *Composite Structures*. 2010 1-13.
- 61 FORM+TEST : Universal Test Unit UPB 86/200title\_postfix. [Internet]. 2016.
- 62 Friedl G, Kuczmann M. Population and Gradient Based Optimization Techniques, a Theoretical Overview. *Acta Technica Jaurinensis*. 2104;7(4).
- 63 Ganesh B, Kumar BV, Muppala D. Design and structural analysis of aircraft floor panel. *International Journal of Advanced Engineering and Global Technology*. 2015;3(12):1451-1460.
- 64 Georgia-Pacific Medium Density Fiberboard, UltraStock, Shelving. [Internet]. [cited 2017 Aug 22]. Available from: <http://www.buildgp.com/medium-density-fiberboard>.
- 65 Geubelle PH, Baylor J. Impact-induced delamination of composites: a 2D simulation. *Composites B*. 1998;29:589-602.
- 66 Ghasemenjad H, Aboutorabi A. Cohesive Zone Modeling (CZM) in Prediction of Delamination Failure in Laminated Composite Structures. *Journal of Materials Science and Engineering*. 2011;5:61-64.
- 67 Ghiasi H, Pasini D, Lessard L. Optimum stacking sequence design of composite materials Part I: Constant stiffness design. *Composite Structures*. 2009 1-11.
- 68 Glud J, Christensen ET, Lindgaard E, Bak BLV. Implementation of a state-of-the-art cohesive zone element for ANSYS Mechanical. In: 26th Nordic Seminar on Computational Mechanics; 2013; Oslo, Norway.
- 69 Gofrētā kartona kastes un loksnes. [Internet]. 2016 [cited 2017 Aug 22]. Available from: <http://www.pako.lv/>.
- 70 Gurdal Z, Haftka R, Hajela P. Design and optimisation: Laminated composite materials. New York: Wiley and Sons Ltd.; 1999.
- 71 Haftka R, Gurdal Z. Elements of structural optimisation 3rd ed.. New York: Kluwer Academic Publishers; 1992.
- 72 Handbook of Finnish Plywood. Finland: Finnish Forest Industries Federation. 2002.
- 73 Hansen E, Panwar R, Vlosky R. The Global Forest Sector: Changes, Practices, and Prospects. Boca Raton, London, New York: CRC Press Taylor & Francis Group; 2014.

- 74 Hermann LR. Finite Element Bending Analysis for Plates. *Journal of the Engineering Mechanics Division*. 1967;93.
- 75 He L, Y.S. C, Liu J. Precise bending stress analysis of corrugated-core, honeycomb-core and X-core sandwich panels. *Composite Structures*. 2012;94(5):1656-1668.
- 76 Hunt JF, O'Dell J, Turk C. Fiberboard bending properties as a function of density, thickness, resin, and moisture content. *Holzforschung*. 2008;62:569-576.
- 77 Janushevskis J. Development and application of metamodeling methods for analysis and optimization of mechanical systems. Doctoral Thesis. 2008.
- 78 Jin R, Chen W, Sudjianto A. An efficient algorithm for constructing optimal design of computer experiments. *Journal of Statistical Planning and Inference*. 2005;134(1):268-287.
- 79 Joshihara K. Poisson's ratio of plywood measured by tension test. *Holzforschung*. 2009;63:603-608.
- 80 Junkers H, inventor. Abdeckung für Flugzeugtragflächen und dergleichen. 1915. DE310040.
- 81 Katesplates.lv - moderni un kvalitatīvi plātņu materiāli. [Internet]. [cited 2016 Nov 12]. Available from: <http://katesplates.lv/>.
- 82 Kavermann SW. Mechanical properties of lightweight sandwich panels with corrugated plywood core. In: Doctoral Thesis. Auckland, New Zealand: The University of Auckland; 2013.
- 83 Kerto Manual - Moisture behaviour. [Internet]. 2015 [cited 2016 Nov 22].
- 84 Kerto-Ripa-Rippen-und-Kastenelemente. [Internet]. 2015 [cited 2016 Nov 25].
- 85 Keyes JJ, inventor. Method of making insulating material. 1924 Apr 01. US1488504.
- 86 Kilic Y, Colak M, Baysal E, Burdurlu E. An investigation of some physical and mechanical properties of laminated veneer lumber manufactured from black alder (*Alnus glutinosa*) glued with polyvinyl acetate and polyurethane adhesives. *Forest products journal*. Vol. 56, no. 9 (Sept. 2006): p. 56-59. 2006 Sept 56-59.
- 87 Kirsons M. Latvijas Finieris saplāksni sāk līmēt Kohilā. *Dienas Bizness*. 2016 Nov 16.
- 88 Koch PN, Allen JK, Mistree F, Mavris D. The Problem of Size in Robust Design. In: *Advances in Design Automation*. Sacramento CA: ASME Paper No. DETC97/DAC-3983; 1997.
- 89 Kooistra GW, Wadley HNG. Lattice truss structures from expanded metal sheet. *Materials and Design*. 2007;28:507-514.
- 90 Kovaļska A. Metamodelēšanas pielietojums dinamisku sistēmu analīzē un optimizācijā. Promocijas darbs. 2012.
- 91 Labans E. Integration and optimisation of multifunctionality for plywood sandwich construction Doctoral Thesis. Riga: RTU; 2016.

- 92 Labans E, Kalnins K. Experimental validation of the stiffness optimisation for plywood sandwich panels with rib-stiffened core. *Wood Research Slovak Forest Products Research Inst.* 2014;59(5):793-802.
- 93 Labans E, Kalnins K, Ozolins O. Experimental and Numerical Identification of Veneers Mechanical Properties. *Construction Science.* 2010;11:38-43.
- 94 Labans E, Kalniņš K, Zudrags E. Saplākšņa sendvičpaneļa ar viļņotu serdi eksperimentālās pārbaudes un skaitliskā modelēšana. *Mehānika.* 2015;36:17-22.
- 95 Latvijas Finieris. Plywood handbook. Riga 2017.
- 96 Lebée A, Sab K. Homogenization of thick periodic plates: Application of the Bending-Gradient plate theory to a folded core sandwich panel. *International Journal of Solids and Structures.* 2012;49(19-20):2778-2792.
- 97 Lei H, Du G, Wu Z, Xi X, Dong Z. Cross-linked soy-based wood adhesives for plywood. *Adhesion & Adhesives.* 2014;50:199-203.
- 98 LIGNATUR Decken- und Dachelemente.
- 99 Lindgaard E, Bak BLV, Glud JA, Sjølund J, Christensen ET. A User Programmed Cohesive Zone Finite Element for ANSYS Mechanical. *Engineering Fracture Mechanics.* 2017 (In Press) May 23.
- 100 Manalo AC, Aravinthan T, Karunasena W. Flexural analysis of discontinuous tile core sandwich structure. *Composite Structures* 94. 2012 1524-1532.
- 101 Marra GG, Wangaard FF. Overview of wood as a material. In: *Wood: its structure and properties.* Materials Research Laboratory, Pennsylvania State University; 1979. p. 42.
- 102 Ministru kabinets. LBN 002-15 "Ēku norobežojošo konstrukciju siltumtehnika".
- 103 Ministru kabinets. LBN 003-15 "Būvklimatoloģija".
- 104 Muttill N, Ravichandra G, Bigger SW, Thorpe GR, Shailaja D, Singh K. Comparative Study of Bond Strength of Formaldehyde and Soya based Adhesive in Wood Fibre Plywood. 3rd International Conference on Materials Processing and Characterisation. 2014;6:2-9.
- 105 Myer RH, D.C. M. Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Design Experiment. 2nd edition. New York: John Willeh & Sons Inc.; 2002.
- 106 Nishimura T. Chipboard, oriented strand board (OSB) and structural composite lumber. *Wood Composites.* 2015 103-121.
- 107 Ozoliņš J. Latvijas Konkurētspējas Ziņojums 2016. Riga: Domnīca Certus; 2017. ISBN 978-9934-8679-1-0.
- 108 Pablo Vitale J, Francucci G, Xiong J, Stocchi A. Failure mode maps of natural and synthetic fiber reinforced composite sandwich panels. *Composites: Part A.* 2016;94:217-225.
- 109 Paik JK, Lee YW, Thayamballi AK, Curry R. A novel concept for structural design and construction of vessels using aluminum honeycomb sandwich panels. *Transactions of the Society of Naval Architects and Marine Engineers.* 1997 191-219.

- 110 Paik JK, Thayamballi KA, Kim GS. The strength characteristics of aluminum honeycomb sandwich panels. *Thin-Walled Structures*. 1999 205-231.
- 111 Panels • Dutch Marine Panels. [Internet]. [cited 2017 Aug 22]. Available from: <http://www.dutchmarinepanels.com/panels/>.
- 112 Partovi Meran A, Toprak T, Muğan A. Numerical and experimental study of crashworthiness parameters of honeycomb structures. *Thin-Walled Structures*. 2014;78:87-94.
- 113 Petras A, Sutcliffe MPF. Failure mode maps for honeycomb sandwich panels. *Composite Structures*. 1999 237-252.
- 114 Petrie EM, Harper CA(). *Plastics and adhesives as adhesives*. In: *Handbook of Plastics and Elastomers* 4th ed.. New York: McGraw-Hill; 2002.
- 115 PLASCORE - Aluminum, PP, honeycomb panels. [Internet]. [cited 2017 Aug 22]. Available from: <https://www.plascore.com/honeycomb/honeycomb-panels/>.
- 116 Production of Wood-based Panels. [Internet]. [cited 2015 March 15]. Available from: [http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/WBP\\_online.pdf](http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/WBP_online.pdf).
- 117 Pupurs A, Varna J, Loukil M, Mattsson D. 16th European Conference on Composite Materials, ECCM 2014. In: *Damage development and stiffness reduction in laminates in out-of-plane loading*; 2014; Seville; Spain; 22 June 2014 through 26 June.
- 118 Qiao P, Wang J. Mechanics of Composite Sinusoidal Honeycomb Cores. *Journal of Aerospace Engineering*. 2005;18(1).
- 119 Queheillalt DT, Wadley HNG, inventors. *Manufacture of Lattice Truss Structures from Monolithic Materials*. 2012 Nov 15. US20120285114 A1.
- 120 Quintana-Alonso I, Fleck NA. Fracture of Brittle Lattice Materials: A Review. In: Daniel IM, Gdoutos EE, Rajapakse YDS. *Major Accomplishments in Composite Materials and Sandwich Structures*. Dodrect: Springer; 2010. p. 799-816.
- 121 Rao SS. *Engineering Optimization. Theory and Practise* 4th ed. New Jersey: John Willey & Sons Inc; 2009.
- 122 Rathbun HJ, Wei Z, He MY, Zok FW, Evans AG, Sypeck DJ. Measurement and simulation of the performance of a lightweight metallic sandwich structures with a tetrahedral truss core. *Journal of Applied Mechanics*. 2004;71(3):368-374.
- 123 Rebollar M, Perez R, Vidal R. Comparison between oriented strand boards and other wood-based panels for the manufacture of furniture. *Materials & Design*. 2007;28(3):882-888.
- 124 Rice JR, J.S. W. Embrittlement of Interfaces by Solute Segregation\*. *Materials Science and Engineering:A*. 1989;107:23-40.
- 125 Rocēns K, Šliseris J, Vērdiņš J. LV14519 Slāņains kompozīts ar šūnu tipa dobām ribām uz koksnes materiālu bāzes. LR Patentu valdes oficiālais izdevums. 2012.
- 126 Rowell RM. *Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites*. Florida, USA: CRC Press; 2005.



- 127 Ruben DM, inventor. Apparatus for manufacture of corrugated plywood. 1953 Jun 02. US2640517.
- 128 Russel BP, Liu T, Fleck NA, Deshpande VS. Quasi-Static Three-Point Bending of Carbon Fiber Sandwich Beams With Square Honeycomb Cores. *Journal of Applied Mechanics*. 2011;3(78).
- 129 Sacks J, Welch WJ, Mitchell TJ, Wynn HP. Design and Analysis of Computer Experiments. *Statistical Science*. 1989;4(4):409-423.
- 130 Schmit Jnr LA, Farshi B. Optimum laminate design for strength and stiffness. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 1973;7(4):519-536.
- 131 Serafinavicius T, Kvedaras AK, Sauciunenas G. Bending behavior of structural glass laminated with different interlayers. *Mechanics of Composite Materials*. 2013;49(4):437-446.
- 132 Sham Prasad MS, Venkatesha CS, ayaraju T. Experimental Methods of Determining Fracture Toughness of Fiber Reinforced Polymer Composites under Various Loading Conditions. *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering*. 2011;10(13):1263-1275.
- 133 Silly G, Thiel A, Augustin M. Options for the resource optimised production of laminar load carrying members based on wood products. In: *WCTE 2016 World Conference on Timber Engineering; 2016; Vienna, Austria*.
- 134 Sing Panels - Insulated, torsion box honeycomb panels. [Internet]. [cited 2017 Aug 22]. Available from: <http://singcore.com/product/structural-core>.
- 135 Skudra AM, Skudra AA. Ievads slāņaino materiālu un konstrukciju mehānikā. Rīga: Rīgas Tehniskā universitāte; 2002.
- 136 Sliseris J. RK. Optimization of multispan ribbed plywood plate macro-structure for multiple load cases. *Journal of Civil Engineering and management*. 2013;19(5):696-704.
- 137 Sliseris J. Non-traditional wood composite structural elements and their analysis methods. In: *Doctoral Thesis*. Riga, Latvia: Riga Technical Univeristy; 2013.
- 138 Sliseris J, Rocēns K. Behaviour of multilayer sheets with technological imperfection. In: *Proceedings of 10th International conference Modern Building Materials, Structures and Techniques"; 2010; Vilnius, Lithuania*. p. 793-798.
- 139 Sliseris J, Rocēns K. Curvature analysis for asymmetrical multi-layer composite. *Construction Science*. 2009 139-146.
- 140 Sliseris J, Rocēns K. Curvature analysis for composite with orthogonal, asymmetrical multi layer structure. *Journal of Civil Engineering and Management*. 2010 242-248.
- 141 Sliseris J, Rocens K. Non-uniform moisture influence on multilayer corrugated plywood shell.; 2011; Tampere. p. 723-730.
- 142 Sliseris J, Rocens K. Optimal design of composite plate with discrete varying stiffness. *Composite Structures*. 2013;98:15-23.

- 143 Stein E. The History of Theoretical, Material and Computational Mechanics - Mathematics Meets Mechanics and Engineering. In: Lecture Notes in Applied Mathematics and Mechanics. Springer; 2014.
- 144 Tauchert TR, Adibhalta S. Design of laminated plates for maximum stiffness. J Compos Mater. 1984 58-69.
- 145 The Adhesives Design Toolkit. [Internet]. [cited 2016 Nov 12]. Available from: <http://www.adhesivestoolkit.com>.
- 146 Trummer A, Aicher S, Krestel S. Kielsteg – defining the design parameters for a lightweight wooden product. In: WCTE 2016 World Conference on Timber Engineering August 22-25; Viena, Austria.
- 147 Tsai SW, Hahn HT. Introduction to composite materials. Lancaster, PA: Techo Publishing Co.; 1980.
- 148 Turon A, Dávila CG, Camanho PPCJ. An engineering solution for mesh size effects in the simulation of delamination using cohesive zone models. Engineering Fracture Mechanics. 2007;74(10):1665-1682.
- 149 United States Department of Agriculture. Wood Handbook Wood as an Engineering Material. Madison, Wisconsin USA: Forest Products Laboratory; 1999.
- 150 Valsts meža dienests. 2016. gada publiskais pārskats. [Internet]. Rīga 2017 [cited 2017 Aug 22]. Available from: <https://www.zm.gov.lv/>.
- 151 Venkataraman S, Haftka RT. Proceedings of the 14th annual technical conference of the American society of composites. In: Optimization of composite panels - a review.; 1999; Davton, OH September 27-29.
- 152 Vick CB. Adhesives Bonding of Wood Materials. In: Wood as an Engineering Material - Part I. Madison, WI: U.S.: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.; 2012. p. 9-1 - 9-24.
- 153 Vincents Polyline. PVA D3. [Internet]. 2015 [cited 2016 Nov 14]. Available from: <http://www.polyline.lv>.
- 154 Vital Forest Graphics. [Internet]. UNEP/GRID-Arendal; 2009 [cited 2015 March 15]. Available from: [http://www.unep.org/vitalforest/Report/VFG\\_full\\_report.pdf](http://www.unep.org/vitalforest/Report/VFG_full_report.pdf).
- 155 Williamson TG. APA Engineered Wood Handbook. USA: McGraw-Hil; 2002.
- 156 World Panel Products: Marine Plywood & Teak. [Internet]. [cited 2017 Aug 22]. Available from: <http://www.worldpanel.com/>.
- 157 Xu XP, Needleman A. Numerical simulations of fast crack growth in brittle solids. Journal of the Mechanics and Physics of Solids. 1994;42:1397-1434.
- 158 Xu XF, Qiao P. Homogenized elastic properties of honeycomb sandwich with skin effect. International Journal of Solids and Structures. 2002;39(8):2153-2188.
- 159 Xu XF, Qiao P, Davalos JF. Transverse Shear Stiffness of Composite Honeycomb Core with General Configuration. Journal of Engineering Mechanics. 2001;127(11):1144-1151.

- 160 Zemkopības ministrija. Ārējā tirdzniecība Eksports un imports 2016. gads. Centrālā statistikas pārvalde; 2017.
- 161 Zudrags K. Paaugstinātas īpatnējās stiprības saplākšņa plātnes, Promocijas darbs. Jelgava 2010.
- 162 Zuhri MYM, Guan ZW, Cantwell WJ. The mechanical properties of natural fibre based honeycomb core materials. *Composites Part B: Engineering*. 2014;58:1-9.
- 163 Боровиков АМ, Уголев БН. Справочник по древесине. Справочник/Под ред. Б. Н. Уголева.— М.: Лесн. пром-сть; 1989.
- 164 Перельгин ЛМ, Уголев БН, (Pereligin LM, Ugolev BN, ). Лесная промышленность, Wood Science (In Russian). — 288 p. 1971.
- 165 Роценс КА. Технологическое регулирование свойств древесины. Рига: Зинатне; 1979.



**Ģirts Frolovs** ir dzimis 1986. gada 28. maijā Rīgā, Latvijā. Rīgas Tehniskās universitātes (RTU) Būvniecības fakultātē 2012. gadā ieguvis profesionālo inženierzinātņu bakalaura grādu būvniecībā un būvinženiera kvalifikāciju (*B. sc. ing.*), bet 2013. gadā ieguvis profesionālā maģistra grādu būvniecībā (*Mg. sc. ing.*).

Ģirts Frolovs ir strādājis par būvinženieri gan Latvijā, gan ārpus tās, piedalījies vairāku zinātnisko projektu izstrādē. Pašreizējā darbavieta ir RTU Būvniecības un rekonstrukcijas institūts, kur strādā par pētnieku.

**Ģirts Frolovs** was born on 28 May 1986, in Riga, Latvia. He received the Professional Bachelor's degree (*B. sc. ing.*) in Civil Engineering as well as the qualification of Civil Engineer from the Department of Structural Engineering and Reconstruction of Riga Technical University (RTU) in 2012, and Master's degree in Civil Engineering (*Mg. sc. ing.*) from the Department of Structural Engineering and Reconstruction of RTU in 2013.

G. Frolovs has worked as a civil engineer in Latvia and abroad and participated in several scientific research projects. He is currently a Researcher with the Department of Structural Engineering and Reconstruction of RTU.