

Telpiski stiegrotie kompozītie materiāli ar trauslu matricu

Gaļina Harjkova¹, Andrejs Krasņikovs², Edgars Mačanovskis³
¹⁻³Rīgas Tehniskā universitāte

Kopsavilkums. Rakstā aplūkots netradicionāls betona stiegrojums ar adītiem stikla šķiedras sietiem. Darba mērķis bija pētīt trikotāžas telpisko stiegrojumu (trikotāža ar lielu cilpas izmēru) un analizēt betona ar trikotāžas karkasu uzvedību zem slodzes. Rakstā apskatīti galvenie darba etapi: stikla šķiedras sietu adīšana, betona paraugu ar stikla šķiedras sietiem izgatavošana, paraugu testēšana un rezultātu analīze. Veiktie eksperimenti parādīja, ka stikla šķiedras sieti palielina betona paraugu nestspēju pēc plaisāšanas (pēc makroplaisas, kas šķērso visu parauga šķēsgriezumu). Vienlaicīgi rezultāti bija atkarīgi arī no gaisa satura armējošā tekstilmateriālā. Palielinot šķiedru skaitu diegos, veidojas lielāka gaisa poru samazināšanas nepieciešamība. Izmantotais šķiedru daudzums paraugos izrādījās neliels un tikai relatīvi nedaudz palielināja nestspēju. Lai palielinātu paraugu stiprību, jāpalielina stikla šķiedru daudzums diegā vai arī sietu daudzums.

Atslēgas vārdi: betons, kompozītie materiāli, stiegrojums, stikla šķiedra, trikotāža.

I. IEVADS

Kompozīto materiālu tradicionālā struktūra ir slāņaina – stiegrojuma trajektorijas guļ slāņu plaknēs un saikne starp tiem notiek ar saistvielas (matricas) starpslāņiem. Tomēr arvien lielāku uzmanību piesaista kompozītie materiāli ar telpisku stiegrojuma izvietojumu. Darbu apjoms šajā virzienā nepārtraukti palielinās [1]–[5]. Telpiska stiegrojuma izvietojuma lietderīgums ir neapšaubāms. Telpiska karkasa ieviešana ne tikai likvidē tādus slāņainu kompozīto materiālu trūkumus kā noslāņošanās bīstamība un vāja pretestība bīdei bet arī lokalizē plaisu izplatīšanos dažu telpisku šūnu robežās. Rezultātā strauji palielinās materiāla nestspēja biezo sienu konstrukcijās, it īpaši koncentrēto slodžu pielikšanas zonās, izgriezumu zonās, šķautņu zonās pie nestacionārām spēku un temperatūru iedarbībām, kas ir raksturīgas mūsdienu teknikai. Atšķirīgas cietības un stiprības stiegrojuma esamība ievērojami paplašina īpašību diapazonu kompozītajiem materiāliem ar telpisku stiegrojuma shēmu. Galvenās grūtības rodas tehnoloģiskajā procesā, veidojot sarežģītās stiegrojuma shēmas, kad tiek modelēta kādu dabas elementu (piemēram, kristālu, augu vai bioloģisku audu) struktūra. Telpiski stiegroto materiālu izstrādāšana un ieviešana ir saistīta ne tikai ar tehnoloģiskām grūtībām, bet arī ar stiegrojuma teorijas jaunas nodaļas attīstību. Šobrīd ir uzkrāta nozīmīga pieredze dažāda tipa kompozīto materiālu ar telpiskām stiegrojuma shēmām radīšanā un to izstrādes tehnoloģiju pilnveidošanā.

II. STIKLA ŠĶIEDRA

Betona armējumam tika izmantoti stikla šķiedras diegi. Stikla šķiedras bezgalīgi garu elementāru šķiedru (filamentu) veidā tika viegli savērptas diegos (katras šķiedras diametrs 12 μm). Kompleksajiem (spolētiem) diegiem lineārais blīvums parasti ir līdz 100 tex un garums uz spolēm ir 20 km un vairāk (nepārtraukta stikla šķiedra). Šķeterētiem diegiem lineārais blīvums ir vairāk nekā 100 tex [6]. Diegus tālāk var pakļaut jebkādam tekstiliju pārstrādes formām, un no tiem var ražot dažādus izstrādājumus (šņores, auklas, tauvas, audumus, neaustos materiālus, trikotāžu, sietus, speciālas struktūras). Stikla šķiedras un stikla tekstilmateriālu pielietojuma galvenā nozare ir stiklaplasta un citu kompozītu stiegrojošo elementu izgatavošana. Stikla audumus var izmantot arī kā konstrukciju un apdares materiālus. Šajā gadījumā tie bieži vien tiek pakļauti tai vai citai apdares formai, galvenokārt impregnēšanai ar saistvielu (latekss, poliuretāns, citi polimēri, betoni).

III. KOMPOZĪTIE MATERIĀLI AR ADĪTO KARKASU

Telpiski stiegrotiem kompozītajiem materiāliem ar adīto karkasu ir vairākas svarīgas priekšrocības salīdzinājumā ar tradicionālajiem 2D slāņainajiem kompozītajiem materiāliem, proti, tiem ir ļoti augstas segšanas īpašības un izcila izturība pret bojājumiem. Tomēr, neskatoties uz šīm priekšrocībām, 3D adītiem materiāliem ir daži trūkumi, kas ierobežo šo materiālu pielietojumu. Lidmašīnu būvniecībā ir daudz konstrukciju, kas tiek izgatavotas no telpiski stiegrotiem kompozītiem ar adīto karkasu, lai izmantotu šo materiālu potenciālu. Piemēram, šie kompozīti tiek izmantoti spārnu stringeros un paneļos, reaktīvā dzinēja lāpstiņās, T formas savienotājos un dubult-T profila sijās. 3D adītos kompozītus izmanto ne tikai lidmašīnu būvniecībā, bet arī daudzās citās jomās, piemēram, no tiem izgatavo paneļus un durvju funkcionālās detaļas automobiļiem, gaisa aptecētājus, medicīnas protēzes un velosipēdu ķiveres.

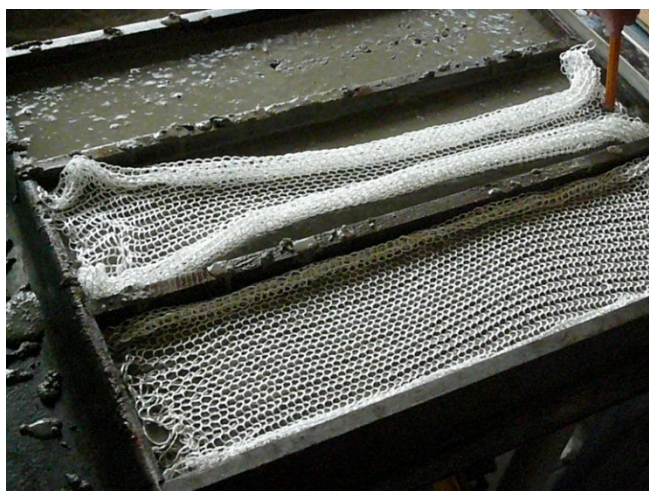
IV. STIKLA ŠĶIEDRAS SIETU ADĪŠANA

Darba gaitā tika izmantota stikla šķiedra no AS „Valmieras stikla šķiedra”. Tā bija šķeterēto diegu spole (1. att.). Izmantotās stikla šķiedras mehāniskās īpašības:
 blīvums $\rho = 2,54 \text{ g/cm}^3$;
 elastības modulis $E = 73 \text{ GPa}$;
 Puasona koeficients $\nu = 0,22$.



1. att. Šķeterēto diegu spole no AS „Valmieras stikla šķiedra”.

Šķeterētā stikla šķiedras diega pamatsastāvu veido “E” tipa bezsārmu alūmo-borsilikātu stikls ar maksimālo sārmu saturu $< 1,0 \%$. Šķeterētais diegs sastāvēja no diviem vai vairākiem spolētiem diegiem, kas atsevišķā tehnoloģiskā procesā tika sašķeterēti kopā, piedodot diegam tādu pašu grodumu kā spolētam diegam ar pretēju groduma virzienu. Savukārt spolētais diegs bija vienkāršs tekstilveidojums, kurā diegi savstarpēji saistīti ar eļļotāja un pirmatnējā groduma palīdzību. Šis spolētais diegs sastāvēja no 600 nepārtrauktām stikla šķiedrām. Tieši no šīs šķeterēto diegu spoles (1. att.) tika adīti stikla šķiedras sieti ar adāmšašīnu „Neva-5”.



2. att. Betona prizmu izgatavošana.

Visiem paraugiem bija vienādi izmēri: garums – 50 cm, platums – 15 cm. Tālāk šie paraugi tika izmantoti betona matricu prizmās ar izmēriem $40 \times 10 \times 10$ cm.

V. BETONA PARAUGU AR STIKLA ŠĶIEDRAS SIETIEM IZGATAVOŠANA

Pēc vajadzīgā sietu daudzuma sagatavošanas nākamais solis darbā bija izgatavot betona paraugus, kas armēti ar stikla šķiedras sietiem. Paraugi tika izgatavoti vienādas formas – prizmas veidā – ar izmēriem $40 \times 10 \times 10$ cm (2. att.). Darbā tika izmantoti trīs betona sastāvi: augstas stiprības betons, vidējas stiprības betons un vājš betons. Pēc sastāva šie betoni galvenokārt atšķīrās ar dažādu ūdens daudzumu, kas tika iekļauts betona maisījuma receptūrā. No šiem trim betona veidiem tika izgatavoti arī deviņi kubi ar izmēriem $10 \times 10 \times 10$ cm. Kubus izgatavoja tikai no betona – bez stikla šķiedras sietiem. Trīs kubi bija no stipra betona, trīs – no vidējas stiprības betona, trīs – no vāja betona. Šie kubi tika testēti, nosakot betona stiprību uz spiedi un betona klasi. Pavisam tika izgatavotas divdesmit septiņas prizmas (1. tabula).

1. TABULA

IZGATAVOTĀS PRIZMAS

Paraugu skaits	Betona veids	Stiegrojums
3 prizmas	stiprs betons	bez stiegrojuma
3 prizmas	stiprs betons	ar 3 stikla šķiedras sietiem
3 prizmas	stiprs betons	ar 4 stikla šķiedras sietiem
3 prizmas	vidējas stiprības betons	bez stiegrojuma
3 prizmas	vidējas stiprības betons	ar 3 stikla šķiedras sietiem
3 prizmas	vidējas stiprības betons	ar 4 stikla šķiedras sietiem
3 prizmas	vājš betons	bez stiegrojuma
3 prizmas	vājš betons	ar 3 stikla šķiedras sietiem
3 prizmas	vājš betons	ar 4 stikla šķiedras sietiem

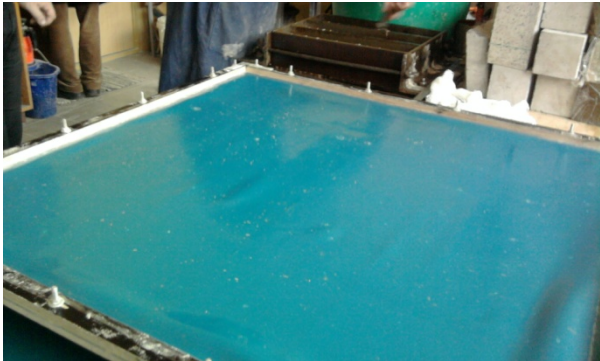
Visi prizmatiskie paraugi pēc to sacietēšanas (pēc 28 dienām no izgatavošanas brīža) tika testēti uz četru punktu lieci. Prizmas bez stiegrojuma tika izmantotas kā etaloni, lai varētu salīdzināt rezultātus pēc eksperimentiem, proti, kādu slodzi izturēja paraugi bez sietiem un kādu slodzi izturēja paraugi ar sietiem.

Prizmās ar trim stikla šķiedras sietiem tie tika izvietoti nevienmērīgi (divi slāņi tika uzlikti apakšā, viens slānis tika uzlikts augšā). Prizmās ar četriem stikla šķiedras sietiem tos novietoja vienmērīgi pa paraugu augstumu. Lai paraugi veidotos maksimāli kvalitatīvi, tos izgatavošanas gaitā vibrēja, lai tādējādi nodrošinātu maksimālu gaisa burbuļu iziešanu un stikla diegu piesūcināšanu ar betonu.

VI. PLĀNSIENIŅU ČAULAS IZGATAVOŠANA

Vienlaicīgi ar prizmām un kubiciņiem tika izgatavotas arī plānsieniņu čaulas, nodemonstrējot iespēju ar stikla šķiedras

sietiem izgatavot kompozītos materiālus ar jebkādu ģeometriju. Čaulu izmēri bija 1×1 m, bet biezums – 1,5 cm, tādēļ tās sauc par plānsieniņu čaulām. Čaulas izgatavošanas forma bija no gumijas ar koka sienām, kuru augstums bija 1,5 cm (3. att.).



3. att. Gumijas forma čaulas izgatavošanai.

Vispirms tika izgatavoti stikla šķiedras sieti. Plānsieniņu čaulai tika izmantots stiprs betons, armēts ar trim stikla sietu slāņiem. Čaulā šie trīs stikla šķiedras sieti tika uzlikti nevienmērīgi (divus slāņus uzlika apakšā – vienu uz otra, bet trešo slāni uzlika augšā). Ļoti svarīgi ievērot, ka čaula ar nesacietējušo betona maisījumu tika vibrēta ar rokas vibratoru, lai gaisa saturs paraugā būtu minimāls.



4. att. Izliektas čaulas formas veidošana ar pašsvaru.

Čaulas izgatavošanā tika pielietota metode, kurā tiek izmantots gravitācijas spēks. Šo formu (1×1 m) kopā ar betona maisījumu uzlika uz cietas apmales, lai ļautu čaulai izlikties no pašsvara (4. att.).

VII. PARAUGU TESTĒŠANA, APRĒĶINĀŠANA UN REZULTĀTU ANALĪZE

Betona paraugus testēja pēc 28 diennaktīm, kad betons bija pilnīgi sacietējis. Tika testēti betona kubi uz spiedi, lai noteiktu izmantotā betona klasi. Katram betona veidam aprēķināja maksimālās slodzes vidējās vērtības pēc triju paraugu rezultātiem (2. tabula). Pēc 2. tabulas rezultātiem vājo betonu apzīmēja ar B25, vidējās stiprības betonu ar B50, bet stipro betonu ar B70.

Pēc tam tika veikti eksperimenti ar prizmām uz četru punktu lieci ar testēšanas mašīnas „Controls” palīdzību. Tika testētas 27 prizmas, no kurām 9 prizmas bija kā etaloni bez stikla šķiedras sietiem, 9 prizmas bija ar trim stikla šķiedras sietiem un 9 prizmas bija ar četriem stikla šķiedras sietiem. Visas prizmas bija ar vienādiem izmēriem – $40 \times 10 \times 10$ cm.

2. TABULA

MAKSIMĀLO SLODŽU VIDĒJĀS VĒRTĪBAS KATRAM BETONA VEIDAM

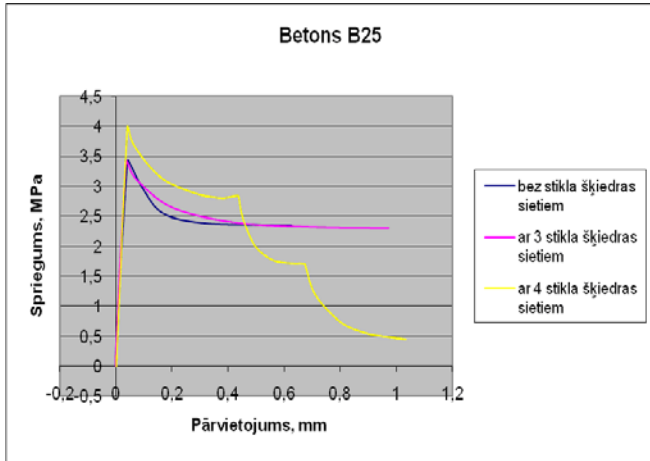
Parauga numurs	Maksimālā slodze, kuru izturēja paraugs uz spiedi, MPa	Maksimālo slodžu vidējās vērtības, MPa
1	23,11	~ 25
2	25,29	
3	26,49	
4	51,39	~ 49
5	47,22	
6	49,61	
7	57,6	~ 71
8	84,4	
9	70,7	

Slogošanas ātrums bija 150 N/s. Darba gaitā tika izmantoti tenzoelektriskie devēji, lai izmērītu prizmu izlieču pārvietojumus prizmu vidusdaļā. Tika mērīts plaisas atvēršanās lielums (5. att.). Tenzoelektriskie devēji eksperimenta gaitā nodeva informāciju par pārvietojumiem uz datoru, kur dati tika saglabāti. Pēc datu apstrādes tika izveidoti sprieguma – prizmas viduspunkta vertikālā pārvietojuma grafiki (6.–8. att.). Testēšanas laikā tika novērots, ka betons jau saplīsis (izveidojusies plaisa, kas šķērso prizmas šķēlumu), bet paraugs tur ārējo slodzi ar stikla šķiedras sietu palīdzību. Arī šajā situācijā bija manāms šķiedru izraušanas (*pull-out*) efekts – pakāpeniska sietu diegu izraušana no betona (9. att.).



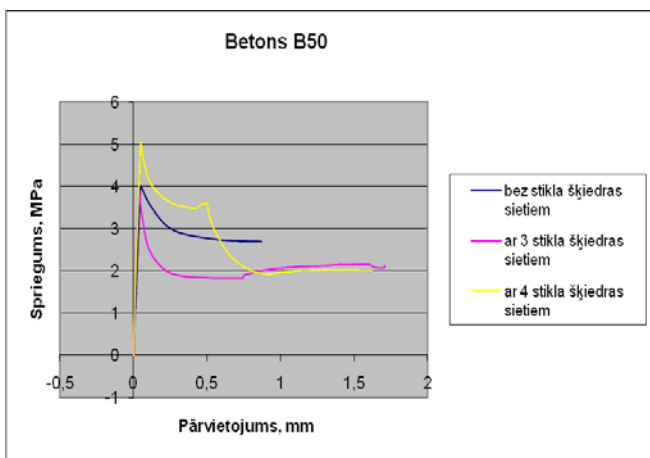
5. att. Prizmu testēšana uz četru punktu lieci.

Daži paraugi izturēja negaidīti mazu slodzi. Tā, paraugiem no betona B70 stiprība izrādījās mazāka nekā paraugiem no betona B25. Visticamāk tas notika augstāka gaisa satura dēļ, no kura neizdevās atbrīvoties betona B70 paraugu izgatavošanas laikā.



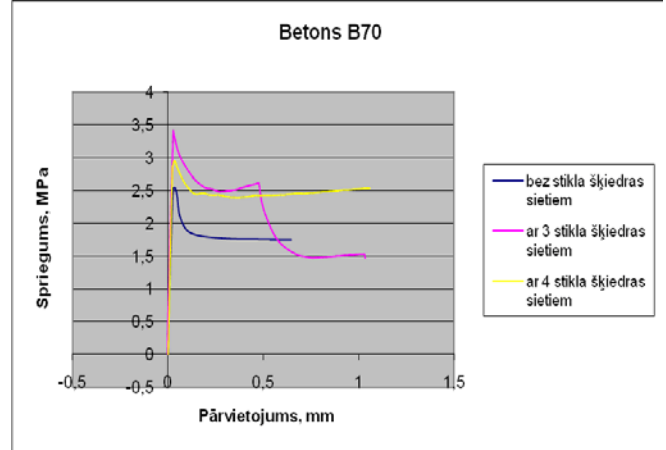
6. att. Grafiki ar vidējām vērtībām (spriegums – prizmas viduspunkta vertikālais pārvietojums) paraugiem no vāja betona (B25).

Analizējot grafikus, redzams, ka paraugi bez sietiem un ar trim sietiem izturēja gandrīz vienādu slodzi, bet paraugi ar četriem sietiem izturēja lielāku slodzi. Ir vērts atzīmēt, ka, turpinot darbu šajā virzienā, nepieciešams sietu skaitu palielināt vai arī sietos izmantot diegus ar lielāku šķiedru skaitu. Paraugiem ar trim sietiem un ar četriem sietiem grafiku daļa pēc plaisāšanas ir garāka nekā paraugiem bez stikla šķiedras sietiem. Šo parādību var izskaidrot ar to, ka paraugos ar sietiem šie sieti tur slodzi, plīstot šķiedrām un raujoties tiem ārā tad, kad maģistrālā plaisa jau šķērsojusi visu parauga šķērsgrizumu. Grafīkā, kur parādīti paraugi ar četriem sietiem, redzamas divas virsotnes – otrā atbilst intensīvai šķiedru plīšanai diegos un sietu izraušanai no betona („pull-out” efekts). Vidējās stiprības betona (B50) grafiki parādīti 7. attēlā.



7. att. Grafiki ar vidējām vērtībām paraugiem no vidējās stiprības betona (B50).

Redzama gandrīz tāda pati aina, kāda tika novērota vājam betonam – B25. Paraugi ar četriem sietiem bija stiprāki nekā paraugi bez sietiem un ar trim sietiem. Tajā pašā laikā šie paraugi no vidējās stiprības betona izturēja lielāku slodzi nekā paraugi no vāja betona (B25).



8. att. Grafiki ar vidējām vērtībām paraugiem no stipra betona (B70).

Grafika daļa pēc plaisāšanas paraugiem ar trim sietiem un ar četriem sietiem arī ir garāka, tāpat kā iepriekšējā gadījumā, jo sieti tur slodzi. Grafīkā, kur parādīti paraugi ar četriem sietiem, atkal redzama papildu virsotne, kur notika sietu izraušana.



9. att. Betona B50 prizmas (ar 4 armējošiem sietiem) virsma pēc pilnīgas parauga pārlaušanas.

Analizējot stiprā betona grafikus (8. att.), var secināt, ka paraugi ar sietiem izturēja lielāku slodzi nekā paraugi bez sietiem, bet tajā pašā laikā paraugi ar četriem sietiem izrādījās vājāki nekā paraugi ar trim sietiem. Paraugiem ar sietiem grafiku daļa pēc plaisāšanas atkal ir garāka nekā paraugiem bez sietiem. Grafīkā, kur parādīti paraugi ar trim sietiem, ir vēl viena virsotne, kur notika sietu izraušana.

VIII. SECINĀJUMI

Telpiski stiegtie kompozītie materiāli salīdzinājumā ar parastiem slāņainiem kompozītajiem materiāliem izrāda lielāku pretestību bīdei transversālos virzienos, nenoslāņojas, labāk pretojas lokālajām, dinamiskajām un termiskajām slodzēm. Tomēr šo telpiskā stiegrojuma priekšrocību izpausmes pakāpe ir būtiski atkarīga no stiegrojuma intensitātes līmeņa, kas ir realizēta kompozītajā materiālā.

No šā darba rezultātiem var secināt, ka betons, kas stiegrots ar stikla šķiedras sietiem, ir jauns telpiski stiegroto kompozīto materiālu virziens. Ar sietiem var izgatavot kompozītos materiālus ar jebkādu ģeometriju, piemēram, plānsieniņu čaulas.

Eksperimenti ar prizmām liecina, ka stikla šķiedras sieti palielina betona paraugu stiprību. Tajā pašā laikā liela nozīme ir paraugu izgatavošanas kvalitātei, jo, palielinoties šķiedru apjomam paraugos, būtiski ir uzlabot adhēziju starp šķiedrām un betonu un samazināt gaisa poru daudzumu..

PATEICĪBA

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

LITERATŪRAS SARAKSTS

1. Тарнопольский, Ю. М., Жигун, И. Г., Поляков, В. А. Пространственно-армированные композиционные материалы: Справочник. Москва: Машиностроение, 1987. 224 с.
2. Нарусберг, В.Л. Устойчивость и оптимизация оболочек из композитов. 1988. 299 с.
3. Miravete, A. 3-D Textile Reinforcements In Composite Materials. 1999. 308 p.
4. Tong, L., Mouritz, A.P., Bannister, M.K. 3D Fibre Reinforced Polymer Composites. 2002. 241 p.
5. Лахтин Ю. М., Леонтьева В. П. Материаловедение: Учебник для высших технических заведений, – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1990. 538 с.
6. <http://www.valmiera-glass.com/lv/produkti/katalogs/spoletais-diegs-spoles-pamatnes#1>

Galina Harjkova, Dr. sc. ing., Institute of Mechanics, Riga Technical University.

Address: 6, Ezermalas iela, Riga, LV-1006, Latvia. Phone: +371 67089159;

Fax: +371 67089746;

E-mail: galina.harjkova@rtu.lv

Andrejs Krasnikovs, Dr. sc. ing., Professor, Institute of Mechanics, Riga Technical University.

Address: 6 Ezermalas iela, Riga, LV-1006, Latvia. Phone: +371 29436518;

Fax: + 371 67089159;

E-mail: akrasn@latnet.lv

Edgars Machanovskis, Ph.D. student, Institute of Mechanics, Riga Technical University.

Address: 6 Ezermalas iela, Riga, LV-1006, Latvia.

E-mail: Mac@apollo.lv

Galina Harjkova, Andrejs Krasnikovs, Edgars Machanovskis. 3D Reinforced Composite Materials with Brittle Matrix

An investigation is reported on non-traditional 3D reinforcement for composite materials with brittle matrix. Concrete was used as a material for the matrix. Three different compressive strength concrete matrix composites were investigated. 3D reinforcement was created using weft knitted E-glass fiber nets. The production technology of thin glass-fiber concrete matrix shells reinforced by knitted glass-fiber textiles was observed, and 1,5-cm-thick shells reinforced with three knitted nets were elaborated. The shells were produced using pneumatic mould technology. In general, the main goal of the work was to investigate the possibility of creating glass-fiber knitted textiles and to use them in the concrete as reinforcement analyzing the main technological problems rising by the manufacturing of such materials, and to investigate the strength of the final product. Main technological steps are described: a) knitting of glass-fiber yarn net with knitting machine; b) placing of the textile reinforcement into the mould and filling it with concrete. Finally, experimentally prepared prisms containing different numbers of reinforcing nets were tested for 4-point bending. Fiber-concrete fracture (and post-cracking) behavior was investigated depending on the strength of concrete matrix and the number of nets in prisms. Investigations showed high dependence of bending strength results on the porosity of material. Complete penetration of concrete with glass-fiber yarns inside the textiles (decreasing voids and pores) is very important for the strength of fiber-concrete prisms and for post-cracking behavior. This problem is becoming more important for increasing the number of reinforcing fibers and yarns in the reinforcing structure. The amount of glass fibers used in the present experiments can be characterized as small. The experiments demonstrated the importance of investigating materials with larger amount of fibers for materials with a higher load-bearing capacity in post-cracking stage.