

# Kompozītmateriālu konstrukciju formas optimizācija ar KEDRO, ievērojot nenoteiktību

Jānis Auziņš<sup>1</sup>, Aleksandrs Januševskis<sup>2</sup>, Anatolijs Meļņikovs<sup>3</sup>, Ivo Vaicis<sup>4</sup>  
<sup>1-4</sup> Rīgas Tehniskā universitāte

**Kopsavilkums.** Šajā darbā RTU izstrādātā robustās optimizācijas programmatūra KEDRO tiek testēta, risinot divu stieņu kopnes nedeterminētu optimizācijas problēmu, un tālāk tā tiek pielietota jaunas kompozītmateriāla palešu konstrukcijas formas optimizācijai. Paletes konstruktīvās formas optimizācijas problēma vispirms tiek atrisināta determinētā nostādņē. Tālāk uzdevums tiek apskatīts kā nedeterminēts, ievērojot iespējamās nenoteiktības palešu robežnoteikumus. Nobeigumā veikta iegūto rezultātu salīdzinoša analīze un dotas konkrētas rekomendācijas palešu konstruktīvajam risinājumam.

**Atslēgas vārdi:** kompozītmateriālu konstrukcijas, metamodelēšana, robustā formas optimizācija.

## I. IEVADS

Mašīnbūves objektu formas un topoloģijas optimizācijai eksistē tādas produktīvas metodes kā pamata struktūru pieeja [1], homogenizācija [2] un vienkāršotā izotropā materiāla pieeja ar soda funkciju pielietojumu (SIMP) [3], kuras plaši tiek lietotas dažādu industriālo objektu rādītāju uzlabošanai. Kā jaunas mūsdienīgas formas optimizācijas metodes var minēt morfingu, netiešo parametrizāciju un uz CAD bāzētās ģeometrijas tiešo parametrizāciju [4]–[6]. Tomēr reālās problēmas gandrīz vienmēr ir nedeterminētas. Nenoteiktības parādās materiālu īpašību, slodžu un ģeometrijas fluktuāciju dēļ, ko izraisa ražošanas pielāides, modeļu neprecizitāte, mainīgie ārējie apstākļi un trokšņainie mērījumi. Robustās optimizācijas pieejas [7]–[10] cenšas mazināt nenoteiktību radītos efektus uz attiecīgo risinājumu kvalitāti.

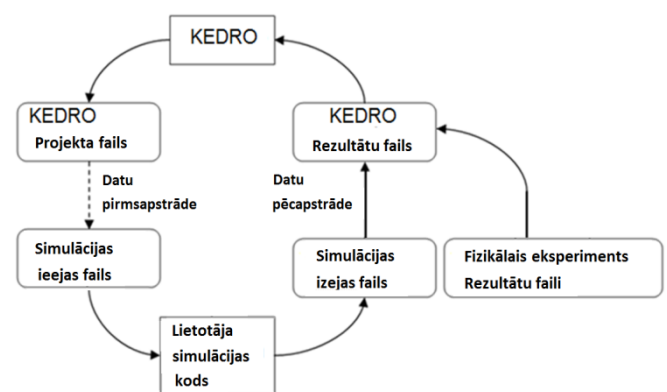
Pēdējā laikā uz CAD bāzētās ģeometrijas tiešās parametrizācijas pieeja [11] kļūst arvien efektīvāka un plaši pielietojama, pateicoties automatizētās projektēšanas programmatūras un augsti efektīvu metamodelēšanas metožu attīstībai [12]–[15]. NURBS izmantošana brīvās formas līkņu uzdošanai CAD modeļos dod arvien lielākas priekšrocības šai pieejai.

Uz krīgingu bāzētu [16], [17] metožu dažādas realizācijas ir ieguvušas plašu pielietojumu determinēto optimizācijas problēmu risināšanai. Kompozītmateriālu konstrukciju nedeterminēto optimizācijas problēmu risināšana pamatojas uz dubultā cikla pieeju, kur nenoteiktība tiek ģenerēta katrā optimizācijas iterācijā. Bieži nenoteiktības ievērtēšana dotajā punktā balstās uz metamodeļa izmantošanu, ļaujot samazināt aprēķinu laiku, bet vienlaicīgi ienesot novērtējumus papildu novirzes. Kritērija funkcijas vidējās vērtības minimizēšanai darbā [18] tiek piedāvāta krīginga procedūra, kas ļauj izmantot tikai vienu ciklu, proti, punkti tiek rēķināti, lai vienlaicīgi

ievērtētu gan nenoteiktību, gan minimizējamo kritērija funkcijas vidējo vērtību.

## II. PROGRAMMATŪRA KEDRO

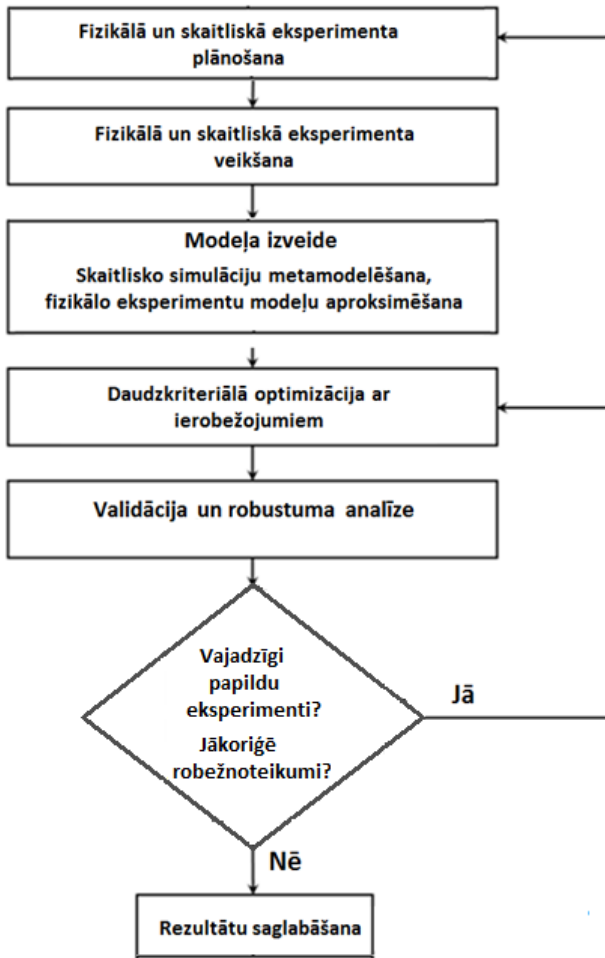
Kompozītmateriālu elementu daudzkritēriālās robustās optimizācijas programmatūra KEDRO ir izstrādāta RTU Mašīnu un mehānismu dinamikas ZP laboratorijā. KEDRO pielietojama eksperimentu plānošanai, metamodeļu būvēšanai un šo metamodeļu izmantošanai globālai optimizācijai, kā arī sistēmu parametru identifikācijai. Programmatūrā realizētas multistarta modelētās atlaidināšanas, Pareto un robustās optimizācijas stratēģijas, kas ļauj risināt jauktu diskreto un nepārtrauktu parametru nelineārās programmēšanas uzdevumus. Nenoteiktību kvantitatīvai noteikšanai var tikt izmantota Montekarlo simulācija un korelāciju analīze. KEDRO un CAE programmatūras (galvenokārt GEM, CFD un daudzu ķermeņu sistēmu dinamikas aprēķinu programmatūra) paliek pilnīgi neatkarīgas, jo informācijas apmaiņa starp tām tiek realizēta, izmantojot attiecīgi formatētus teksta failus. Informācijas aprīte starp KEDRO un modelēšanas programmatūrām un fizikālo eksperimentu iekārtām ir parādīta 1. attēlā.



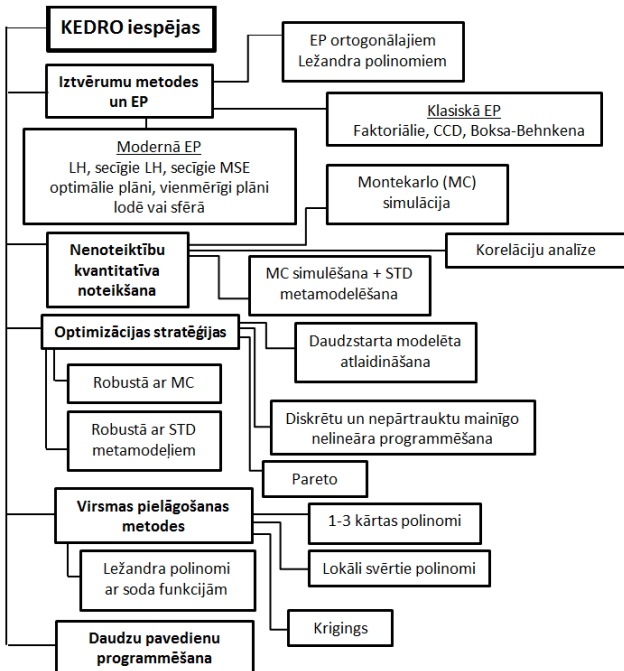
1. att. Informācijas apmaiņa starp KEDRO un lietotāja aprēķinu programmu un fizikālo eksperimentu iekārtu.

2. attēlā parādīta tipiska, uz metamodelēšanu bāzētās optimizācijas blokshēma. Katrā atsevišķā etapā var tikt lietotas dažādas optimizācijas programmatūras, bet princips paliek viens un tas pats.

3. attēlā parādītas programmatūras KEDRO galvenās iespējas uz fizikālajiem un skaitliskajiem eksperimentiem balstītai mehānisko sistēmu multikritēriālajai robustajai optimizācijai.



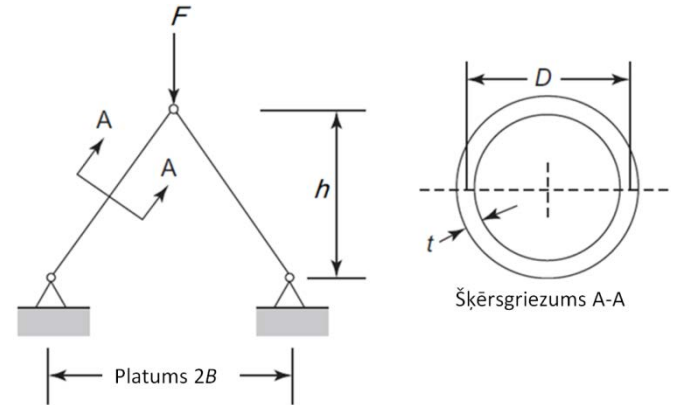
2. att. Uz metamodelēšanu bāzētas optimizācijas blokshēma.



3. att. Programmatūras KEDRO iespējas (saīsinājumi: CCD – centrālais kompozitais plāns, EP – eksperimentu plānošana, LH – Latīņu hiperkubs, MC – Montekarlo, MSE – vidējā kvadrātiskā kļūda, STD – standarta novirze).

III. DIVU STIEŅU KOPNES GADĪJUMS

Šeit tiek demonstrēts KEDRO pielietojums divu stieņu kopnes optimizācijai, kas ir iecienīts testa piemērs metamodelēšanai, optimizācijai ar ierobežojumiem un robustai optimizācijai [19].



4. att. Divu stieņu kopne.

Divu stieņu kopnes testa uzdevuma mērķis ir projektēt konstrukciju, kas sastāv no diviem cilindriskiem cauruļveida stieņiem, kuri augšpusē savienoti ar šarnīru, kā parādīts 4. attēlā. Lejup vērtais spēks  $F$  ir pielikts stieņu savienojuma vietā. Optimizācijas parametri ir stieņa diametrs  $D$  un konstrukcijas augstums  $h$ . Kritērijs ir konstrukcijas kopējais tilpums  $V$ , kurš jāminimizē. Konstrukcija var sagrūt, zaudējot noturību vai pārsniedzot stiprību raksturojošo pieļaujamo spriegumu konstrukcijas materiālā. Šos noteikumus ievēro ar attiecīgiem ierobežojumiem:

$$\min V, \text{ lai } \sigma \leq \sigma_{\max} \text{ un } \sigma \leq \sigma_{\text{krit}}, \quad (1)$$

$$D, h$$

kur  $\sigma$  ir spriegums stieņos,  $\sigma_{\max}$  ir materiāla tecēšanas spriegums un  $\sigma_{\text{krit}}$  ir noturības zaudēšanas spriegums. Šajā gadījumā var iegūt šādas vienkāršas analītiskas izteiksmes kritērija un ierobežojumu vērtību aprēķinam:

$$2\pi Dt\sqrt{B^2 + h^2}, \sigma = \frac{F\sqrt{B^2 + h^2}}{2\pi Dh}, \sigma_{\text{krit}} = \frac{\pi^2 E(D^2 + t^2)}{8(B^2 + h^2)}. \quad (2)$$

Tādējādi robustai optimizācijas veikšanai ir divi optimizācijas parametri –  $D$  un  $h$ , kā arī papildus četras fluktuējošas konstantes [20]. Šo parametru nominālās vērtības un standarta novirzes ir dotas 1. tabulā.

1. TABULA  
DIVU STIEŅU KOPNES PARAMETRI

Parametri	Nominālā vērtība	Standarta novirze
$D$ – stieņu diametrs, mm	20–80	1
$t$ – cauruļveida stieņu biezums, mm	2,5	0,1
$h$ – kopnes augstums, mm	278–936	3
$B$ – 1/2 kopnes platuma, mm	750	5
$E$ – Junga modulis, MPa	210 000	21 000
$F$ – pieliktais spēks, N	150 000	15 000
$\sigma_{\max}$ – tecēšanas spriegums, MPa	400	-----

Iegūtais uzdevuma atrisinājums determinētajā nostādņē ir  $D = 37,876$  mm,  $h = 608,89$  mm, kas dod  $V = 0,5747631$  dm<sup>3</sup>,  $\sigma = 399,99995$  N/mm<sup>2</sup>,  $\sigma_{krit} = 400,00019$  N/mm<sup>2</sup>. Lai ilustrētu metamodelēšanas iespējas, tiek veikts skaitliskais eksperiments, aprēķinot atbildes funkcijas  $V$ ,  $\sigma$ ,  $\sigma_{krit}$  atbilstoši eksperimenta plānam sešiem faktoriem. 2. tabulā parādīti faktoru apzīmējumi un variācijas diapazoni.

2. TABULA  
DIVU STIEŅU KOPNES PARAMETRI

Faktors = Parametrs	Robežas
$x_1 = D$	20–80
$x_2 = t$	2,4–2,6
$x_3 = h$	278–936
$x_4 = B$	745–755
$x_5 = E$	190 000–230 000
$x_6 = F$	120 000–150 000

Tika izmantots 111 punktu LH plāns sešiem faktoriem, optimizēts pēc MSE kritērija. „Trokšņaino” konstantu  $x_2$ ,  $x_4$ ,  $x_5$ ,  $x_6$  variācijas diapazons tika iestādīts  $\pm$  viena standarta novirze no nominālās vērtības.

Atbildes bija:  $y_1$  – spriegums  $\sigma$ ;  $y_2$  – noturības spriegums  $\sigma_{krit}$ ;  $y_3$  – tilpums  $V$ . Testu aproksimācijas kvalitāte zināmām atbildes funkcijām  $f_{test}$  tiek novērtēta ar relatīvo vidējoto prognozes kļūdu  $\sigma_{test}$  papildu pārbaudes punktos, kuri netiek izmantoti modeļa būvēšanai:

$$\sigma_{test} = 100\% \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( f_{test}(z_i) - \hat{f}_{test}(z_i) \right)^2}}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( f_{test}(z_i) - \bar{f}_{test} \right)^2}} = 100\% \sqrt{\frac{\text{Vidējā kvadrātiskā kļūda}}{\text{Dispersija}}} \quad (3)$$

kur  $z_i$  ir pārbaudes punkti ( $i = 1, \dots, N$ ),  $\hat{f}_{test}(z_i)$  ir testa funkcijas aproksimētā vērtība,  $\bar{f}_{test}$  ir testa funkcijas vidējotā vērtība pārbaudes punktos. Pētāmajā apgabalā tika izmantoti 100 tūkstoši vienmērīgi gadījuma veidā izvēlēti pārbaudes punkti (Latīņu hiperkuba iztvērums).

Visām trim atbildēm tika izmantotas kringinga aproksimācijas. Vislielākā relatīvā aproksimācijas kļūda bija pirmajai atbildei  $y_1 - 1,53\%$ . Kā redzams 5. attēlā, aprēķinātā  $y_1$  relatīvā krosvalidācijas kļūda ir 1,95 %, kas liecina, ka šī kļūda vairumā gadījumu ir pesimistiska, jo iegūtā faktiskā kļūda ir mazāka par kļūdu, kas prognozēta ar krosvalidāciju. 1,53 % ir labs rezultāts, jo, rēķinot relatīvo kļūdu uz spriegumu izmaiņu pilno diapazonu (1087 N/mm<sup>2</sup>), tā būtu tikai 0,28 %.

3. tabulā parādīti determinētās un robustās optimizācijas rezultāti precīzajam matemātiskajam modelim un kringinga metamodeļiem. Optimizācijas rezultāti, kas iegūti ar 111 mēģinājumus saturošu eksperimentu plānu sešiem faktoriem ir relatīvi tuvi tiem rezultātiem, kuri iegūti, izmantojot precīzo

matemātisko modeli. Jāatzīmē, ka starpība starp metamodeli un precīzo modeli ir mazāka par sistēmas parametru standarta novirzi.

TestSigma=1.52915901975475%

Functions Yi:	Strength	CrStrength	Volume
Method	Kriging	Kriging	Kriging
Sigma Cross	3.933738	1.758704	287.692699
Sigma Cross%	1.952612%	0.314628%	0.101197%
Sigma	0.000179	0.000002	0.022784
Sigma%	0.000089	0.000000	0.000008
Sigma0	0.000185	0.000003	0.023538
Sigma0%	0.000092	0.000000	0.000008
MeanExpVValue	384.541103	801.853137	766800.103027
StDev of Exp	201.460314	558.979362	284291.025622
Exp. Range	1087.954072	2492.878252	1224913.739257
MaxError	-0.000694	-0.000009	0.065113
Bad Point No.	82	59	84
Max Rel Error	0.00%	0.00%	0.00%
BadRelPointNo.	82	61	84
No.ofActualExp	111	111	111

5. att. Kringinga aproksimācijas rezultāti (KEDRO izdruka).

Izmantotā optimizācijas metode ir drošuma tipa optimizācija [19] un [20] un pieprasa ticamību ar 95 % varbūtību, lai tiktu apmierināti ierobežojumi (1).

3. TABULA

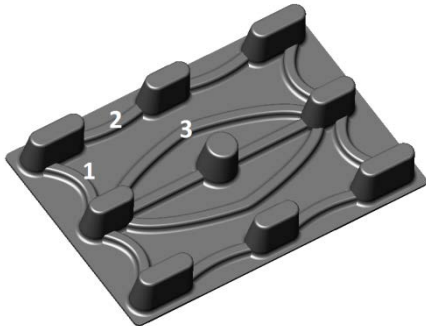
DIVU STIEŅU KOPNES OPTIMIZĀCIJA. ROBUSTĀ OPTIMIZĀCIJA  
AR 95 % TICAMĪBAS VARBŪTĪBU

	Determinētā precīzā	Robustā precīzā 95 %	Determinētā metamodeļi	Robustā metamodeļi 95 %
$D$	37,88	46,57	37,95	45,53
$h$	608,89	711,4	611,23	747
$V$	0,574763	0,756165	0,576746	0,757050
Sliktākais $V$	0,631675	0,825125	0,622671	0,815109
$\bar{\sigma}$	399,9999	297,94	399,99	481,14
5 % un 95 % procentīle $\sigma$	-----	199–400	-----	198–400
$\bar{\sigma}_{krit}$	400,00128	527	400	481
5 % un 95 % procentīle $\sigma_{krit}$	-----	384–553	-----	398–568

#### IV. PALETES FORMAS OPTIMIZĀCIJAS GADĪJUMS

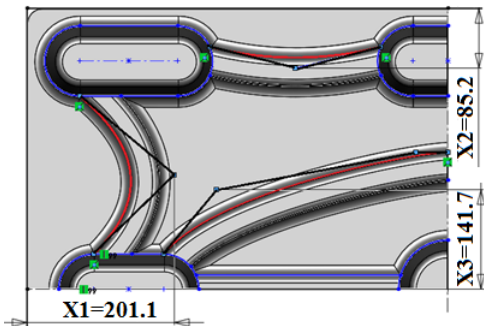
Mūsdienās koka paletes bieži tiek aizstātas ar kompozītmateriālu paletēm, jo tām ir acīmredzamas priekšrocības, proti, raksturīga augsta stiprības un svara attiecība, kompakta tukšo palešu krāvuma iespēja ligzdveida konstrukcijas dēļ, palielināts kalpošanas laiks, labāka korozijas un triecienu izturība u.c. priekšrocības. Piedāvātās jaunās konstrukcijas kompozītmateriālu paletes ar gabarītu izmēriem 1200 × 800 × 160 mm (sk. 6. attēlu) varētu tikt izmantotas automātiskajās sadales sistēmās, kur pārvietojamās kravas slodzes sasniedz 19 620 N un nepieciešamais drošības

koeficients nepārsniedz 1,3. Šim nolūkam varētu izmantot presformā izgatavotas termoformētas [22] ar šķiedrām pastiprinātas paletes no polimēra (FRP) [21] materiāla, kurām būtu atrasta trīs simetriski izvietoto stinguma ribu optimālā forma.



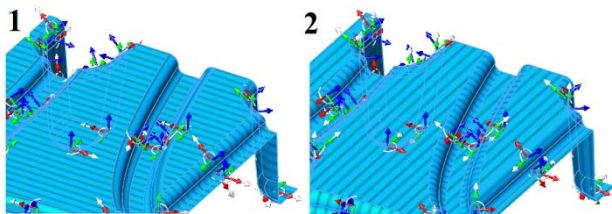
6. att. Skats no apakšas uz paletes 3D modeli ar atrasto stinguma ribu 1–3 formu.

Saskaņā ar iepriekš izstrādāto optimizācijas pieeju [23] un [18] vispirms jāizvēlas pēc iespējas mazāks parametru skaits, kas nodrošinātu pietiekami precīzu paletes stinguma ribu formas uzdošanu. Šajā gadījumā, izmantojot paletes simetrisko konstrukciju, tiek piedāvāti trīs parametri ( $X_1$ ,  $X_2$  un  $X_3$ ), kā tas parādīts 7. attēlā. Katras stinguma ribas forma tiek vadīta, uzdodot nevienmērīgo racionālo B-splainu (NURBS) daudzstūra atbalsta punktu koordinātas.



7. att. Skats no apakšas uz paletes 3D modeļa ¼ ar atrasto stinguma ribu formu aprēķina gadījumam (a)+(b) un NURBS parametrizācija.

Paletes kompozītmateriāls sastāv no diviem 3 mm bieziem FRP slāņiem, kuru īpašības uzdotas 4. tabulā. Kā redzams 8. attēlā, šķiedru virziens katrā no slāņiem ir savstarpēji perpendikulārs, nodrošinot augstu stiprību paletes plaknes abos virzienos. Paletes stiprība tiek ievērtēta ar drošības koeficientu (FOS), kuru aprēķina, izmantojot Tsai-Vu kritēriju [24], kas ir piemērotākais ortotropiem FRP materiāliem ar dažādu izturību spiedē un stiepē.



8. att. Šķiedru virziens paletes slāņos (3D modeļa ¼).

4. TABULA

FRP MATERIĀLA MEHĀNISKO ĪPAŠĪBU RAKSTUROJUMI

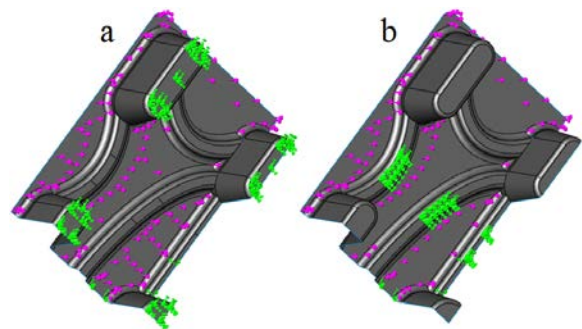
Elastības moduļi	$E_X = 40\ 000\ \text{MPa}$ ; $E_Y = 10\ 000\ \text{MPa}$ ; $E_Z = 10\ 000\ \text{MPa}$
Puasona koeficienti	$\nu_{XY} = 0,26$ ; $\nu_{YZ} = 0,25$ ; $\nu_{XZ} = 0,26$
Bīdes moduļi	$G_{XY} = 4500\ \text{MPa}$ ; $G_{YZ} = 4000\ \text{MPa}$ ; $G_{XZ} = 4500\ \text{MPa}$
Blīvums	$\rho = 1900\ \text{kg/m}^3$
Stiepes izturība	$\sigma_{XT} = 1060\ \text{MPa}$
Spiedes izturība	$\sigma_{XC} = 600\ \text{MPa}$
Bīdes izturība	$\sigma_{XY} = 70\ \text{MPa}$



9. att. Paletes modeļa ¼ tīklojums.

Paletes diskretizācijai tiek izmantoti čaulas galīgie elementi, ievērojot konstrukcijas simetriskumu un daudzslāņu struktūru (sk. 9. attēlu).

Divi galvenie slogotās paletes ekspluatācijas gadījumi tiek modelēti, proti: a) palete balstās uz cietā pamata, un b) palete atrodas uz transportlīdzekļa dakšām. Abos gadījumos kravas slodze uz paleti tiek uzskatīta par determinētu un vienmērīgi izkliedētu. Taču gadījums (b) nevar tikt uzskatīts kā determinēts, jo attālums starp pacēlāju dakšām ir mainīgs lielums un līdz ar to parādās nenoteiktība paletes atbalsta nosacījumos. Tāpēc uzdevumā (b) tiek ņemta vērā nenoteiktība paletes atbalsta noteikumos. Tiek pieņemts, ka atbalsts ir simetrisks, bet nedeterminēts, proti, atbalsta laukuma platums ir konstants, bet atbalsta vieta uz stinguma ribām ir ar normālu gadījuma rakstura izkliedi  $\pm 60\ \text{mm}$  diapazonā.



10. att. Slogotā paletes modeļa ¼ skats no apakšas atbalsta gadījumos: a) uz paletes kājām, b) uz pacēlāja dakšām.

GEA rezultāti liecina par paletes ribu formas nozīmīgu ietekmi uz tās stinguma un stiprības īpašībām (sk. 5. tabulā gadījumus (a) un (b)). Gadījumā (a) maksimālai izliecei vertikālā virzienā ir iegūta minimālā vērtība, bet gadījumā (b) iegūta lielākā FOS vērtība.

Formas optimizācijas uzdevums tiek definēts, ievērojot nepieciešamību izturēt pielikto slodžu iedarbību, proti, minimizējamais kritērijs ir paletes konstrukcijas tilpums ( $V$ ), ja ir šādi ierobežojumi: 1) gadījums (a) –  $FOS \geq 1,3$ , un 2) gadījums (b) –  $\delta_{max} \leq 3,2$  mm.

5. TABULA

PALETES GEA UN FORMAS OPTIMIZĀCIJAS REZULTĀTI

Analīzes varianti	Parametru vērtības, mm			FOS	$\delta_{max}$ , mm
	X1	X2	X3		
Gadījums (a)	110	70	130	1,54	1,5
	240	140	170	1,23	1,89
Gadījums (b)	110	70	130	1,48	4,2
	240	140	170	2,54	2,9
Gadījums (a) + (b) (formas optimizācija)	210,1	85,2	141,7	1,31	3,31

Iegūtās paletes stinguma ribu formas ir parādītas 6. un 7. attēlā, un parametri – 5. tabulā (gadījums (a) + (b)). Optimizācijas cikla laikā netiek ņemts vērā paletes izgatavošanas presformā tehnoloģiskais process, lai gan neprecīzie izmēri un materiāla īpašību fluktuācija ir neapšaubāms nenoteiktību avots. Šajā gadījumā būtu jāņem vērā papildu nenoteiktības, veicot paletes robusto optimizāciju.

## V. SECINĀJUMI

Veikta jaunas, no kompozītmateriāla veidotas paletes konstrukcijas projektēšana. Izstrādātā programmatūra KEDRO fizikālo un datoreksperimentu plānošanai, metamodeļu būvēšanai, izmantojot parametriskās un neparametriskās aproksimācijas, kā arī multikriteriālai robustai optimizācijai var tikt pielietota reālu formas optimizācijas uzdevumu risināšanai. Realizēta paletes stinguma ribu formas optimizācija kā determinētam sloģojuma gadījumam, tā arī ievērtējot nenoteiktību paletes atbalsta robežnoteikumus.

## PATEICĪBA

Darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda atbalstu projekta Nr. 2013/0025/1DP/1.1.1.2.0/13/APIA/VIAA/019 „Jaunie "gudrie" nano-kompozītie materiāli ceļiem, tiltiem, būvēm un transporta mašīnām” ietvaros.

## LITERATŪRAS SARAKSTS

- Sokół, T. and Rozvany, G. I. N. On the adaptive ground structure approach for multi-load truss topology optimization. In: *Proc. 10th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization*. May 19–24, 2013, Orlando, Florida, USA, 10 p. (CD-ROM). Available: <http://www2.mae.ufl.edu/mdo/Papers/5428.pdf>
- Bendsøe, M. P. and Kikuchi, N. Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method, *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* vol. 71 (2), 1988, pp. 197–224.
- Bendsøe, M. P. and Sigmund, O. Material interpolation schemes in topology optimization, *Applied Mechanics*, vol. 69, pp. 635–654, 1999.
- Haslinger, J. and Makinen, R. A. E. *Introduction to Shape Optimization: Theory, Approximation, and Computation*, SIAM, 2003, 273 p.
- Arora, J. S. *Optimization of Structural and Mechanical Systems*, World Scientific, 2007, 595 p.
- Vanderplaats, G. N. *Multidiscipline Design Optimization*, VR&D, 2007, 477 p.
- Haftka, R. T. and Gurdal, Z. *Elements of Structural Optimization*, 3rd ed, Springer, 1992, 481 p.
- Ben-Tal, A., Ghaoui, L. E., Nemirovski, A. *Robust Optimization*, Princeton University Press, 2009, 544 p.
- Hami, A. E. and Bouchaib, R. *Uncertainty and Optimization in Structural Mechanics*, John Wiley & Sons, 2013, 144 p.
- X. Du, and W. Chen. Towards a better understanding of modeling feasibility robustness in engineering design, *ASME J. Mech. Des.* 122, pp. 385–394.
- A. Saxena, and B. Sahay. *Computer Aided Engineering Design*, Springer, 2005, 394 p.
- T.H. Lee, and J.J. Jung. Metamodel-based Shape Optimization of Connecting Rod Considering Fatigue Life, *Key Engineering Materials*, vol. 306/308; 2006, pp. 211–216. Available: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.111.4200&rep=rep1&type=pdf>
- Simpson, T. W, Booker, A. J., Ghosh, D., et al. Approximation Methods in Multidisciplinary Analysis and Optimization: A Panel Discussion. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, vol. 27, 2004, pp. 320–313.
- D. C. Montgomery. *Design and Analysis of Experiments*, 8<sup>th</sup> ed, Wiley, 2012, 752 p.
- S. Koziel, D. E. Ciaurri, and L. Leifsson. Surrogate-Based Methods, Chapter 3, In: *Computational Optimization. Methods and Algorithms*, Springer, 2011, pp. 33–59.
- Rasmussen, C. E. and Christopher K. I. Williams. *Gaussian Processes for Machine Learning (Adaptive Computation and Machine Learning)*. The MIT Press, 2005, 248 p.
- Sacks, J., Welch, J.W., Mitchell, J. T. et al. Design and analysis of computer experiments. *Statistical Science*, 4(4), Nov. 1989, pp. 409–423.
- Janushevskis, J. and Le Riche, R. Simultaneous kriging-based estimation and optimization of mean response. *Journal of Global Optimization*, vol. 55, issue 2, Springer, 2013, pp. 313–336. Available: <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10898-011-9836-5>
- Aponte, D.S., Le Riche, R., Pujol, G. et al. An Empirical Study of the Use of Confidence Levels in RBDO with Monte-Carlo Simulations, Chapter 9. In the book: *Multidisciplinary Design Optimization in Computational Mechanics*. Edited by P. Breitkopf, R.F. Coelho, Wiley-ISTE, 2010.
- Parkinson, A.R. Balling, R., and Hedengren, J.D. *Optimization Methods for Engineering Design*. Brigham Young University, 2013.
- Rosato, D. V. and Murphy, J. *Reinforced plastics handbook*, Elsevier, 2004, 586 p.
- Davis, B., Gramann, P., Osswald, T. et al. *Compression Molding*, Hanser Publication, 2003, 196 p.
- A. Janushevskis, A., Auzins, J., Melnikovs, A. et al. *Shape Optimization of Mechanical Components of Measurement Systems*, OAB Advanced Topics in Measurements, InTech, 2012, pp. 243–262. Available: <http://www.intechopen.com/books/advanced-topics-in-measurements/shape-optimization-of-mechanical-components-for-measurement-systems>
- S. W. Tsai, and E. M. Wu. A general theory of strength for anisotropic materials. *Journal of Composite Materials*. vol. 5, 1971, pp. 58–80.

**Janis Auzins**, Dr. sc. ing., Professor, Riga Technical University. Address: 6 Ezermalas iela, Riga, LV-1006, Latvia. Phone: +371 67089396, Fax: +371 67089746. E-mail: [auzinsj@latnet.lv](mailto:auzinsj@latnet.lv)

**Alexander Janushevskis**, Dr. sc. ing., Professor, Head of the Research Laboratory for Machine and Mechanism Dynamics, Riga Technical University. Address: 6 Ezermalas iela, Riga, LV-1006, Latvia. Phone: +371 67089396; Fax: +371 67089746; E-mail: [janush@latnet.lv](mailto:janush@latnet.lv)

**Anatolijs Melnikovs**, Dr. sc. ing., researcher, Institute of Mechanics, Riga Technical University. Address: 6 Ezermalas iela, Riga, LV-1006, Latvia. Phone: +371 67089396; Fax: +371 67089746; E-mail: [Anatolijs.Melnikovs@rtu.lv](mailto:Anatolijs.Melnikovs@rtu.lv)

**Ivo Vaicis**, M. sc. ing., postgraduate student, Institute of Mechanics, Riga Technical University. Address: 6 Ezermalas iela, Riga, LV-1006, Latvia. Phone: +371 67089396; Fax: +371 67089746; E-mail: [ivovaicis@inbox.lv](mailto:ivovaicis@inbox.lv)

**Janis Auzins, Alexander Janushevskis, Anatoly Melnikovs, Ivo Vaicis. Shape optimization of composite constructions under uncertainty using KEDRO**

In this work, a brief review of modern approaches for shape optimization of mechanical systems is given. The developed methods and the appropriate software tool KEDRO for the design of experiments, for analysis and multiobjective robust optimization are considered and afterwards tested on the two-bar truss problem for deterministic case and case under uncertainty, and then applied to the shape optimization of the new composite pallet structure. In the first stage, the deterministic structural shape optimization problem of the pallet is solved. The FE-model of the composite pallet is considered and solved accurately as a multi-ply shell structure. The mechanical properties of the fiber-reinforced polymer material and two main operation cases of the loaded pallet are taken into account during the deterministic structural optimization procedure. Next, the same problem is considered as a non-deterministic one taking into account the possible uncertainties of the pallet supporting conditions. In both cases, the shape is defined using CAD-based NURBS curves. Due to the symmetry of the pallet design, the shape can be parameterized with a small number of parameters. Sensitivity analyses for probabilistic performances are given. Appropriate shapes of the pallet stiffness ribs are found for the best performance of the structure. The obtained results for the deterministic and uncertainty cases are compared, and an appropriate solution for the design of the pallet is proposed.