

RIGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE
Būvniecības fakultāte
Būvniecības un rekonstrukcijas institūts

Andris Baikovs

KOMPOZĪTO KOKSNES KONSTRUKCIJU
ELEMENTU ŠĶŪDE LIECĒ

Būvzinātņu nozare, Būvkonstrukcijas apakšnozare (P-06)

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs
Dr.habil.sc.ing., profesors
Kārlis Rocēns

Rīga 2011

UDK 624.016+539.376](043.2)
Ba 201 k

Baikovs A. Kompozīto koksnes
konstrukciju elementu šļūde liecē.
Promocijas darba kopsavilkums.-
R.:RTU, 2011.-19. lpp.

Iespiests saskaņā ar promociju
padomes „P-06” 2011.gada 1.jūlija
lēmumu, protokols Nr.7-2011

ISBN 978-9984-49-337-4

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS INŽENIERZINĀTŅU BŪVZINĀTŅU DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2011.gada 11.novembrī Rīgas Tehniskās universitātes Būvniecības fakultātē, Āzenes ielā 16, sēžu zālē plkst.14:30.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Prof. Dr.hab. sc.ing. Henn Tuherm,
Latvijas Lauksaimniecības universitāte

Prof. Dr.hab. sc.ing. Ivars Knēts,
Rīgas Tehniskā universitāte

Prof. Dr.sc.ing., Ainārs Paeglītis
Rīgas Tehniskā universitāte

APSTIPRINĀJUMS

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

Andris Baikovs(Paraksts)

Datums: 2011.gada 27.jūnijs

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, satur ievadu, 5 nodaļas, secinājumus, literatūras sarakstu, 23 tabulas, 51 attēlu un ilustrācijas, kopā 110 lapas. Literatūras sarakstā ir 64 nosaukumi. Šis darbs ir izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda atbalstu Nacionālās programmas „Atbalsts doktorantūras programmu īstenošanai un pēcdoktorantūras pētījumiem” projekta „Atbalsts RTU doktorantūras attīstībai” ietvaros.



DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS

Tēmas aktualitāte

Pašlaik plātnes, kas ražotas no kokskaidām, kokšķiedrām vai lobskaidām plaši tiek izmantotas mazstāvu būvniecībā. Šādu materiālu ražošanā iespējams plaši lietot mazvērtīgu koksni un kokapstrādes rūpniecības atliekas, tādā veidā atbalstot zaļo jeb ilgtspējīgo būvniecību, kas balstīta uz maksimāli dabu saudzējošu dzīves vides radīšanu. Viens no zaļās būvniecības pamatprincipiem ir izmantot celtniecības materiālus, kas iegūti no atjaunojamiem resursiem, piemēram, koksnes, kā arī no atkārtoti pārstrādātiem neatjaunojamiem resursiem – plastmasas. Dzīves cikla perspektīvā koksne kā celtniecības materiāls ir videi izdevīga izvēle, jo ekologu vidē pastāv uzskats, ka viens no lielākajiem draudiem mūsdienu sabiedrībai ir klimata izmaiņas, ko izraisa siltumnīcas efektu veicinošās gāzes, piemēram, oglekļa dioksīds CO₂; savukārt koksnes produkti un koka ēkas uzglabā oglekļa dioksīdu ilgākā laika posmā - izmantojot daļu nojaucamo ēku koksnes elementu enerģijas ieguvei, klimatu ietekmējošo gāzu apjomu var ievērojami samazināt, jo tie aizstāj fosilās degvielas, piemēram, naftas, izmantošanu.

Meklējot konstruktīvi no materiālu patēriņa viedokļa labākus un estētiski pievilcīgākus risinājumus dažādu konstrukciju izbūvei, arvien biežāk tiek pielietoti slāņaini nestandarta izliekti-ieliekti elementi. Projektējot dažādu slāņainu koksnes kompozītmateriālu elementus atkarībā no tiem pieliktajām slodzēm un ekspluatācijas apstākļiem, atsevišķos gadījumos ir racionāli izveidot to vidusdaļā slāni, kas sastāv no salīmētām kokskaidām vai sašķiedrotām kokapstrādes rūpniecības atliekām, tādējādi paaugstinot koksnes lietderīgas izmantošanas pakāpi. Koksnes kompozīto materiālu racionāla lietošana konstruktīvajos elementos rada nepieciešamību veidot šo materiālu struktūru atbilstoši mehāniskajām, mitruma un temperatūras iedarbēm gan materiāla izgatavošanas tehnoloģiskā procesa laikā, gan ekspluatācijas perioda laikā. Līmēto koksnes konstrukciju elementu, kā arī to bīstamo šķēlumu pastiprināšanas efektivitāte ar moderniem kompozītmateriāliem ir pamatota virknē pētījumu, bet nepietiekami ir rezultāti par šādu konstrukciju elementu darbu ilgstoša slogojuma gadījumā, šī problēma ir īpaši svarīga tāpēc, ka kompozīto koksnes konstrukciju elementiem noteicošās nav pārbaudes uz stiprību, bet gan pārbaudes uz deformējamību, jo deformācijas šiem elementiem no slodzes pieaug arī laikā (šļūde).

Tāpēc ir aktuāli kvalitatīvi un kvantitatīvi ievērot materiāla un tā atsevišķo sastāvdaļu darba īpatnības dažādu slodžu un iedarbību apstākļos. Diemžēl dažādiem koksnes kompozītmateriāliem ilglaicīgās slodzes iedarbības ietekme tiek modelēta atšķirīgi, tāpēc analizējot slogotu koksnes kompozītmateriālu elementu (siju, plātņu, čaulu) darbu ilglaicīga slogojuma apstākļos nepieciešams izstrādāt vienkāršotu šļūdes deformāciju prognozēšanas metodi lietojamu dažādiem koksnes kompozītmateriāliem.

Darba mērķis

Izstrādāt aprēķina metodikas koksnes kompozītmateriālu deformāciju aprēķinam liecē, novērtējot mitruma izsaukto deformāciju ietekmes ierobežošanas iespējas un ilglaicīgas slodzes iedarbību, un salīdzināt rezultātus ar eksperimentāliem, kas iegūti ilglaicīgi slogojot liektus elementus.

Pētījumu uzdevumi

- Izstrādāt aprēķina modeli mitruma izraisīto deformāciju un liekuma rādīšu prognozēšanai izliekti ieliektiem elementiem, kuri mitruma deformāciju ierobežošanai pastiprināti ar stiklaplastu.
- Izstrādāt aprēķina metodiku koksnes kompozītmateriālu elementu šļūdes deformāciju aprēķinam liecē, izmantojot lineāri elastīgi-viskoza materiāla deformēšanās likumu diferenciālvienādojuma formā, kas papildināts ar Ogarkova piedāvāto šļūdes līknes formas koeficientu α (turpmāk tekstā „papildinātais reoloģiskais vienādojums”)
- Salīdzināt eksperimentāli iegūtos rezultātus, kas iegūti slogojot ar laikā nemainīgu slodzi koksnes siju, „dubult-T” profila siju ar saplākšņa sienīņu, „dubult-T” profila siju ar skaidu plātes sienīņu un koksnes brusu plauktiem, saplākšņa plātni, skaidu plātni ar analītiskajiem rezultātiem, kas aprēķināti izmantojot izstrādāto aprēķina metodiku un citus izplatītākos lineāri elastīgi-viskoza materiāla deformēšanās likumus.
- Izstrādāt aprēķina modeli mitruma izmaiņu rezultātā izliekti-ieliektam slāņaina koksnes kompozītmateriāla elementa deformāciju prognozēšanai ievērtējot laika faktoru.

Darba zinātniskā novitāte

- Izstrādāts aprēķina modelis, liekuma rādīšu un garendeformāciju noteikšanai mainīga mitruma apstākļos, sākotnēji izliekti-ieliektam elementam, kas sastāv no ortotropiem slāņiem, ja sākotnējās formas saglabāšanai pielietotas abpusējas stiklaplasta uzlīmes.
- Izstrādāta aprēķina metodika liektu slāņainu koksnes kompozītmateriālu konstrukciju elementu faktiskās darbības prognozēšanai ilglaicīgas laikā nemainīgas slodzes apstākļos (šļūde).
- Izstrādātās šļūdes deformāciju aprēķina metodikas aprobācija salīdzinot aprēķinātos un ar laikā nemainīgu slodzi slogotu konstrukciju elementu eksperimentāli iegūtos rezultātus.
- Noskaidrots, ka ar izstrādāto metodiku iespējams aprēķināt deformācijas ar laikā nemainīgu slodzi slogotiem dažādiem koksnes kompozītmateriālu elementiem – sijām un plātnēm.

- Noskaidrots, ka veselai grupai koksnes materiālu elementu vislabāk šļūdes deformācijas liecē var aprakstīt izmantojot „papildināto reoloģisko vienādojumu”, kura koeficienti noteikti pēc „izstrādātās metodikas”.

Darba praktiskā vērtība

Piedāvāts paņēmieni izliekti-ieliektu lokšņu formas saglabāšanai izmantojot stiegrotu plastika pastiprinājumu, un šim nolūkam izstrādāta un eksperimentāli pārbaudīta lietošanā ērta ilglaicīgo deformāciju prognozēšanas metode ar laikā nemainīgu slodzi slogoziem slāņainiem izliekti ieliektiem, sijveida un plātņveida elementiem, šļūdes deformāciju prognozēšanai, ievērtējot katra atsevišķā slāņa reoloģiskos raksturlielumus. Izstrādāts šļūdes deformāciju aprēķina modelis vairākslāņu elementiem, kas dod iespēju ar GEM palīdzību operatīvi noteikt šļūdes deformācijas.

Aizstāvēšanai izvirzītie pētījumu rezultāti

- Izstrādāts aprēķina modelis izliekti-ieliektu slāņainu plātņu liekuma rādiusu noteikšanai mainīga mitruma apstākļos, ja plātne mitruma deformāciju ierobežošanai pastiprināta ar stiklaplastu.
- Šļūdes līknes formas koeficienta, relaksācijas laika un ilglaicīgā elastības moduļa noteikšanas metodika „papildinātajam reoloģiskajam vienādojumam”.
- Noskaidrots, ka lietojot „izstrādāto metodiku” eksperimentālo rezultātu, kas iegūti ilglaicīgi liecē slogojot ar laikā nemainīgu slodzi dažādus koksnes konstrukciju elementus - siju, skaidu plātņi, saplākšņa plātņi, saliktu dubult-T profila siju ar skaidu plates sienīņu un koksnes brusu plauktiem un saliktu dubult-T profila siju ar saplākšņa loksnes sienīņu un koksnes brusu plauktiem, aprakstīšanai, atšķirība starp dažādu koksnes materiālu elementu eksperimentāli noteiktajiem un aprēķinātajiem rezultātiem, izmantojot „papildināto reoloģisko vienādojumu”, kura koeficienti noteikti pēc „izstrādātās metodikas”, vidēji ir mazāka kā izmantojot lineāri elastīgi-viskoza materiāla deformēšanās likumu diferenciālvienādojuma formā vai „papildināto reoloģisko vienādojumu”.
- Aprēķina modelis mitruma izmaiņu rezultātā izliekti-ieliekta slāņaina koksnes kompozītmateriāla elementa deformāciju prognozēšanai ievērtējot laika faktoru, ja tas pastiprināts vienā no pusēm vai abās.

Darba sastāvs un apjoms

Promocijas darbs sastāv no ievada, 5 nodaļām, secinājumiem un publikāciju saraksta. Darba apjoms: 110 lappas, 51 attēli, 23 tabulas, literatūras saraksts, kas satur 64 nosaukumus.

Darba aprobācija un publikācijas

Promocijas darba rezultāti ziņoti un apspriesti šādās starptautiskajās konferencēs:

- 13.starptautiskā konference „Mechanics of composite materials”, (Jūrmala, 2004.g. aprīlis).
- RTU 45. starptautiskā zinātniskā konference (Rīga, 2004. g. oktobris).
- 5.starptautiskā DAAAM konference „Industrial engineering - adding innovation capacity of labour force and entrepreneurs” (Tallina, Igaunija 2006.g.aprīlis)
- 14.starptautiskā konference „Mechanics of composite materials”, (Jūrmala, 2006.g. jūnijs).
- RTU 50.starptautiskā zinātniskā konference (Rīga, 2009. g. oktobris).
- Starptautiskā konference “Stability and Ductility of Structures” (Viļņa, Lietuva 2009.g.septembris)

Galvenie darba rezultāti izklāstīti 5 publikācijās:

1. A.Baikovs, K.Rocēns. Behavior of the timber beams strengthened with carbon fiber strips. - RTU Zinātniskais rakstu krājums Arhitektūra un Būvzinātne. Sērija 2, sējums 5. Rīga, 2004, 77.-88.lpp.
2. A.Baikovs, K.Rocēns. Stability of the shape of anticlastic composite material sheet under variable moisture conditions. - Proceedings of the 5th International Conference of DAAAM Baltic, INDUSTRIAL ENGINEERING - ADDING INNOVATION CAPACITY OF LABOUR FORCE AND ENTREPRENEURS. Tallin University of Technology, 2006, pp.239-244.
3. A.Baikovs, K.Rocēns. Creep approximation method for bent wood material elements. - RTU Zinātniskais rakstu krājums Construction science. Sērija 2, sējums 9. Rīga, 2008, pp.6-15.
4. A.Baikovs, K.Rocēns. Prediction of the shape changes of hybrid laminated composite material sheet. - RTU Zinātniskais rakstu krājums Construction science. Sērija 2, sējums 10. Rīga, 2009, pp.6-15.
5. A.Baikovs, K.Rocēns. Prediction of the anticlastic shape changes of hybrid composite material - Journal of Civil Engineering and Management - Gediminas Technical University, Vilnius, Lithuania, 2010, pp.222-229

DARBA SATURS

Pirmajā nodaļā aprakstīta pašreizējā situācija kompozīto koksnes materiālu un elementu projektēšanas jautājumos, minētas visbiežāk izmantotās šļūdes deformāciju aprēķinu metodes, uzskaitītas to priekšrocības un trūkumi. Šajā nodaļā apskatīti nozīmīgākie koksnes, slāņainās koksnes un skaidu plātņu darbu ietekmējošie faktori - mitruma izmaiņas, sasilšana, atdzišana, un galvenokārt mehānisko slodžu iedarbība, kas izraisa koksnes formas izmaiņas. Lai iegūtu reālajai situācijai atbilstošu koksnes kompozītmateriāla elementa aprēķina modeli ir jāņem vērā koksnes sastāvdaļu (dēļu, lobskaidu, koksnes skaidu) orientācija elementā, gabarītizmēri, gabarītizmēru proporcijas, koksnes sablīvējums, mitruma saturs, saistvielas saistes īpašības, saķeres garums, koksnes piesūcinājums ar saistvielu vai kādu citu ķīmisku vielu un slodzes pielikšanas ilgums, jo koksne ir pieskaitāma pie materiāliem ar reoloģiskajām īpašībām, kura deformācijas ir atkarīgas ne tikai no slodzes pielikšanas ilguma, bet arī no noslogošanas ātruma. Sakarības starp spriegumiem un deformācijām, materiālam ar reoloģiskajām īpašībām, tiek noteiktas ar tā sauktajiem reoloģiskajiem vienādojumiem, kuras vairumā gadījumu apraksta izmantojot diferenciālvienādojumus. Koksnes deformatīvo īpašību aprakstīšanai bieži izmanto pirmās kārtas lineāro diferenciālvienādojumu, tā saukto lineāri elastīgi-viskoza materiāla deformēšanās likumu diferenciālvienādojuma formā [Ржаницин А. Р., 1958], kas ir sakarība starp momentāno elastības moduli E , ilglaicīgo elastības moduli H , relaksācijas laiku n , deformācijām ε un spriegumiem σ . Taču šis diferenciālvienādojums virknē gadījumu nepilnīgi apraksta eksperimentu rezultātus. Tā kā patiesais koksnes materiālu un elementu šļūdēšanas spriegumstāvoklis ir sarežģīts un šļūdes līknes raksturs dažādiem koksnes kompozītmateriāliem var būt dažāds, tad vispareizāk šļūdes līknes raksturu tomēr būtu precizēt izmantojot eksperimentālos rezultātus, kuru aproksimācijas nepilnības var ievērojami samazināt, izmantojot Ogarkova piedāvāto [Огарков Б.И., 1957] „papildināto reoloģisko vienādojumu”, kas satur šļūdes līknes formas koeficientu α , ar kura palīdzību ir iespējams ievērojami mainīt līknes raksturu. Šajā gadījumā iegūstam sekojošu diferenciālvienādojumu:

$$nE\dot{\varepsilon} + \alpha H\varepsilon \left[\left(\frac{t}{n} \right)^{1-\alpha} \right]^{-1} = n\dot{\sigma} + \alpha\sigma \left[\left(\frac{t}{n} \right)^{1-\alpha} \right]^{-1}, \quad (1.1)$$

Izvērtējot pieejamo literatūru secināts, ka slāņaina materiāla īpašību aprēķinam jau ir izstrādāti vairāki aprēķina modeļi, arī modificētas koksnes specifisko īpašību ievērtēšana ir aprakstīta vairākos darbos, tāpēc šiem jautājumiem darbā nav pievērsta uzmanība, savukārt secināts, ka nav universālas aprēķina metodes dažāda tipa liektu koksnes kompozītmateriāla elementu šļūdes deformāciju prognozēšanai. Tāpēc izvēlētie pētījuma virzieni ir sekojoši:

- izstrādāt universālu aprēķina metodi ilglaicīgo deformāciju prognozēšanai dažāda veida izliekti ieliekti elementi – sijām, plātnēm

un čaulām;

- izstrādāt aprēķina metodiku, ilglaicīgi ar nemainīgu slodzi slogotu elementu deformāciju aprēķinām, kuras pielietošanai būtu nepieciešami kompozīta komponentu eksperimentāli iegūtie rezultāti tikai pāris laika momentos.

Otrā nodaļa ir veltīta aprēķina modeļa izstrādei, ar kura palīdzību paredzēts prognozēt liekuma rādīšus un garendeformāciju izmaiņas, ieliekti-izliektam elementam, kas sastāv no lineāri elastīgiem ortotropiem slāņiem, aprēķinā par pamatu ņemot slāņaino materiālu mehānikas pamatnostādnes. Ar izstrādāto aprēķina modeli nosakāms divpusēji uzlīmēto stikla plastika uzlīmju biežums, kas ierobežo ieliekti-ieliektās loksnes deformācijas laika gaitā mainoties mitrumam. Aplūkots gadījums, kad mitruma saturs visiem elementa slāņiem ir vienāds pie jebkurām mitruma izmaiņām. Mainoties mitrumam, slāņainā elementa formas stabilitātes raksturlielumu noteikšana tiek veikta vairākos etapos. **Pirmajā etapā** nosaka, kādai jābūt mitruma izmaiņai $\Delta\tilde{W}$, lai ieliekti-izliektais nepastiprinātais kompozītmateriāla elements iztaisnotos. Tiek pieņemts, ka ieliekti-izliektai loksnei abi liekuma rādīši mainoties mitrumam praktiski vienlaicīgi kļūst par ∞ . Aprēķinu veic, piemeklējot attiecīgo mitruma izmaiņu (samazinot mitrumu līdz izliekti-ieliektas kompozītmateriāla elements iztaisnojas) vai arī zinot noteiktu mitruma izmaiņu, kura jau radījusi plakana kompozītmateriāla plātnei vajadzīgo izliekumu. Galarezultātā pirmajā etapā tiek iegūta garendeformācijas $\hat{\varepsilon}$ vērtība.

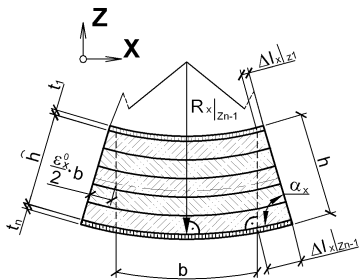
Lai aprēķinātu pastiprinātās plātnes garendeformācijas ε_n , kas radušās mitruma izmaiņu $\Delta W = \Delta\tilde{W} - \Delta\tilde{W}$ rezultātā, kuras tika noteiktas pirmajā etapā, **otrajā etapā** nosacīti tiek aplūkota pastiprināta plātne bez sākuma izliekumiem, kas pakļauta mitruma iedarbībai $\Delta\tilde{W}$.

Trešajā etapā tiek noteiktas rezultējošās garendeformācijas ε_n izliekti-ieliektam elementam, kurš bija pakļauts mitruma iedarbībai un mainīja mitruma saturu par ΔW , pēc sakarības:

$$\varepsilon_{n-1} = \hat{\varepsilon}_n - \tilde{\varepsilon}_{n-1} \quad (2.1)$$

Lai noteiktu liekuma rādīšus plātnes augšējai un apakšējai plaknei, tiek sastādīta vienādojuma sistēma, kuras pamatā ir sakarība starp taisnleņķa trijstūra leņķi un malām (skat.2.1.att.), no kuras tiek izteikts plātnes apakšējās plaknes liekuma rādīšs $R_x|_{z_{n-1}}$ (2.2). Plātnes izliekuma rādīšus $R_x|_{z_{n-1}}$ un $\tilde{R}_x|_{z_n}$ starpība raksturo pastiprinājuma ietekmi pie noteiktas mitruma izmaiņas. Analogas sakarības izmanto aprēķinot liekuma rādīšus $R_y|_{z_{n-1}}$.

Veikta izstrādātās metodes aprobācija - aprēķināts ortotropa kompozītmateriāla elements, kas sastāv no piecām, savā starpā salīmētām, koksnes lobskaidām, kuru garenšķiedras pagrieztas 90° grādu leņķī pret

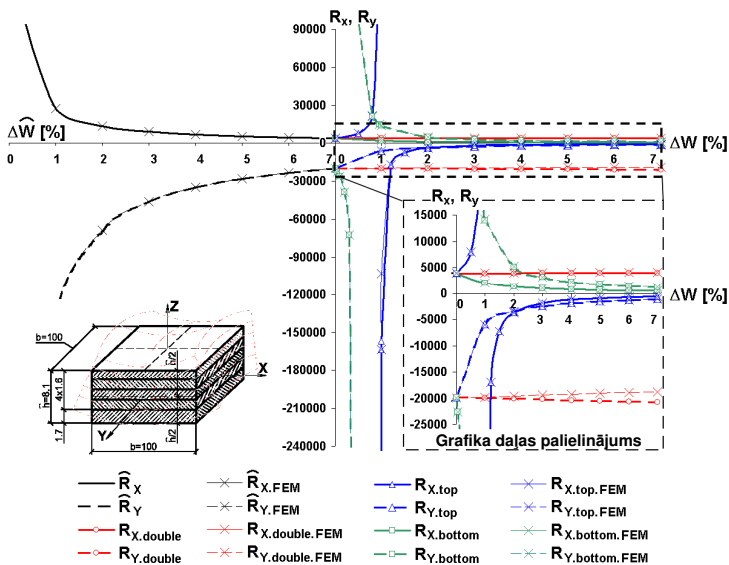


$$R_x|_{z_{n-1}} = \frac{\bar{h} \cdot (\frac{b}{2} + \Delta l_x|_{z_{n-1}})}{\Delta l_x|_{z_{n-1}} - \Delta l_x|_{z_1}} \quad (2.2)$$

$$\Delta l_x|_{z_n} = \varepsilon_x|_{z_n} \cdot \frac{b}{2} \quad (2.3)$$

2.1.att. Pastiprināta elementa liekuma rādiusa aprēķina shēma plaknē XZ

blakus esošo koksnes lobskaidu garenšķiedrām (90°/0°/90°/0°/90°). Par pastiprinājumu izmantota stikla šķiedras loksne ar divos virzienos orientētām šķiedrām un epoksīdu sveķu saistvielu (turpmāk GFRP). GFRP pastiprinājuma stinguma raksturlielumi ņemti no [Kelly A., Cahn R.W., Bever M.B., 1995]. Aprēķinātas liekuma rādiusu vērtības atkarībā no mitruma izmaiņām samazinoties kompozītmateriāla loksnes mitrumam no 17 līdz 10 % un iegūtie rezultāti salīdzināti ar rezultātiem, kas iegūti izmantojot galīgo elementu metodi ar datorprogrammu ANSYS v.11 (turpmāk GEM) (skat.2.2.att.).



2.2.att. Ieliekti-izliektas nepastiprinātas slāņainas kompozītmateriāla loksnes (kreisajā pusē) un pastiprināta elementa (kreisajā pusē) liekuma rādiusu R_x un R_y izmaiņas atkarībā no materiāla mitruma izmaiņām, ja pastiprinājuma lokšņu biezums ir 3.15 mm.

Izmantojot GEM un izstrādāto aprēķina modeli tika modelēti trīs gadījumi: ja mitruma izliektais piecu slāņu koksnes kompozītmateriāla elements ir pastiprināts ar 3.15mm biezu GFRP pastiprinājuma loksni ielietajā, izliektajā un abās pusēs. Izmantojot divpusēju GFRP pastiprinājumu ar šādu biežumu ir nodrošināta abu loksnes liekuma rādiusu nemainība ar precizitāti, kas nepārsniedz inženieraprēķinos pieļaujamos 5% (skat.2.2.att.).

Garendeformācijas aprēķinātas elementa plaknē, kas sakrīt ar nepastiprinātas koksnes kompozītmateriāla loksnes vidusplakni. Atšķirība starp garendeformācijām, kas aprēķinātas izmantojot izstrādāto aprēķina metodiku un GEM nepārsniedz 3.3% visos apskatītajos gadījumos.

Trešajā nodaļā izstrādāta vienošmīga metodika reoloģisko koeficientu n , H , α noteikšanai „papildinātajam reoloģiskajam vienādojumam”. Koeficientu noteikšanas sakarības izteiktas un pārbaudītas šļūdei konstanta sprieguma gadījumam, bet tā kā par pamatu ņemtais vienādojums ir izmantojams dažādos reoloģijas uzdevumos dažādiem materiāliem, tad noteiktie koeficienti pielietojami arī citos reoloģijas uzdevumos, piemēram, spriegumu relaksācijas gadījumā.

Šļūdes līkņu aprakstīšanā izmantots vienādojums

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \sigma \left(\frac{1}{H} - \frac{1}{E} \right) \left\{ 1 - e^{-\frac{H}{E} \left(\frac{t}{n} \right)^\alpha} \right\}, \quad (3.1)$$

ku ieguā integrējot tipiskā viskozi-elastīgā ķermeņa reoloģisko diferenciālvienādojumu konstanta spriegumu gadījumam.

Šļūdes līknes formas koeficients α tiek iegūts no vienādojuma (3.1), ilglaicīgo elastības moduli H pielīdzinot eksperimentāli iegūtajam elastības modulim eksperimenta beigās E_B , un vienādojumu pierakstot formā

$$\frac{\varepsilon_B - \varepsilon}{\varepsilon_B - \varepsilon_0} = e^{-\frac{E_B}{E} \left(\frac{t}{n} \right)^\alpha}, \quad \text{kur} \quad (3.2)$$

$$E_B = \frac{\sigma}{\varepsilon_B}, \quad (3.3)$$

un, ε_B - beidzamā eksperimentāli noteiktā garendeformācija;

ε_0 - sākotnējā parauga garendeformācija.

No (3.2) izsakot deformācijas laika momentos $t_1 = t_2 / 2$ un $t_2 = t_B / 2$, tiek sastādīta vienādojuma sistēma, kuru atrisinot, tika iegūta sakarība šļūdes līknes formas koeficienta α noteikšanai, to raksturojot ar četrām eksperimentāli iegūtajām garendeformāciju vērtībām dažādos laika momentos:

$$\alpha = \frac{1}{2} \frac{\left(\ln \left(\frac{\varepsilon_B - \varepsilon_2}{\varepsilon_B - \varepsilon_0} \right) \right)}{\left(\ln \left(\frac{\varepsilon_B - \varepsilon_1}{\varepsilon_B - \varepsilon_0} \right) \right)} \quad (3.4)$$

Relaksācijas laiku n iegūst vienādojuma (3.1) eksponentes pakāpes rādītāju pielīdzinot vieniniekam un laiku t aizvietojojot ar laiku t_k

$$n = \frac{t_k}{\left(\frac{E}{H}\right)^{\frac{1}{\alpha}}}, \quad (3.5)$$

kur t_k - laika moments, kad ir sasniegta eksperimentālā garendeformācijas vērtība ε_k , kas nosakāma pēc [Rocēns K.A.,

Markovs A.P., Daube J.J., 1989] uzrādītās sakarības

$$\varepsilon_k = \varepsilon_0 + (\varepsilon_B - \varepsilon_0) \cdot (1 - e^{-1}). \quad (3.6)$$

Relaksācijas laiks, kas aprēķināts izmantojot sakarību (3.5) turpmāk tiks saukts par „nosacīto relaksācijas laiku”.

Ilglaicīgais elastības modulis H tiek noteikts vairākos etapos. Pirmajā tuvinājumā tā vērtība pieņemta vienlīdzīga ar eksperimentāli iegūto parauga elastības modulis eksperimenta beigās E_B . Pēc tam vērtība E_B ir pakāpeniski jāmaina ar mērķi aprēķinātās šļūdes līknes beigu deformāciju pietuvināt eksperimentāli noteiktajai līdz tā sakrīt ar eksperimentāli noteikto. Nosacītais relaksācijas laiks n_j pie katras izvēlētas elastības moduļa E_{B_j} vērtības tiek noteikts pēc sakarības

$$n_j = \frac{t_k}{\left(\frac{E}{E_{B_j}}\right)^{\frac{1}{\alpha}}}. \quad (3.7)$$

Pēdējā noteiktā elastības moduļa E_{B_j} vērtība, kuru izmantojot aprēķinātās šļūdes līknes beigu punkts sakrīt ar eksperimentāli noteikto, ir materiāla ilglaicīgais elastības modulis H . Izstrādātā reoloģisko koeficientu noteikšanas metodika turpmāk tekstā tiks saukta par „izstrādāto metodiku”

4.nodaļā „izstrādātās metodikas” priekšrocības analizētas piecu dažādu koksnes materiālu eksperimentāli noteiktām šļūdes līknēm liecē - duglāzijas egles koksnes sijai [Gerhards C.C, 1999], trīsslāņu vidēja blīvuma skaidu plātnei, trīskārtu saplākšņa plātnei [Tankut A., Denzizli-Tankut N., Gibson H., Eckelman C., 2003], saliktai dubult-T profila sijai ar skaidu plates sieniņu un duglāzijas egles koksnes brusu plauktiem (turpmāk saīsināti sauktu par “dubult-T1”) un saliktai dubult-T profila sijai ar saplākšņa loksnes sieniņu un duglāzijas egles koksnes brusu plauktiem [McNatt J.D., Superfeskys M.J., 1983] (turpmāk saīsināti sauktu par “dubult-T2”). Visi šļūdes eksperimenti veikti telpās nekontrolējot apkārtējās vides apstākļus, izņemot eksperimentā ar saplākšņa loksni, kuras slogošanas laikā temperatūra bija nemainīga 21.1°C.

Šļūdes līkne, kas noteikta izmantojot “papildināto reoloģisko vienādojumu” grafiski salīdzināta ar šļūdes līknēm, kas iegūtas izmantojot:

1. tipisko viskozi-elastīgā ķermeņa vienādojumu [Ржаницин А. Р., 1958],

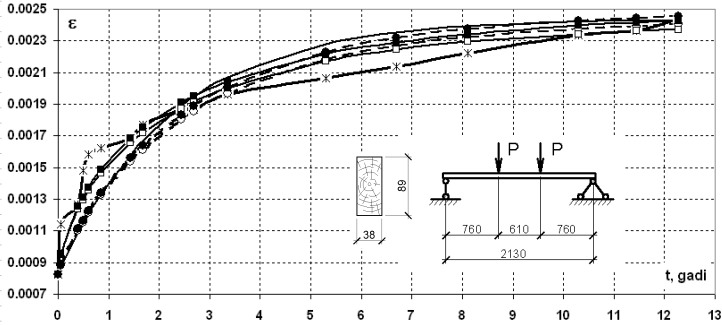
2. “papildināto reoloģisko vienādojumu”, kurā reoloģiskie koeficienti α un n noteikti izmantojot [Rocēns K.A., Markovs A.P., Daube J.J., 1989], bet ilglaicīgais elastības modulis H ir vienāds ar E_B (turpmāk saīsināti saukts par “papildināto reoloģisko vienādojumu ar koeficientiem $\alpha, n, H=E_B$ ”);

3. “papildināto reoloģisko vienādojumu”, kurā šļūdes līknes formas koeficienti α un n noteikti izmantojot [Rocēns K.A., Markovs A.P., Daube J.J., 1989], bet ilglaicīgais elastības modulis H ir pakāpeniski pietuvināts savai patiesajai vērtībai tā, lai aprēķinātās šļūdes līknes beigu punkts sakrīt ar eksperimentāli noteikto (turpmāk saīsināti saukts par “papildināto reoloģisko vienādojumu ar koeficientiem $\alpha, n_j=f(H), H=E_{B_j}$ ”). Ilglaicīgā elastības moduļa pietuvināšana “papildinātajam reoloģiskajam vienādojumam” tika veikta, lai objektīvi varētu salīdzināt esošo koeficientu α un n noteikšanas metodiku ar izstrādāto “izstrādāto metodiku”, jo ilglaicīgo elastības moduli iespējams pietuvināt jebkura reoloģiskā vienādojuma gadījumā;

4. “papildināto reoloģisko vienādojumu”, kurā šļūdes līknes formas koeficienti α un n noteikti pēc izstrādātās metodikas, ar formulām (3.4) un (3.7), bet ilglaicīgais elastības modulis H ir vienāds ar E_B (turpmāk saīsināti saukts par “papildināto reoloģisko vienādojumu ar koeficientiem $\alpha, n_j=f(\alpha, H), H=E_B$ ”). Šī līkne konstruēta salīdzināšanas nolūkā ar “papildināto reoloģisko vienādojumu”, kas ņemts par pamatu izstrādātajai metodikai, un kurā arī nav pielietota pakāpeniskā ilglaicīgā elastības moduļa tuvināšana. Nesošo būvkonstrukciju aprēķinos noteicošās ir rezultējošās deformācijas, nevis deformācijas šļūdēšanas procesā, tāpēc būvkonstrukciju aprēķinos pietuvināšana ir obligāta.

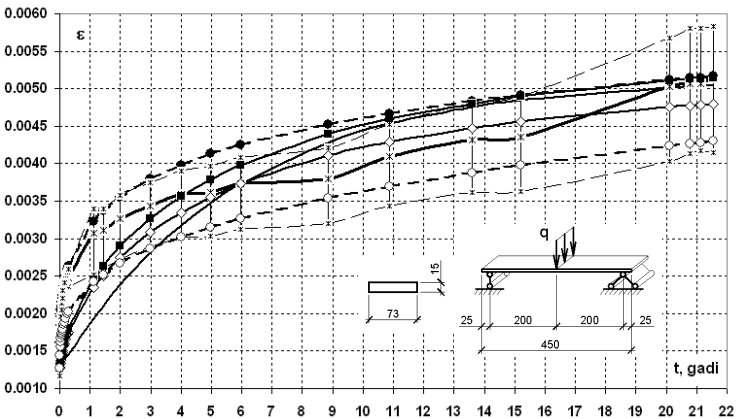
Salīdzinot šļūdes līknes, kas iegūtas izmantojot “tipiska viskozi-elastīgā ķermeņa reoloģisko vienādojumu”, “papildināto reoloģisko vienādojumu” un „izstrādāto metodiku” ar eksperimentāli noteiktajām šļūdes līknēm, redzams, ka visos gadījumos maksimālā atšķirība no eksperimentāli noteiktajām deformācijām, vismazākā ir izstrādātajai “izstrādātajai metodikai” (skat.attēlus 4.1 līdz 4.5).

Ja šļūdes līknes konstruēšanā tiek izmantots “papildinātais reoloģiskais vienādojums ar koeficientiem $\alpha, n_j=f(H), H=E_{B_j}$ ”, tad tiek iegūta precīzāka šļūdes līkne kā izmantojot “izstrādāto metodiku”. Tomēr „izstrādātās metodikas” priekšrocībā ir tā, ka koeficienta α noteikšanā tiek izmantotas četras eksperimentāli noteiktas garendeformāciju vērtības laika momentos $t_0, t_B/4, t_B/2$ un t_B , bet nosakot koeficientu α izmantojot [Rocēns K.A., Markovs A.P., Daube J.J., 1989] tiek izmantotas trīs garendeformāciju vērtības, kur divas no tām ir jāpiemeklē pēc esošās šļūdes līknes ar vienu vienīgu nosacījumu, ka vienai no garendeformāciju vērtībām ir jābūt vairākas reizes lielākai par otru, līdz ar to šļūdes līknes uzkonstruēšanai ir nepieciešama pilna eksperimentāli noteikta šļūdes līkne.



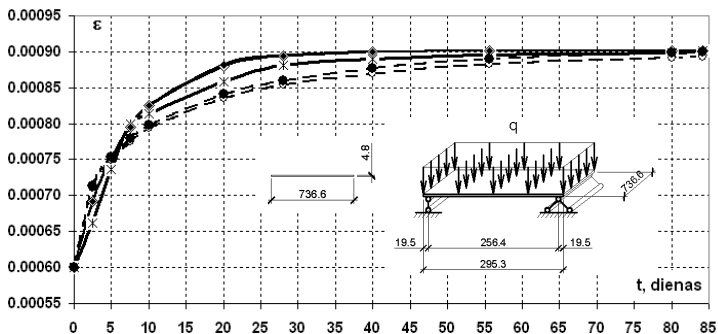
4.1.attēls. Duglāzijas egles koksnes sijas slogojuma shēma, šķērsgriezums un šļūdes līknes, ja slodze $P=0.526$ kN. Grafikā pielietotie apzīmējumi:

- x— Eksperimentālie rezultāti;
- Aprēķins izmantojot tipiskā viskozi-elastīgā ķermeņa reoloģisko vienādojumu;
- ○ - izmantots “papildinātais reoloģiskais vienādojums ar koeficientiem α , $H=E_B$ ”;
- ● - izmantots “papildinātais reoloģiskais vienādojums ar koeficientiem α , $\eta_j=f(H)$, $H=E_{Bj}$ ”;
- ◇ - izmantots “papildinātais reoloģiskais vienādojums ar koeficientiem α , $\eta_j=f(\alpha, H)$, $H=E_B$ ”;
- ◆ - izmantota “izstrādātā metodika”.

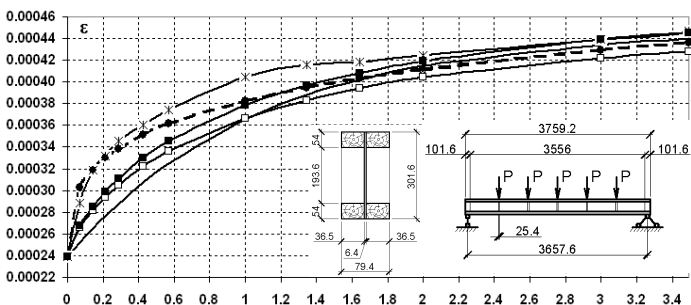


4.2.attēls. Skaidu plates plātnes slogojuma shēma, šķērsgriezums un šļūdes līknes, ja slodze $q=2.562$ kN·m. Grafikā pielietotie apzīmējumi:

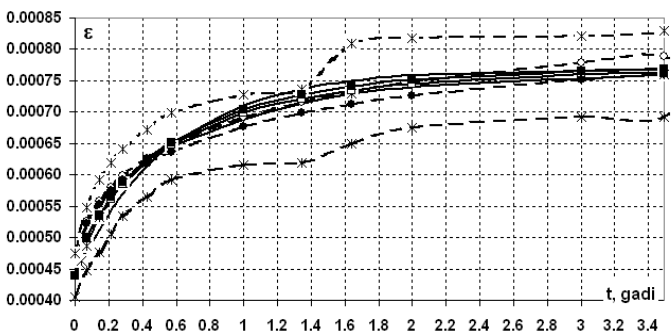
- x— Eksperimentālo rezultātu izkliedes robežas;
- apzīmējumu —x—, —, - ○ -, - □ -, - ■ -, - ● - atšifrējumus skatīt 4.1.attēlā.



4.3.attēls. Saplākšņa loksnes plātnes slogojuma shēma, šķērsgriezums un šļūdes līknes, ja slodze $q=4.323\text{kN/cm}^2$. Grafikā pielietoto apzīmējumu atšifrējumus skatīt 4.2.attēlā



4.4.attēls. Dubult-T1 kompozīto koksnes materiālu siju slogojuma shēma, šķērsgriezums un šļūdes līknes, ja slodze $P=1.089\text{ kN}$. Grafikā pielietoto apzīmējumu atšifrējumus skatīt 4.1.attēlā

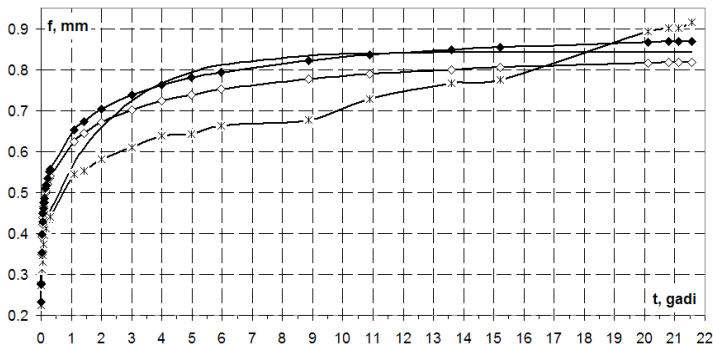


4.5.attēls. Dubult-T2 kompozīto koksnes materiālu siju šļūdes līknes. Grafikā pielietoto apzīmējumu atšifrējumus skatīt 4.2.attēlā. Sijas slogojuma shēma, šķērsgriezums un pieliktās slodzes vērtība ir analogiski 4.4.attēlā dotajiem

Skaidu plātes paraugam ir vislielākā eksperimentāli noteikto un analītiski aprēķināto rezultātu nesakritība, jo tādi faktori kā presētās koksnes skaidas īpašības un to nevienmērīgais sablīvējums pa skaidu plātes šķērsriezuma augstumu aprēķinā netika ņemti vērā. Tāpēc nodaļā papildus analizēti eksperimentāli iegūtie skaidu plašu šļūdes rezultāti, mēģinot pamatot analītiski aprēķināto rezultātu nesakritības iemeslus ar eksperimentāli iegūtajiem. Laboratorijā tika veikta kompozītas trīsšķāņu vidēja blīvuma ($710 \pm 10 \text{ kg/m}^3$) urea-formaldehīda saistītās koksnes skaidu plātnes deformēšanās laikā analīze. 12 paraugi ar gabarītmēriem $450 \times 75 \times 15 \text{ mm}$ tika izgriezti no dažādām plāksnēm un eksperimenti tika veikti Rīgas Tehniskās universitātes telpās – liecē, ar koncentrētu slodzi laiduma vidū $P_{sl} = 186,7 \text{ N}$. Pieliktā ilglaicīgā lieces slodze ir 30% no kopējās lūzuma slodzes pārbaudītajiem paraugiem. Eksperimentālie rezultāti tiek fiksēti kopš 1986.gada 11.aprīļa, un paraugu uzvedība vēl joprojām tiek novērota.

Veikts paraugu aprēķins kombinējot „izstrādāto metodiku” un aprēķina metodiku skaidu plašu deformāciju aprēķinam izmantojot tās komponentu reoloģiskos koeficientus un tilpuma saturu [Rocēns K.A., Markovs A.P., Daube J.J., 1989]. Atšķirībā no iepriekš veiktā skaidu plātnes aprēķina kā kvazi-vienmērīgam materiālam (skat.4.2.att.), šļūdes līkne tiek aprēķināta par pamatu ņemot divus neatkarīgus šļūdes eksperimentus fenolformaldehīda saistvielai spiedē [A.M.Скудра, Ф.Я.Булавс, К.А.Роценс, 1971] un liektai koka sijai [Gerhards C.C., 1999]. Tiek pieņemts, ka saistvielai reoloģiskie koeficienti spiedē būs tādi paši kā stiepē un liecē, un, ka starp saistvielu un koksnes skaidu „punktveida kontaktu” vietās pastāv ideāla saiste. Papildspriegumi, kuri rodas šķērsvirzienā attiecībā pret elementa garenasi ir mazi un netiek ņemti vērā.

Salīdzinot šļūdes līknes (skat.4.6.att.), kas iegūtas izmantojot “tipiska viskozi-elastīgā ķermeņa reoloģisko vienādojumu”, “papildināto reoloģisko vienādojumu ar koeficientiem α , $n_j=f(\alpha, H)$, $H=E_B$ ” un “izstrādāto metodiku” ar eksperimentāli noteiktajām šļūdes līknēm, redzams, ka vismazākā atšķirība starp maksimālo komponentes atšķirību un kompozīta maksimālā atšķirība ir 0.81% “papildinātajam reoloģiskajam vienādojumam” ar koeficientiem α , $n_j=f(\alpha, H)$, $H=E_B$, bet “izstrādātajai metodikai” tā ir 3.31%, savukārt izmantojot tipisko viskozi-elastīgā ķermeņa reoloģisko vienādojumu” atšķirība ir 7.51%. Tātad pieņemot gadījumu, kad komponentu šļūdes līknes tiktu aprakstītas ar mazāku atšķirību ar „izstrādāto metodiku”, tad atšķirība starp kompozītās skaidu plātnes aprēķināto un eksperimentāli noteikto šļūdes līkni arī samazinātos. Otrkārt, ja aprēķinātie komponentu reoloģiskie koeficienti tiktu aprēķināti šļūdes līknēm, kas iegūtas pie tāda sprieguma komponentēs, kad komponentu šļūdes līknēs arī būtu novērojama slīpa asimptota, kā tas ir skaidu plātnes šļūdes līknei, tad atšķirība starp aprēķināto un eksperimentāli noteikto šļūdes līkni būtu mazāka.



4.6.attēls. Liekta koksnes skaidu plātes šļūdes līkne, kas aprēķināta kā kompozītam materiālam izejot no tā sastāvdaļu reoloģiskajām īpašībām

Grafikā pielietotie apzīmējumi:

—◆— Aprēķins izmantojot reoloģiskos koeficientus, kas iegūti aprēķinā izmantojot “izstrādāto metodiku”;

apzīmējumu —×—, —, —○— atšifrējumus skatīt 4.1.attēlā.

5.nodaļā izstrādāts aprēķina modelis slāņaina izliekti-ieliekta elementa šļūdes deformāciju aprēķinam, kura pamatā izmantoti pieņēmumi un aprēķina modeļi, kas izstrādāti iepriekšējās nodaļās.

Šļūdes procesā mainīgo slāņainā elementa formas stabilitātes raksturlielumu noteikšana tiek veikta vairākos soļos. Pirmajā solī aprēķina elementa atsevišķo slāņu reoloģiskos raksturlielumus (īslaicīgos elastības moduļus E un G , koeficientus α , relaksācijas laikus n un ilglaicīgos elastības moduļus H) no eksperimentāli noteiktām šļūdes līknēm katram materiālam, izmantojot „izstrādāto metodiku” (skat.3.nodaļā).

Otrajā solī izmantojot aprēķinātos atsevišķu slāņu reoloģiskos raksturlielumus, laika momentos t ar noteiktu intervālu aprēķina elementa slāņu deformatīvos raksturlielumus (elastības moduļus un bīdes moduli). Izmantojot sakarības starp elastīgajām konstantēm ortotropam materiālam tiek aprēķināti arī Puasona koeficienti, kas nepieciešami slāņa reducētās stingrības matricas sastādīšanai laika momentā t .

Trešajā solī izmantojot GEM aprēķina visa izliekti-ieliektā elementa šļūdes deformācijas, izmantojot otrajā solī aprēķinātos slāņa deformatīvos raksturlielumus attiecīgajā laika momentā. Aprēķins tiek veikts atsevišķi katram laika momentam, ievērtējot deformāciju ietekmi.

Parādīts kā praktiski pielietot piedāvāto aprēķina modeli, ar to izrēķinot divus piemērus. Pirmajā piemērā noteikts, kādas būs 2.nodaļā apskatītās pastiprinātās izliekti-ieliektās loksnes šļūdes deformāciju daļa, ievērtējot kā lobskaidas, tā plastika pastiprinājuma īpašību izmaiņas laikā. Noteiktas izliekti-ieliektās loksnes rādiusa vērtības, ja pastiprināta loksnes augšējā jeb apakšējā vai abas virsmas, un aprēķināta šļūdes deformāciju daļa, kas rodas no materiāla elastīgo raksturlielumu izmaiņām laikā gaitā, par atskaites punktu pieņemot 2.nodaļas piemērā apskatītās

loksnes deformēto stāvokli analītiskā piemēra beigu momentā. GEM soļu aprēķinā mainot deformatīvos raksturlielumus soļos netika uzdots, ka spriegumu vērtības slāņos laika gaitā nemainīsies, līdz ar to samazinoties elastības moduļim vienmērīgi mainās kā garendeformāciju, tā spriegumu vērtības. Vidēji spriegumu σ_x vērtības abpusēja pastiprinājuma gadījumā samazinās no 1.5 reizes līdz 2.3 reizēm. Tas izskaidrojams ar to, ka samazinoties elastības moduļim, mainās arī sākotnējās mitruma izraisītās deformācijas lielums, kā rezultātā samazinās spriegumu vērtības slāņos. Šļūdes gadījumā mainoties dažādu materiālu slāņu ar dažādu relaksācijas laiku deformatīvajiem raksturlielumiem notiek spriegumu pārdalīšanās starp loksnes slāņiem. Mitruma izmaiņu izraisīto liekumu vērtības elastīgo raksturlielumu izmaiņu rezultātā izliekti-ieliektajai loksnei, kas pastiprināta ar 3.15 mm biezu stiklaplastu, mainīsies ne vairāk kā 3.8%. Tātad izmantojot izstrādāto aprēķina modeli iespējams aprēķināt stiklaplasta pastiprinājuma biežumu, kas nodrošinās mitrumā izliekušās loksnes deformāciju izmaiņas vēlamā intervālā.

Otrajā piemērā aprēķinātas cilindriskas čaulas, kas noslogota ar vienmērīgi izkliedētu slodzi, šļūdes deformācijas. Apskatīts ortotropa materiāla elements, kas sastāv no piecām, savā starpā salīmētām, koksnes lobskaidu kārtām. Apskatīts lineārās šļūdes gadījums - spriegumu vērtība slāņos nevienā laika momentā, nevienā punktā nepārsniedz $0,442 \text{ kN/cm}^2$. Iegūts, ka šļūdes un elastīgo izlieču attiecība ir 3.03. Čaulai arī bez papildus mainīga mitruma ietekmes ilglaicīgā izliece ir trīs reizes lielāka par momentāno, tātad plānsienu izliektām loksņēm šļūdes deformāciju ievērtēšana ir obligāta.

SECINĀJUMI

1. Izstrādāts aprēķina modelis izliekti-ieliektu slāņainu plātņu liekuma rādiusu izmaiņu noteikšanai mainīga mitruma apstākļos, gadījumam, ja plātne mitruma deformāciju ierobežošanai pastiprināta ar stiklaplastu.

2. Noskaidrota stiklaplasta pastiprinājuma biezuma ietekme uz slāņainas izliekti ieliektas kompozītmateriāla loksnes liekuma rādiusu izmaiņām mainoties tās mitrumam no 10% līdz 17%. Piemēram, parādīta iespēja nodrošināt sākotnējo formu izliekti ieliektai slāņainai kompozītmateriāla loksnei 5% robežās, pastiprinot tās abas puses ar divos virzienos stiegtu stiklaplastu.

3. Izstrādāta šļūdes līknes formas koeficienta, relaksācijas laika un ilglaicīgā elastības moduļa noteikšanas metodika (“izstrādātā metodika”) lineāri elastīgi-viskoza materiāla deformēšanās likumam diferenciālvienādojuma formā, kas papildināts ar šļūdes līknes formas koeficientu („papildinātais reoloģiskais vienādojums”), izmantojot koeficientu aprēķinam eksperimentāli noteikto lielāko šļūdes deformāciju laikā t_{\max} un deformācijas laika momentos t_0 , $t_{\max}/2$ un $t_{\max}/4$.

4. Noskaidrots, ka lietojot „izstrādāto metodiku”, var apraksīt eksperimentālos rezultātus, kas iegūti ilglaicīgi liecē slogojot ar laikā nemainīgu slodzi dažādus koksnes konstrukciju elementus - siju, skaidu plātņi, saplākšņa plātņi, saliktu dubult-T profila siju ar skaidu plates sienīņu un koksnes brusu plauktiem un saliktu dubult-T profila siju ar saplākšņa loksnes sienīņu un koksnes brusu plauktiem.

5. Noteikts, ka atšķirība starp dažādu koksnes materiālu elementu eksperimentāli noteiktajiem un aprēķinātajiem rezultātiem, izmantojot „papildināto reoloģisko vienādojumu”, kura koeficienti noteikti pēc „izstrādātās metodikas” vidēji ir par 3% mazāka kā izmantojot lineāri elastīgi-viskoza materiāla deformēšanās likumu diferenciālvienādojuma formā vai lineāri elastīgi-viskoza materiāla deformēšanās likumu diferenciālvienādojuma formā, kas papildināts ar šļūdes līknes formas koeficientu, kurš noteikts izmantojot Ogarkova piedāvāto metodiku.

6. Parādīts, kā ar izstrādāto reoloģisko koeficientu noteikšanas metodiku prognozēt šļūdi saliktiem koksnes materiāliem ņemot vērā to sastāvdaļu relatīvo tilpumu un reoloģiskās īpašības.

7. Izstrādāts aprēķina modelis mitruma izmaiņu rezultātā izliekti-ieliektā slāņaina koksnes kompozītmateriāla elementa deformāciju prognozēšanai ievērtējot laika faktoru, ja tas pastiprināts vienā no pusēm vai abās, un noteikts, ka aplūkotajiem gadījumiem liekuma izmaiņa 60 gados nepārsniedz 5%.