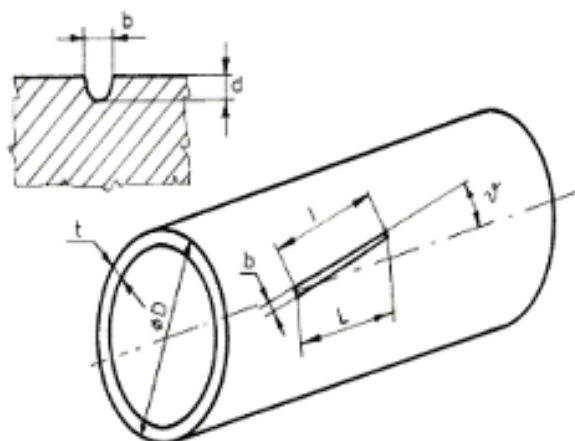


Cauruļvada ar virsmas tilpuma defektu kompozītmateriālu labošanas izpēte

Agrita Kovaļska¹, Māris Eiduks²
^{1,2}Rīgas Tehniskā universitāte

Kopsavilkums. Darbā definēts caurules virsmas tilpuma defekts un aprakstīta ekvivalentā (*Mizes*) sprieguma izmaiņa caurulē atkarībā no virsmas tilpuma defekta lieluma. Virsmas tilpuma defekta izmaiņu trijās koordinātēs raksturo izveidotais eksperimentālais plāns. Katram caurules virsmas tilpuma defekta lielumam modelētas dažāda biezuma kompozītmateriālu bandāžas. Izskaitļots ekvivalentais spriegums pie darba spiediena caurulē, izmantojot galīgo elementu metodi ANSYS programmatūrā: caurulei bez defekta, caurulēm ar dažāda izmēra virsmas tilpuma defektiem un caurulēm ar dažāda izmēra virsmas tilpuma defektiem, kas laboti ar dažāda biezuma kompozītmateriālu bandāžām. Visi iegūtie rezultāti ir aproksimēti un analizēti ar mērķi iegūt optimālo bandāžas biezumu dažādiem defekta izmēriem.

Atslēgas vārdi: kompozītmateriālu labošana, modelēšana, virsmas tilpuma defekts.



1. att. Defekta izmēri.

I. IEVADS

Var izšķirt vairākus cauruļu virsmas defekta veidus, kas radušies metāla zaudēšanas rezultātā: skrambas, koroziju iedobumi, virsmas izdiluņi, nobrāzumi, noslīpējumi, plīsumi, u. tml. [3]. Kad cauruļvads ir ekspluatācijā un uz tā virsmas kādā posmā tiek konstatēts bojājums, ir jāizanalizē ekonomiskie un citi faktori, lai izdarītu secinājumu vai cauruļvads jālabo uz vietas, neizgriežot bojātās caurules daļu. Operatoram ir pieejamas vairākas stratēģijas katram konkrētam cauruļvada remonta gadījumam [1]. Pēdējā laikā ir attīstījušās bojātu cauruļvadu labošanas tehnoloģijas ar kompozītmateriāliem [2]. Darba mērķis ir izpētīt cauruļvadu virsmas tilpuma defektu labošanu ar kompozītmateriāliem, modelējot caurules virsmas tilpuma defektu (VTD) pirms un pēc kompozītmateriālu pielikšanas, kā arī izstrādāt cauruļvada virsmas tilpuma defektu labošanas optimizācijas metodoloģiju.

II. CAURULES DEFEKTA RAKSTUROJUMS

A. Defekta parametri

Darbā aprakstīts caurules virsmas tilpuma defekts, kuram ir iedoba izstiepta elipsoīda forma.

Defekta, kas radies metāla zaudēšanas gadījumā, definēšana: defekts kā iedobums, kurš ir aptuveni paralēls caurules asij, kura projektētais garums uz aksiālo asi trīskārt pārsniedz caurules nominālo sienas biezuma vērtību un kura platums ir lielāks par 30 % no nominālā caurules sienas biezuma vērtības [3]. Maksimālais šāda iedobuma dziļums ir 80 % no caurules sienas nominālā biezuma.

Caurules virsmas tilpuma defekta izmēri parādīti 1. attēlā. Defekta definēšanai izmantotie apzīmējumi [2]:

- defekta novirzes leņķis no caurules centrālās ass v , °;
- garums, l , mm;
- projektētais aksiālais garums, L , mm;
- maksimālais platums, b , mm;
- maksimālais dziļums, d , mm.
- Ierobežojumi, kas raksturo virsmas tilpuma defektu, ir šādi (1)–(4):

$$3t < L < 10t, \quad (1)$$

$$0,3t < b < 3t, \quad (2)$$

$$0,1t < d < 0,8t, \quad (3)$$

$$v = 0^\circ, \quad (4)$$

kur t ir caurules sienas biezuma nominālā vērtība, mm.

Caurules un tās labošanā izmantojamiem kompozītmateriāliem ģeometriskie un fizikālie parametri ir konstanti, izņemot caurulei uzliekamās bandāžas sienas biezuma nominālo vērtību h (mm). Bandāžas sienas biezums ir mainīgs lielums, kas ir atkarīgs no defekta lieluma, bet tas nedrīkst pārsniegt caurules sienas biezumu. Materiālu efektīvas izmantošanas nolūkā tiek pieņemts: jo mazāka ir bandāžas sienas biezuma vērtība, jo labāk.

B. Defekta modelēšana

Eksperimentu plāna izstrādei ir izveidots tāds virsmas tilpuma defekta mainīgs modelis, kas raksturo defekta palielināšanos visās trijās koordinātēs, respektīvi, garumā,

platumā un dziļumā. Modelis raksturo defekta lineāro pieaugumu trijās koordinātēs pēc šādiem likumiem (5)–(7):

$$L_{n+1} = L_1 + 14 n, \text{ kur } L_1 = 3 t, \quad (5)$$

$$b_{n+1} = b_1 + 5,4 n, \text{ kur } b_1 = 0,3 t, \quad (6)$$

$$d_{n+1} = d_1 + 1,4 n, \text{ kur } d_1 = 0,1 t, \quad (7)$$

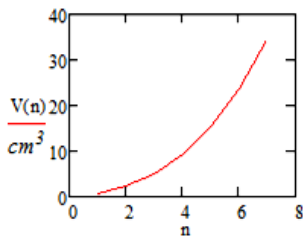
un $n \in (0,8)$.

Virsmas defekta tilpumu raksturo puse no elipsoīda (8), un metāla tilpuma zudumus aptuveni var aprakstīt ar formulu (9) [4]:

$$V = \frac{4}{3} \pi abc, \quad (8)$$

$$V_n = \frac{1}{2} \times \frac{4}{3} \pi \frac{b_n}{2} d_n \frac{l_n}{2} = \frac{\pi b_n d_n l_n}{6}. \quad (9)$$

Virsmas tilpuma defekta pieaugumu raksturo modelis 2. attēlā. Šo defekta pieauguma modeli veido trīs defekta raksturlielumu izmaiņas, kas šajā pētījumā ir uzdoti ar lineārām sakarībām (5)–(7).

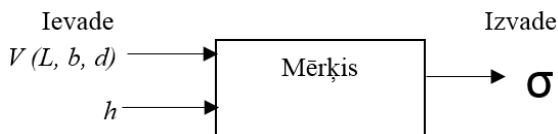


2. att. Virsmas tilpuma defekta pieauguma modelis caurulei ar ārējo diametru 1020 mm un sienas biezumu 14 mm.

III. EKSPERIMENTU PLĀNS

A. Uzdevuma nostādne

Uzdevuma formulējums ir shematiski attēlots 3. attēlā. Optimizācijas rezultātā plānots atrast minimālo spriegumu σ (MPa) uz iekšējās caurules virsmas pēc tās labošanas, uzliekot dažāda biezuma kompozītmateriālu bandāžas h (mm) atsevišķiem dažāda lieluma virsmas tilpuma defektiem $V(L, b, d)$ (mm³) [5].



3. att. Uzdevuma nostādne.

$$\sigma = f(V(L, b, d), h) \quad (10)$$

Eksperimentu plāna mērķis ir atrast likumsakarību (10) starp izeju – σ – un ieejām – $V(L, b, d)$ un h –, kas nepieciešama tālākai datu apstrādei.

B. Eksperimentu plāns

Eksperimentu plāns [5] ir apkopots 1. tabulā. Tajā iekļauti šādi dati:

- caurules ģeometriskie parametri;
- virsmas tilpuma defekta modelis, kas mainās pēc uzdotajiem parametriem (5)–(7);
- dažādi kompozītmateriālu bandāžas biezumi;
- spriegums caurules sienā bez defekta ar nominālu darba spiedienu;
- spriegums caurulei ar dažāda lieluma virsmas tilpuma defektiem ($n = 8$, kur n – dažādu defekta lielumu skaits);
- spriegums remontētai caurulei, pielietojot dažāda biezuma bandāžas.

1. TABULA
EKSPERIMENTU PLĀNS

#	Mēģinājumu skaits	
D , mm	Ārējais diametrs	
t , mm	Sienas biezums	
$3t < 1 < 10t$	1, mm	Defekta garenvirziens
$0,3t < b < 3t$	b , mm	Defekta maksimālais platumš
$0,1t < d < 0,8t$	d , mm	Defekta maksimālais dziļums
σ , MPa	Ekvivalents spriegums	
1 mm	Ekvivalents spriegums pie dažādiem bandāžas biezumiem (mm), MPa	
3 mm		
5 mm		
7 mm		
9 mm		
11 mm		
13 mm		
15 mm		

IV. GALĪGO ELEMENTU MODEĻU IZVEIDE

A. Konstruktīvie raksturlielumi

Galīgo elementu modeļu (GEM) aprēķini tika veikti atbilstoši eksperimentu plānam 1. tabulā. Tālāk parādīti elementu ģeometriskie parametri un mehāniskie raksturlielumi.

Caurule:

Ģeometriskie parametri: ārējais rādiuss $R = 0,51$ m, sienas biezums $h_c = 0,014$ m, caurules garums $l_1 = 0,2$ m.

Mehāniskie raksturlielumi: $E_1 = 200$ GPa, $\nu_1 = 0,3$, $\rho_1 = 7850$ kg/m³.

Pildviela.

Ģeometriskie parametri variējas atbilstoši eksperimenta plānā definētajiem virsmas tilpuma defekta izmēriem.

Mehāniskie raksturlielumi: $E_2 = 20$ GPa, $\nu_2 = 0,4$, $\rho_2 = 1250$ kg/m³.

Bandāža.

Ģeometriskie parametri: iekšējais rādiuss $R = 0,51$ m, bandāžas sienas biezums h – lielums mainās atbilstoši eksperimentu plānam, garums $l_2 = 0,2$ m.

Mehāniskie raksturlielumi: $E_2 = 20 \text{ GPa}$, $\nu_2 = 0,4$, $\rho_2 = 1250 \text{ kg/m}^3$.

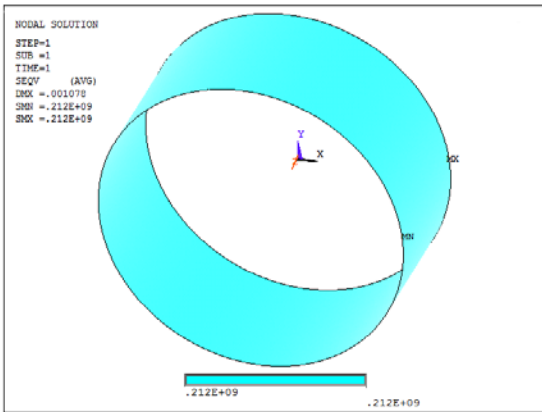
Aprēķinu vienkāršošanai stikla šķiedras auduma bandāža tiek uzskatīta par izotropu materiālu.

Par caurules iekšējo darba nominālo spiedienu tiek pieņemts spiediens 5.9 MPa.

Kā GEM tīkla elementa tips tiek pielietots *Solid95*, un visi trīs materiāli tiek savienoti ar komandu *Glue (ANSYS)*, kā arī laika ekonomijas nolūkos aprēķinos tiek modelēts caurules sektors, kam tiek pielietoti simetrijas robežnoteikumi.

Iesākumā tiek atrasti ekvivalentie spriegumi caurulei bez defektiem pie nominālā darba sprieguma. Turpmāk šis rezultāts nepieciešams kā salīdzinājums caurulei ar defektu un remontētai caurulei ar dažāda biezuma bandāžu.

No aprēķiniem redzams, ka nebojātas caurules darba spriegumi ir ap 200 MPa (skat. 3. att.), un tas ir mazāk nekā puse no pielietotā materiāla tecēšanas robežas. Līdz ar to drošības koeficients pielietotajam materiālam ir vairāk nekā 2 (atkarīgs no pielietotā materiāla īpašībām katrā atsevišķā gadījumā).



3. att. Ekvivalentie spriegumi caurulē bez virsmas tilpuma defekta.

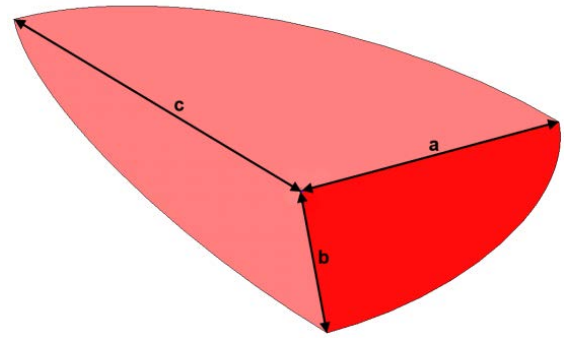
Spriegums 200–212 MPa tiks lietots salīdzināšanai ar aprēķina rezultātiem labotai caurulei ar virsmas tilpuma defektu, kur tiks mainīti ģeometriskie parametri stikla šķiedras bandāžai, kas aptīta caurules bojātai vietai.

B. Defektu raksturojošie parametri

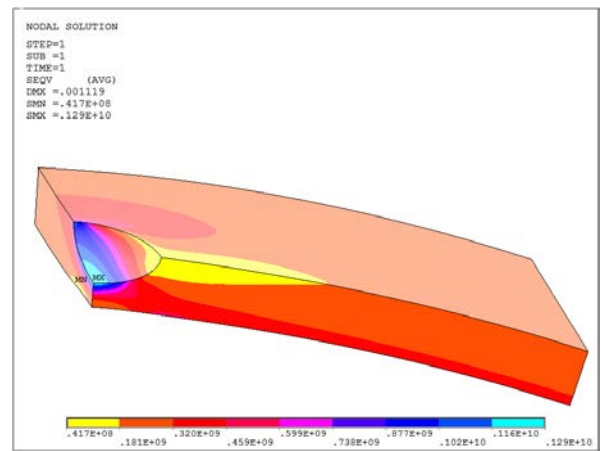
Otrais uzdevums ir radīt GE modeļus ar mainīgu virsmas tilpuma defektu. Metāla zudumi caurules ārējā virsmā tiek modelēti kā elipsoīda izgriezums, kura trīs garuma izmēri tiek mainīti atkarībā no lineāriem matemātiskiem vienādojumiem (5)–(7), kas raksturo plaisas lieluma pieaugumu. Plaisa tiek veidota elipsoidālā koordinātu sistēmā ANSYS programmatūrā, un tiek pielietotas sakarības starp defekta izmēriem, ko nosaka rādiusu attiecības (skat. 4. att.) izliekuma noteikšanai.

Kopumā izveidoti astoņi atšķirīga izmēra elipsoidāli virsmas tilpuma defekti, lietojot GEM. Viens no variantiem atainots 5. attēlā, kur redzams VTD modelis ar sienas biezuma ekvivalento zudumu 60 % no caurules sienas biezuma.

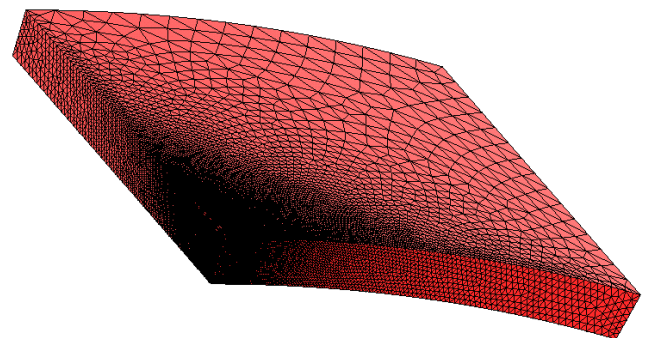
Galīgo elementu tīklojums veidots tā, lai VTD tuvumā būtu smalki elementi, bet attālinoties to attiecības palielinātos (skat. 6. att.). Tas darīts, lai ietaupītu skaitļošanas laiku.



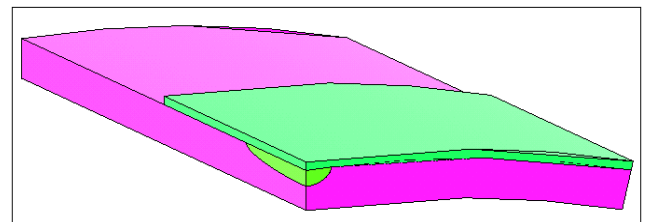
4. att. ¼ no elipsoidālās virsmas metāla zudumu tilpuma (burti atbilst parametriem).



5. att. Ekvivalento spriegumu stāvoklis vienā no VTD izmēra veidiem no eksperimentu plānā.



6. att. Elementu karte caurulei ar virsmas tilpuma defektu.

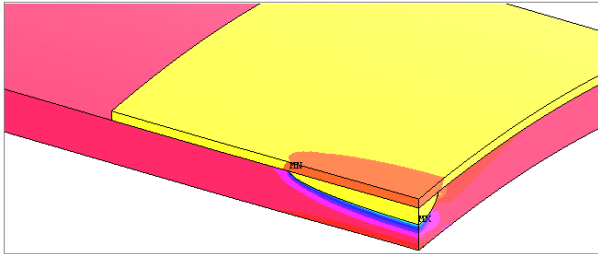


7. att. Caurules sektora modelis ar bandāžu un kavernas pildījumu bez sloģojuma.

C. Galīgo elementu modeļi

7. un 8. attēlā redzams gadījums 5 – 3, kur pirmais skaitlis apzīmē VTD izmēru no eksperimentu plāna vienādojumiem iegūtajiem izmēriem, bet otrs – pielietotās bandāžas biežumu milimetros.

7. attēlā redzamais gadījums 5 – 3 ir neslogotā stāvoklī, bet 8. attēlā – sasprīgtā stāvoklī, kur redzamas sprieguma zonas.



8. att. Ekvivalento spriegumu attēlojums gadījumam 5 – 3.

Dažādiem VTD tika pielietoti dažādi bandāžas biežumi saskaņā ar eksperimentu plānu (piemērs 9. attēlā).

Aprēķinu rezultāti ir apkopoti un liecina par to, ka biežāks bandāžas slānis samazina spriegumus remontētajā zonā. Visi rezultāti pielietojami turpmākos pētījumos.

V. REZULTĀTU APSTRĀDE

A. Ekvivalentais spriegums

10. attēlā redzams, kā ekvivalentie spriegumi mainās, pielietojot stiklaplasta bandāžu ar dažādiem biežumiem dažādu izmēru virsmas tilpuma defektiem, kamēr caurules darba spiediens paliek konstants. Atšķirīgu krāsu līnijas raksturo atšķirīgu izmēru VTD. Mazākais ir defekts Nr. 1, bet lielākais – Nr. 9. Pelēkā līnija attēlo lielāko tilpuma defektu, kas tiek labots, bet zilā līnija attēlo mazāko virsmas tilpuma defektu, kas jālabo. Iekrāsotie punkti attēlo aprēķinātos ekvivalentā sprieguma lielumus caurulei pirms un pēc tādas kompozīta bandāžas pielietošanas, kuras biežums tiek mainīts. Uz horizontālās ass attēlots bandāžas biežums. Caurules ar diviem mazākajiem aprēķinātajiem VTD saskaņā ar vienādojumiem (5)–(7) un eksperimenta plāna tabulu (1. tab.) krusto tecēšanas robežas līniju, kur pielietojamās kompozīta bandāžas biežums ir mazāks par 1 mm, un caurules bojājuma gadījumā ar lielāko VTD tecēšanas robežas līnija tiek šķērsota, kad kompozīta bandāžas biežums ir lielāks par 5 mm.

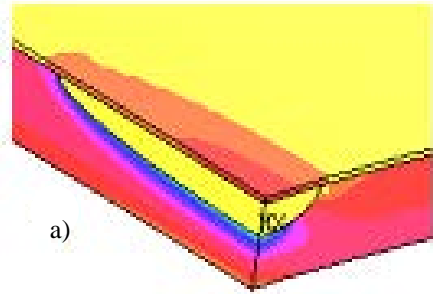
B. Ekvivalentā sprieguma aproksimācija

Iegūtie dati analīzei un optimizācijai tika aproksimēti. 10. attēlā redzamas aproksimācijas rezultātā iegūtās ekvivalentā sprieguma līknes. Tika pielietota aproksimācija ar logaritmisku funkciju, iegūstot pietiekami labu rezultātu. Pielietota šāda aproksimācijas funkcija:

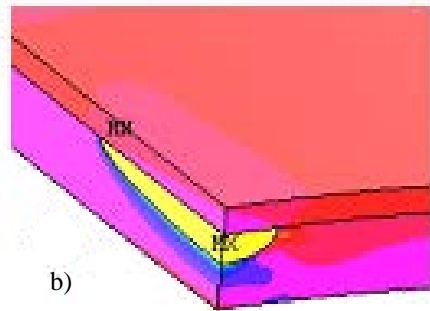
$$\sigma(h) = \sigma_1 - C \cdot \ln(h) \tag{11}$$

kur $\sigma_1 = \sigma(h_1)$ ir ekvivalentais spriegums ar kompozītu labotā caurulē ar bandāžas biežumu 1 mm; C ir konstante, kas atkarīga

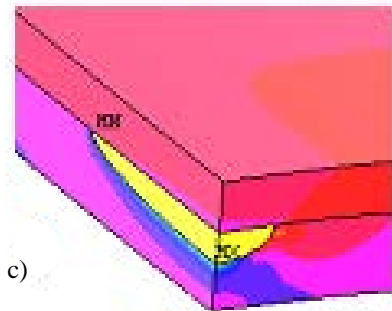
no kompozītmateriāla īpašībām un VTD (konstante katrā gadījumā ietilpa diapazonā (65; 83) modelētās konfigurācijās); h – pielietotās kompozīta bandāžas biežums.



a)

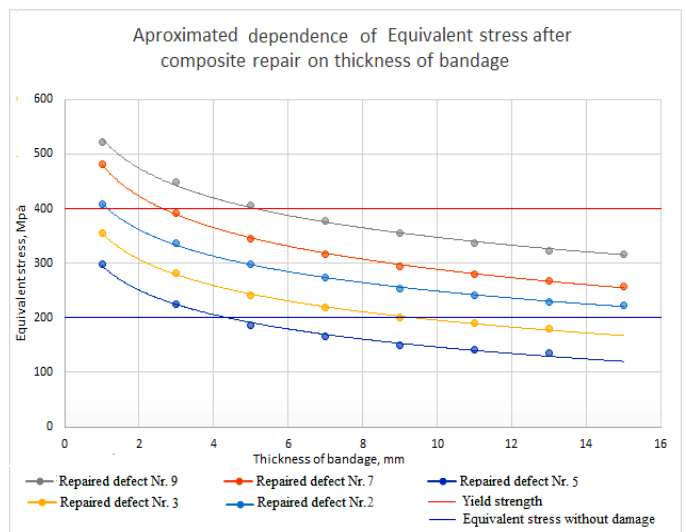


b)



c)

9. att. Bandāžas biežuma pieauguma vizualizācija viena veida VTD; biežumi: a) 1 mm, b) 5 mm, c) 9 mm.



10. att. Aprēķinu rezultātu aproksimācijas rezultātā iegūtās ekvivalento spriegumu atkarības no bandāžas biežuma līknes katram VTD.

10. attēlā redzams, ka nebojātas caurules ekvivalento spriegumu stāvokli pēc remonta var sasniegt pirmajiem diviem modelētajiem VTD. Lielākā defekta gadījumā – Nr. 9 – tecēšanas robeža tiek sasniegta ar 5 mm bandāžas biezumu. Tiek ņemta vērā ģeometrisko parametru, materiālu īpašību un materiāla spriegumstāvokļa ietekme uz VTD.

VI. SECINĀJUMI

Tika modelēts optimālais kompozīta bandāžas biezums un tika meklēta sakarība starp virsmas tilpuma defekta lielumu un iespēju radušos bojājumu novērst, remontējot cauruļvadus ar kompozīta bandāžas pielietošanu. Izveidota optimizācijas metodoloģija kompozīta bandāžu pielietošanai cauruļvadu virsmas tilpuma defektu remontam, kas varētu līdzēt inženieriem izlemt, vai veikt remontu ar šādu metodi vai arī neveikt. Aproximācijas rezultātā iegūtās ekvivalento spriegumu līknes 10. attēlā rāda bandāžas biezuma ietekmi uz remontējamo cauruli.

Turpmākajos modeļos varētu tikt analizēts gadījums, kad plaša nav paralēla caurules garenvirzienam, un arī izdarīt pieņēmumus par atbilstoša drošības koeficienta pielietošanu.

PATEICĪBA

Autori saka paldies par atbalstu Eiropas Komisijas *Marie Curie* programmai, līguma Nr. PIRSES-GA-2012-318874, projekts “*Innovative Non-Destructive Testing and Advanced*

Composite Repair of Pipelines with Volumetric Surface Defects (INNOPIPES)” [5].

LITERATŪRAS SARAKSTS

1. Bruce, B., Amend, B., Advantages of steel sleeves over composite materials for pipeline repair *Pipelines international*, ISSUE 008 http://pipelinesinternational.com/news/advantages_of_steel_sleeves_over_compo_site_materials_for_pipeline_repair/061223/
2. itconsult-eu.de
3. Hashem El-Sayed A.A., PE 607: *Oil & Gas Pipeline Design, Maintenance & Repair*, Pieejams: <http://www.eng.cu.edu.eg/users/aelsayed/Part%209%20Pipeline%20defects.pdf>
4. Olver, F. W. J., Lozier, D. W., Boisvert, R. F., and Clark, C. W., editors, *NIST Handbook of Mathematical Functions* (Cambridge University Press), 2010. Pieejams: <http://dlmf.nist.gov/19.33>
5. Kovalska, A., Barkanov, E., Eiduks, M. Development of experimental optimization methodology for the pipelines repairing by using advanced composite materials. In: *VII Vserossijskaja konferencija po mehanike deformirujemogo tvjordogo tjela*, 15–18 October, 2013, Rostov-na-Dony, p. 155.
6. Auziņš, J., Januševskis, A. Eksperimentu plānošana un analīze. Rīga, RTU, 2007., 256 lpp.

Agrita Kovaļska, *Dr. sc. ing.*, Assistant Professor, Institute of Mechanics, Riga Technical University. Address: 6 Ezermalas iela, Riga, LV-1006, Latvia. Phone: +371 67089396; Fax: +371 67089746; E-mail: agritakovalska@inbox.lv

Māris Eiduks, *M. sc. ing.*, lecturer, Institute of Mechanics, Riga Technical University. Address: 6 Ezermalas iela, Riga, LV-1006, Latvia. Phone: +371 67089396; Fax: +371 67089746; E-mail: maris.eiduks@rtu.lv

Agrita Kovaļska, Māris Eiduks. Investigation of composite repair of pipelines with volumetric surface defect

There are different kinds of pipe defects resulting in metal loss – such as scars, corruptions, pitting, abrasion, grinding off, rupture, puncture or leak, etc. When areas of corrosion or other damage on operating pipelines are identified, there are significant economic and environmental incentives for performing repair without removing the pipeline from service. The paper describes equivalent stress change of the pipe with longitudinal volumetric form defect on pipe surface – approximated as half of ellipsoid. Volumetric surface defect is modeled with three variable parameters. The optimal experiment design is created to analyze the increase in defect. Different thicknesses of applied bandages for each size of the modeled volumetric surface defect are created. The calculation results were collated and it was found that the thicker layer of bandages reduces stress in the repaired area. All results are applicable for further research. The equivalent stress for working pressure is numerically calculated using ANSYS software in the pipes without defect, with defect, and after composite repair with varying thickness of the bandage for different sizes of defect. All results are approximated and analyzed. Optimization methodology is created for the application of composite bandages on the pipelines with volumetric surface defect. Used calculations can be employed for a situation when volumetric surface defect is not parallel to the longitudinal direction of the pipe, as well as to make assumptions about a proper use of safety factors.