

Elastīgi-plastiskas šķiedras izraušanas modelēšana

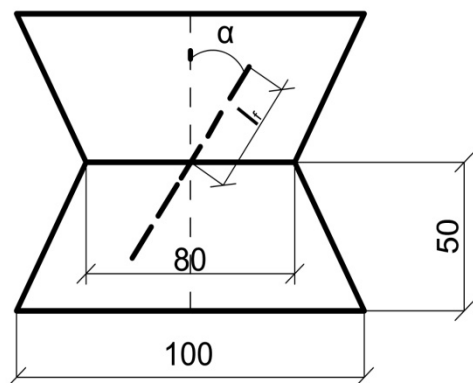
Andrejs Krasņikovs¹, Artūrs Mačanovskis²
^{1,2} Rīgas Tehniskā Universitāte

Kopsavilkums. Publikācijā salīdzināti skaitliskās modelēšanas rezultāti, raujot vienu šķiedru no elastīgas matricas, ar eksperimentālajiem rezultātiem, raujot tērauda šķiedru no augstas stiprības betona matricas. Skaitliski tika modelēta un pētīta berze starp šķiedru un matricu, kā arī šķiedras elastīgās un plastiskās deformācijas. Skaitliskās modelēšanas mērķis: novērtēt dažādu mehānisko parādību nozīmību, (piemēram, berzi, matricas rukumu, šķiedras plastiskumu) vienas šķiedras izraušanas procesā salīdzinājumā ar eksperimentālajiem datiem. Skaitliskās parametru vērtības gadījumā, kad tiek izrauta tērauda šķiedra no betona, matricas tika veiksmīgi iegūtas un analizētas.

Atslēgas vārdi: elastīgi-plastiska šķiedras, galīgo elementu metode, rukums, šķiedras izraušana.

I. IEVADS

Labi zināms, ka galvenais betona trūkums ir tā zemā stiepes stiprība. Betonam ir tendence plaisāt salīdzinoši nelielu spēku ietekmē, un šī iemesla dēļ tas tiek izmantots galvenokārt kā dzelzsbetons. Vairāki autori pierādījuši, ka kopumā betona uzvedību var uzlabot, pievienojot tam dažādas šķiedras. Fibrobeta ražošanai tiek izmantots plašs šķiedru klāsts: tērauda, sintētiskās, stikla, mikrokompozītās u.c. Tradicionālajās betona un būvniecības tehnoloģijās izmanto īsās šķiedras, kas ļauj izgatavot fibrobeta konstrukcijas ar šķiedru tilpuma armēšanas koeficienta vērtībām, kuras nepārsniedz dažus procentus. Šajā gadījumā šķiedru pievienošanas pozitīvā ietekme nav acīm redzama līdz brīdim, kamēr betonā rodas pirmās plaisas. Pēc šā brīža (t.i., pēc plaisu rašanās) fibrobeta (ar šķiedrām) uzvedība ir atšķirīga no betona bez šķiedrām. Palielinot ārējās slodzes, mikroplaisas fibrobeta sāk atvērties, augt un saplūst kopā, līdz izveidojas viena vai dažas makroplaisas. Šķiedras savieno katras plaisas malas,



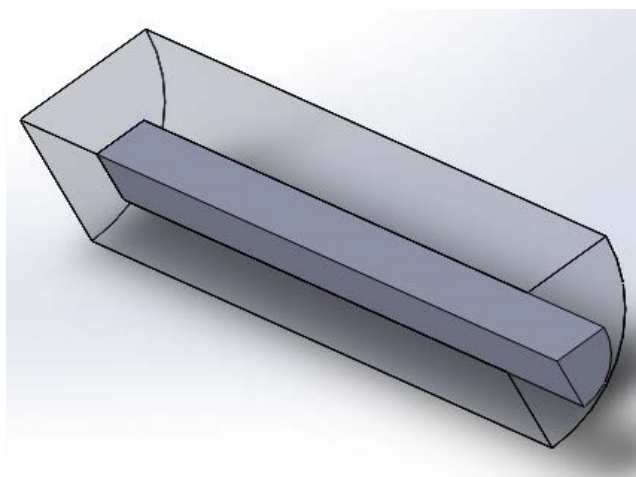
1. att. Testējamā šķiedras izraušanas parauga ģeometriskā forma (divi betona matricas prizmatiskie gabali savienoti ar šķiedru).

bremzējot to paplašināšanos un atvēršanos. Šis pētījums ir ierobežots ar tērauda šķiedru apskatīšanu. Galveno uzmanību vēršot uz vienas šķiedras izraušanas procesa mikromehānisko analīzi, nepieciešams minēt dažus darbus. Publikācijās [1–2] skaitliskā modelēšana veikta, imitējot taisnas šķiedras izraušanu no betona. Rakstā [3] aplūkots GEM (Galīgo Elementu Metodes) modelis, ar kura palīdzību pētīta nelineāras šķiedras uzvedība, kad tā tiek izrauta no matricas. Publikācijās [4–6] detalizēta 2D un 3D GEM modelēšana veikta, pētot spriegumu sadalījumu matricā šķiedru izraušanas procesa laikā.

Virsmu kontakta (šķiedra-matrica) mikromehānisko īpašību interpretācijas veikuši: Stang [7], Li [8], Li u.c. [9] un Stang u.c. [10]. Iegūts analītisks risinājums vienas šķiedras izraušanai no elastīgas matricas ar berzi, taisnleņķa virzienā [11]. Dažos darbos pētīta ar šķiedrām stieģrota betona uzvedība, kā arī analizēti mikromehāniskie parametri, kas ietekmē tērauda šķiedras izvilkšanas procesus no betona [12–15]. Līdzīgi pētījumi atspoguļoti [16].

II. EKSPERIMENTĀLIE PĒTĪJUMI

Tika sagatavoti betona paraugi ar vienu šķiedru, lai eksperimentāli noteiktu šķiedru izraušanas pretestību [17–20]. Paraugu forma un izmēri parādīti 1. attēlā. Redzams, ka viena tērauda šķiedra ir iestrādāta divos identiskas formas betona gabalos. Starp tiem tika ievietots plastmasas separators (0,1 mm bieža polikarbonāta plāksnīte). Lī rāda šķiedras iegremdēšanas garumu betona matricā (simetriski vienāds abos betona gabalos); α ir šķiedras slīpuma leņķis attiecībā pret pielikto izraušanas slodzes virzienu [18–20].



2. att. Ģeometriskais modelis.

Tika pētītas atšķirīgas ģeometrijas šķiedras. Visu veidu šķiedru garums bija 50 mm. Analizējamo paraugu forma tika izvēlēta tā, lai viegli pielāgotos testēšanas mašīnas satvērēju formai.

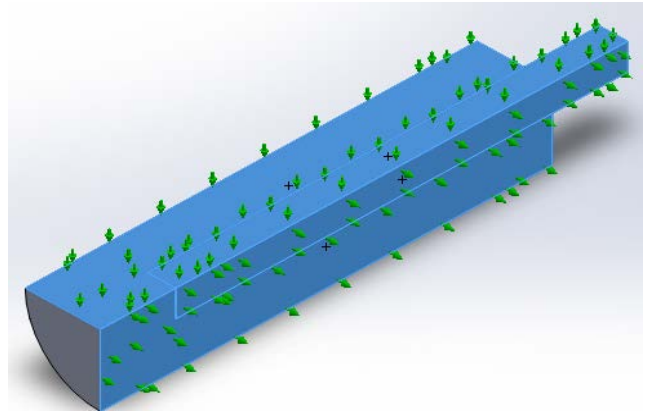
Publicētajos darbos katra veida šķiedrām izmantoti pieci dažādi iegremdēšanas garumi: 25 mm (50 mm garas šķiedras simetriska ielikšana), 20 mm, 15 mm, 10 mm un 5 mm. Eksperimentālie dati tika iegūti taisnām apaļa šķēsgriezuma tērauda šķiedrām ar diametru 0,75 mm, nosakot izraušanas pretestības spēka lieluma atkarību no izvilktā garuma šķiedrām, kas ievietotas dažādos leņķos. Iegūtie rezultāti tiks izmantoti salīdzinājumam ar skaitliskajiem modelēšanas datiem.

Eksperimentāli katrai šķiedras ievietošanas konfigurācijai tika izgatavoti un testēti deviņi paraugi, tādējādi nodrošinot iespēju iegūt rezultātu izkļūdes statistiskos parametrus. Šķiedras izraušanas testi tika veikti ar testēšanas mašīnas „Zwick / Roell” Z150 palīdzību, nodrošinot pastāvīgu pārvietojumu 10 mm minūtē. Tika lietota slodzi noteicoša papildiekārta ar maksimālo pieļaujamo stiepes spēku 1 kN. Šķiedras izvilšanas pārvietojums noteikts, izmantojot ārēji pieslēgto video ekstensometru „Messphysik”, ar kura palīdzību tika noteikts savstarpējais attālināšanās pārvietojums starp divām betona matricas daļām. Atskaite līnijas tika atzīmēta uz speciāli sagatavotas virsmas, kuru pielīmēja katram paraugam. Katrs tests veikts līdz pilnīgai šķiedras izraušanai no matricas (neviens no testiem netika novērota šķiedras plīšana). Dati par izvilšanas spēka vērtību un atbilstošo šķiedras izvilktā posma garumu tika automātiski sinhronizēti un reģistrēti katram paraugam atsevišķi.

Analizējot pieliktā izvilšanas spēka – pārvietojuma līknes, ir viegli secināt, ka tērauda šķiedras ar dažādu orientāciju un iegremdēšanas dziļumu dažādi piedalās un ietekmē mikromehāniskos izraušanas procesus. Sākumā šķiedra un apkārtējā betona matrica elastīgi deformējas. Lineāri elastīga šķiedras-matricas deformēšanās tiek pārtraukta ar virsmu kontaktu atdalīšanu, kas rodas vājās saķeres dēļ starp betona matricu un tērauda šķiedras virsmu. Šie mehānismi tika skaitliski pētīti [21], izmantojot plīsuma mehānikas metodes. Cilindriskā plaīsa starp šķiedru un matricu izplatās visā šķiedras garumā, līdz šķiedra tiek pilnīgi atdalīta no betona matricas. Pārvietojoties virsmām, veidojas berzes spēks šķiedras un betona matricas starpā. Ja tērauda šķiedra ir orientēta leņķī pret slogojuma virzienu, daļu no izraušanas pretestības spēka veido spēks, kurš deformē šķiedru elastīgi-plastiski. Acīmredzot, lai tērauda šķiedra deformētos (iztaisnotos) elastīgi-plastiski, nepieciešama apkārtējās betona matricas pietiekama stiprība. Gadījumā, ja apkārtējā betona matrica ir ar zemu stiprību, spriegumu koncentrācija vietā, kur šķiedra iznāk no matricas, izraisīs trauslas matricas gabalu atšķelšanos.

III. SKAITLISKĀ MODEĻA KALIBRĒŠANA GADĪJUMĀ, JA ŠĶIEDRA TIEK IEVIETOTA PERPENDIKULĀRI BETONA PRIZMAS ĀRĒJAI VIRSMAI

Viena taisna elastīgi-plastiska šķiedra tiek orientēta perpendikulāri elastīga tilpuma (rezultātu salīdzinājuma vajadzībai tiek pieņemts, ka tas ir betons) virsmai un tiek vilkta ārā no tā.

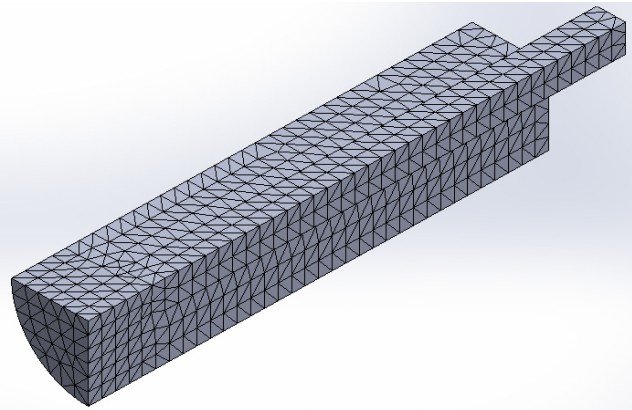


3. att. Robežnosacījumi GEM modelī. Uz sānu virsmām tiek pielietoti simetrijas robežnosacījumi; betona apjoma apakšējā gala pārvietojums šķiedras virzienā tiek pieņemts vienāds ar nulli; šķiedras ārējais gals pārvietojas ar konstantu ātrumu.

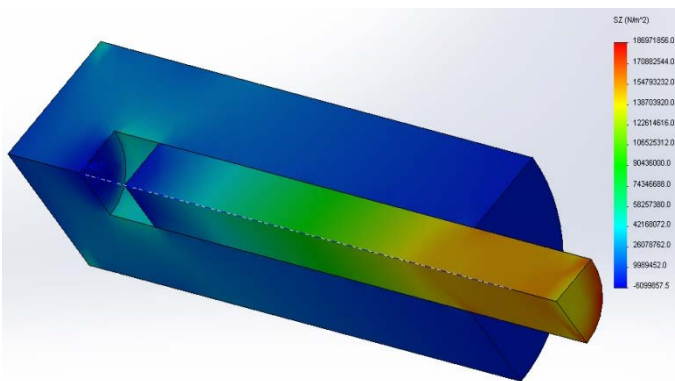
Šķiedras ar apkārtējo betona matricu 3D ģeometriskais modelis parādīts 2. attēlā. Izejot no simetrijas nosacījumiem, tikai viena ceturtdaļa daļa no apjoma tiek izmantota tālākai GEM modelēšanai. Šķiedra tiek vilkta ārā no matricas, un šķiedras un matricas virsmu starpā veidojas berze, kas modelī tiek ņemta vērā. Tiek ņemts vērā arī matricas rukums. Problēmu atrisina, izmantojot kontaktu elementus.

Šķiedras izvilšanas process tiek modelēts, izmantojot GEM programmu paketi SolidWorks, līdz šķiedras pilnīgai izraušanai. Pieliekot un kāpinot spēku, šķiedra ar matricu deformējas elastīgi, tad šķiedra atslāņojas no betona un velkošā slodze sāk pārvietot to pa šķiedras kanālu matricā. Lielākais ieguldījums pretestībā izraušanai ir sagaidāms no berzes spēka. Šķiedra izslīd ar berzi, tajā pašā laikā pati šķiedra elastīgi-plastiski deformējas. Izmantojot simetriju, tika modelēta tikai viena ceturtdaļa matricas tilpuma ar šķiedru. GEM skaitliskai modelēšanai tika izmantota viena ceturtdaļa daļa no apjoma (3. att.), matricas apakšējā gala pārvietojums šķiedras virzienā tika pieņemts vienāds ar nulli. Cilindru šķērsošajām plaknēm tika noteikti simetrijas robežnosacījumi. Šķiedra tika vilkta no matricas, pieliekot nemainīgu pārvietojuma ātrumu tās brīvā gala ortogonālajai virsmai. Vienlaikus izraušanas procesā šķiedras gala brīvā virsma paliek plakana un perpendikulāra šķiedras asij.

Modeļa GEM tīkls parādīts 4. attēlā. Starp šķiedru un matricu tika noteikti kontakta skaitliskie robežnosacījumi, kā arī noteikts berzes spēks. Tika izmantots Kulona sausās berzes modelis, kurā pieliktā spēka-pārvietojuma ātruma diagramma parādīta 6. attēlā. Skaitliskās modelēšanas rezultāti ir salīdzināti ar eksperimentālajiem datiem, kas iegūti, izraujot no betona dažādā dziļumā iegremdētu taisnu tērauda šķiedru, kuras garums ir 50 mm un diametrs 0,75 mm [16–18]. Salīdzināšanas mērķis ir noteikt, cik svarīgs ir šķiedras plastiskums no berze starp šķiedru un matricu reālās šķiedras izraušanas procesā. Skaitliski aprēķinātais sprieguma sadalījums (šķiedras virzienā) šķiedrā un matricā parādīts 5. attēlā.

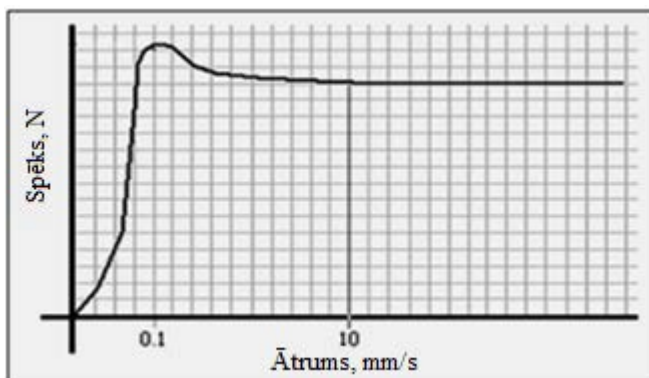


4. att. GEM tīkls.



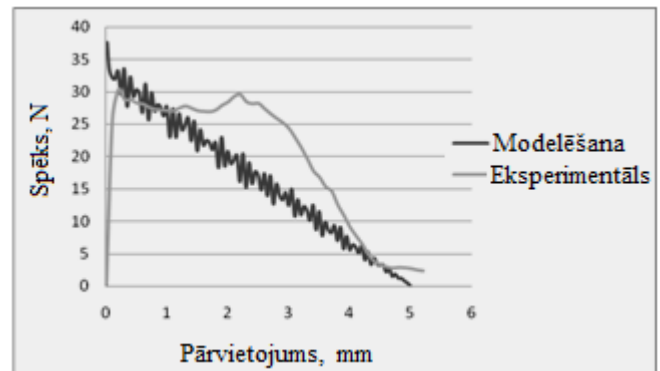
5. att. Spriegumu sadalījums šķiedrā un matricā.

7. attēlā parādīta eksperimentālā diagramma: pieliktais spēks – šķiedras pārvietojums tērauda šķiedrai, kas iegremdēta 5 mm dziļumā betona matricā un tiek rauta no tās ārā. Skaitliskās modelēšanas rezultāti ir atkarīgi no berzes koeficienta lieluma starp betonu un tērauda šķiedru un betona matricas rukumu. Abi šie parametri tika mainīti modelī, lai pēc iespējas tuvāk aproksimētu eksperimentāli iegūto līkni. Makroskopiskas mijiedarbības berzes koeficients starp tēraudu un betonu ir zināms no literatūras un ir vienāds ar 0,45. Sākotnēji modelī tika pieņemta tā pati vērtība. Matricas rukuma vērtību izmantoja kā piedzišanas parametru. Skaitliski tas tika darīts, ievietojot šķiedru matricā ar tukšu šķiedras kanālu, pie tam šķiedras ārējais diametrs bija lielāks nekā kanāla iekšējais diametrs.



6. att. Sausā Kulona berze starp šķiedru un matricu.

Piemēram, pie betona matricas rukuma 0,09 % vistuvākā rezultātu sakritība tika iegūta, ja šķiedras ārējais diametrs bija 0,75 mm, bet kanāla iekšējais diametrs matricā bija vienāds ar 0,7493 mm (7. attēls).

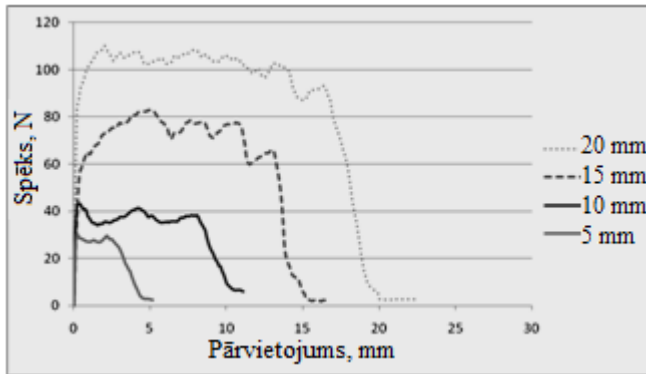


7. att. Izraušanas modelēšana. Skaitliskās modelēšanas līknes piedzišana eksperimentālajai līknei gadījumā, ja taisna šķiedra iegremdēta matricā 5 mm dziļumā pie betona rukuma 0,09 %.

IV. ŠĶIEDRAS IEGREMDETAS DAŽĀDOS DZIĻUMOS

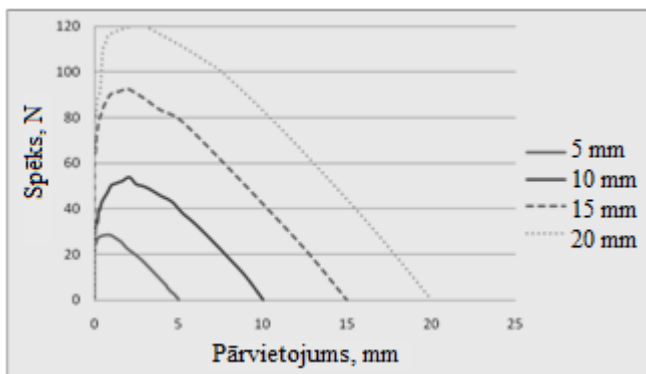
Eksperimentāli iegūtās diagrammas pieliktais spēks – šķiedras pārvietojums gadījumos, kad šķiedras galu iegremde betona matricā ir dažādos dziļumos (5, 10, 15 un 20 mm), apkopotas 8. attēlā [15–18]. Šķiedra tika ievietota noteiktajā dziļumā L perpendikulāri betona tilpuma ārējai virsmai un tika vilkta ārā šķiedras virzienā. Skaitliskā modelēšana tika veikta šķiedrai un matricai ar tādām pašām mehāniskajām īpašībām kā eksperimentos. Deviņi paraugi tika izgatavoti un testēti katram šķiedras iegremdēšanas dziļumam. Vidējās līknes katram enkurojuma dziļumam parādītas 9. attēlā. Katrai eksperimentālajai līknei ir raksturīgi posmi. Pirmais posms (sākas ar šķiedras izvilkšanas pārvietojumu no nulles līdz 0,05–0,15 mm) atbilst šķiedras elastīgajai deformācijai elastīgā matricā ar pilnīgo saiti starp šķiedru un matricu. Līknes posms ir taisna līnija. Šis posms tika veiksmīgi modelēts iepriekš izstrādātajā skaitliskajā modelī [4–6]. Līknes otrais posms (sākas ar šķiedras izvilkšanas pārvietojumu no 0,05–0,15 mm līdz 0,5–0,6 mm, skatoties pēc pārvietojuma ass) atbilst atslāņošanās palielināšanai starp šķiedras un matricas virsmām līdz pilnīgai saites pārtraukšanai. Līknes trešais posms saistīts ar šķiedras slīdēšanu ar berzi ārā no matricas un šķiedras daļējo plastisko deformāciju, īpaši šķiedrām ar lielu enkurojuma dziļumu. Sākumā līkne iet uz augšu, pieliktais spēks palielinās, uz eksperimentālās līknes var noteikt „plato” posmu ar praktiski nemainīgu pielikto velkošo spēku, palielinoties izvilkšanas pārvietojumam. Maksimumus un minimumus šajā līknes posmā (līdzīgi svārstībām) var izskaidrot ar šādi. Mazas betona daļiņas atdalās no iekšējās betona virsmas un, šķiedrai slīdot ārā no betona, pārvietojas gar kanālu betonā (starp betona un šķiedras virsmām), veidojot sastrēgumus (korķus). Pie šķiedru kustības šo daļiņu sastrēgumi palielina pārvietošanās pretestību. Pēc tam, kad daļiņu sastrēgums pārvarēts, tas ļauj šķiedrai atkal pārvietoties ar mazāko velkošo slodzi. Sīkas daļiņas betona kanālā starp šķiedru un matricu ripinās ārā, un pēc kāda laika veidojas nākamais daļiņu sastrēgums (nākamais lokālais

maksimums līknē). Sīku daļiņu sastrēgumu veidošanās process ir atkarīgs no dziļuma, kādā ievietota šķiedra (pēc eksperimentālās līknes var redzēt vairākus maksimumus, kas ir atkarīgi no tā, kādā dziļumā tika ievietota šķiedra: jo lielāks dziļums, jo līknē vairāk maksimumu), betona matricas granulometriskā sastāva un matricas iekšējās kohēzijas. Šajā posmā skaitliskā modeļa līknes (sk. 9. att.) neatbilst eksperimentālajām līknēm. Kā iemeslu var minēt



8. att. Eksperimentālie dati taisnai tērauda šķiedrai ar dažādiem enkurojuma dziļumiem: 5 mm, 10 mm, 15 mm un 20 mm.

skaitliskajā modelī pieņemto konstanto slīdēšanas berzes koeficientu starp divām saskarsmes virsmām – starp šķiedru un matricu. Skaitliski sarēķinātās līknes nesatur „plato” posmu, un pēc maksimuma sasniegšanas pieliktais izraušanas spēks monotoni samazinās proporcionāli tam, kā, izvelkot šķiedru no matricas, samazinās šķiedras virsmas lielums, kas ir saskarsmē ar matricu.



9. att. Skaitliskās modelēšanas dati pie dažādiem enkurojuma dziļumiem: 5 mm, 10 mm, 15 mm un 20 mm.

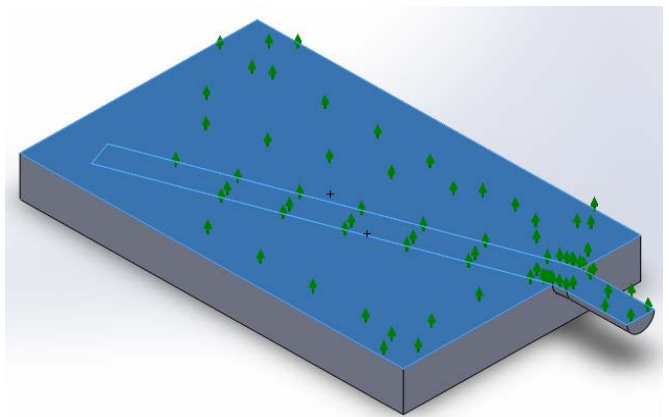
V. ŠĶIEDRAS IEGREMDĒTAS AR DAŽĀDIEM LENĶIEM

Bieži sastopama situācija, kad plaisa, kura sadala kompozīto materiālu, kas armēts ar īsām šķiedrām, šķērso šķiedru tādā veidā, ka tā atrodas leņķī pret plaisas virsmu. Šī situācija eksperimentāli ir pētīta darbos [17, 19–20]. Lai skaitliski modelētu šo situāciju, tika izveidots modelis: taisna elastīgi-plastiska šķiedra tika iegremdēta elastīgā matricā leņķī pret tās izvilkšanas virzienu; šķiedras brīvais gals tika vilkts perpendikulāri elastīgā apjoma ārējai virsmai. 3D ģeometriskais modelis tika izstrādāts, izmantojot GEM SolidWorks

programmatūru (skat. 10. att.). Pamatojoties uz simetrijas nosacījumiem, nepieciešams apskatīt tikai pusi no matricas apjoma ar šķiedru. Šķiedras izvilkšanas process tiek modelēts, ņemot vērā berzi starp šķiedru un matricu.

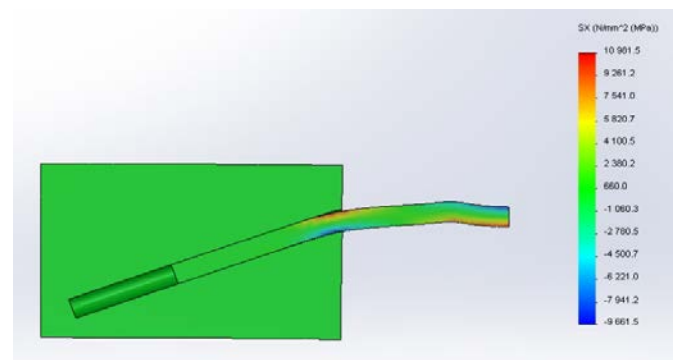
Šajā aprēķinā matricas rukums netiek ņemts vērā. Problēma tika risināta, izmantojot kontaktu analīzes metodi. Šķiedras pilnais izraušanas process tika modelēts līdz brīdim, kad viss šķiedras iegremdētais gals izslīd no matricas. Šķiedras un matricas plakanajām virsmām tika noteikti simetrijas robežnosacījumi, un, līdzīgi iepriekšējiem modeļiem, matricas bloka pakalējās skaldnes pārvietojums šķiedras izvilkšanas virzienā tika ierobežots (10. att.). Šķiedras gala brīvā virsma izraušanas procesā paliek plakana un ir perpendikulāra šķiedras asij (tajā šķiedras daļā, kura atrodas ārpus matricas). Šķiedras brīvais gals pārvietojas ar konstantu ātrumu.

Tālāk aprakstīta šķiedras izvilkšanas modelēšana. Šķiedra ir atslāņojusies no betona. Šķiedras izraušanas procesā šķiedras kustība pa kanālu matricā notiek ar berzi. Katrs šķiedras šķēlums, šķērsojot elastīgās matricas bloka ārējās virsmas plakni, tiek deformēts elastīgi-plastiski. Tādā veidā izraušanas spēks veidojas, pārvarot berzi starp šķiedru un matricu un elastīgi-plastiski liecot katru šķiedras šķēlumu,

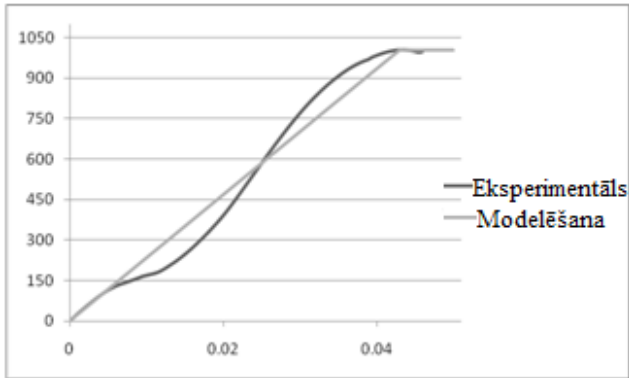


10. att. Skaitliskā modeļa ģeometrija šķiedrai, kas iegremdēta zem leņķa pret tās izvilkšanas virzienu. Modeļa robežnosacījumi: pārvietojuma liegums izvilkšanas virzienā uz matricas skaldnes, kas pretēja tai, no kuras tiek vilkta šķiedra; simetrijas robežnosacījumi uz skaldnes, kura šķēļ apjomu uz pusēm.

kurš iziet no matricas. Sprieguma (horizontālā komponente) sadalījums deformētā šķiedrā un matricā izraušanas procesā ir parādīts 11. attēlā. Šķiedras materiāla elastīgi-plastiskās

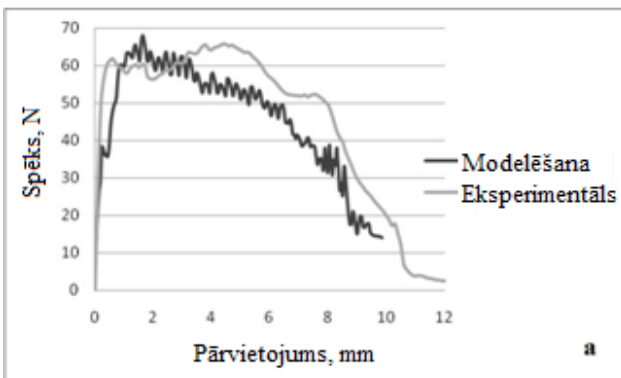


11. att. Spriegumu sadalījums šķiedrā, kas iegremdēta matricā 10 mm dziļumā; šķiedra orientēta 20° leņķī pret pieliktā spēka virzienu.



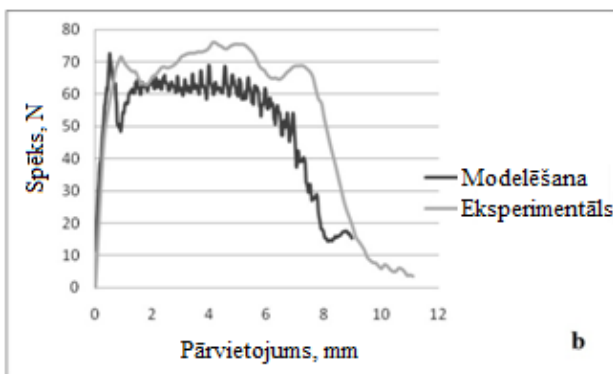
12. att. Šķiedras materiāla elastīgi-plastiskās uzvedības spriegumu-deformācijas līkne.

deformācijas diagramma parādīta 12. attēlā. Spriegums, kas ir šķiedras ārējos slāņos, pārsniedz tērauda tecēšanas robežu, tāpēc lielo pārvietojumu pieņemums nepieciešams izvilksanas procesa analītiskās modelēšanas gadījumā. Eksperimentāli tika iegūta līkne spriegums-deformācija šķiedrām ar dažādiem enkurojuma dziļumiem un orientētām dažādos leņķos pret pieliktā izraušanas spēka virzienu [16–18].

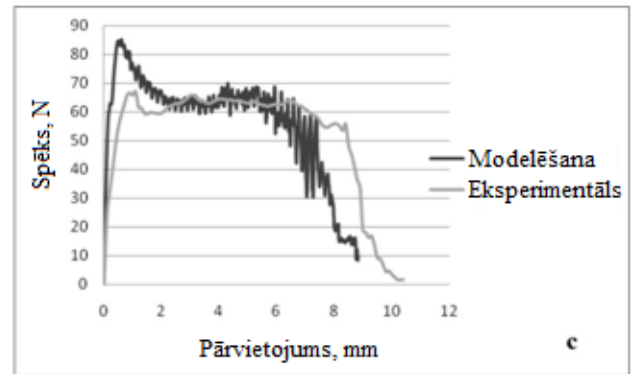


13.a att. Eksperimentālās un modelēšanas līknes šķiedrai, kas iegremdēta matricā 10 mm dziļumā; šķiedra orientēta 20° leņķī pret pieliktā spēka virzienu.

Attēlos 13.a–13.c parādītas eksperimentālās un modelēšanas līknes taisnai apaļa šķērsgriezuma tērauda šķiedrai ar garumu 50 mm un diametru 0,75 mm, kas tika iegremdēta matricā 10 mm dziļumā un kas ir orientēta leņķī (13.a att. – 20°; 13.b att. – 45°; 13.c att. – 60°) pret pielikto izraušanas spēka virzienu.

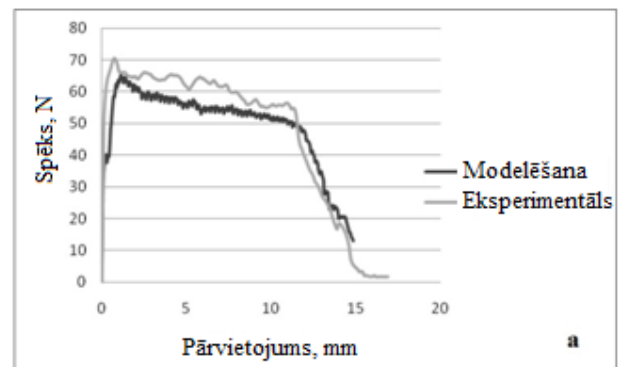


13.b att. Eksperimentālās un modelēšanas līknes šķiedrai, kas ievietota matricā 10 mm dziļumā; šķiedra orientēta 45° leņķī pret pieliktā spēka virzienu.

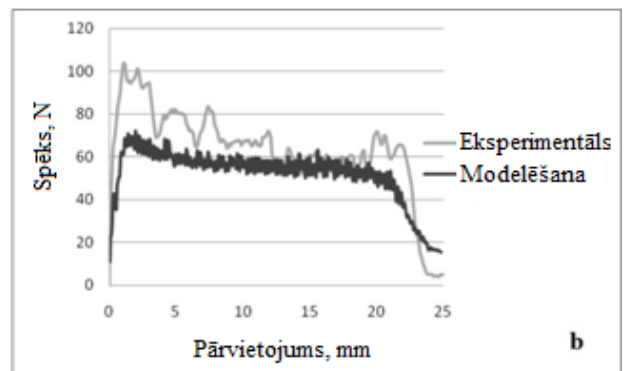


13.c att. Eksperimentālās un modelēšanas līknes šķiedrai, kas ievietota matricā 10 mm dziļumā; šķiedra orientēta 60° leņķī pret pieliktā spēka virzienu.

Attēlos 14.a un 14.b parādītas eksperimentālās un modelēšanas līknes šķiedrai, kas ievietota matricā 20° leņķī pret



14.a att. Eksperimentālās un modelēšanas līknes šķiedrai, kas ievietota matricā 20° leņķī pieliktā spēka virzienā; šķiedra iegremdēta matricā 15 mm dziļumā.



14.b att. Eksperimentālās un modelēšanas līknes šķiedrai, kas ievietota matricā 20° leņķī pieliktā spēka virzienā; šķiedra iegremdēta matricā 25 mm dziļumā.

pieliktā spēka virzienu: 14.a att. – šķiedra ievietota matricā 15 mm dziļumā; 14.b att. – šķiedra ievietota matricā 25 mm dziļumā. Salīdzinot eksperimentālos datus ar skaitliskajiem modelēšanas rezultātiem, var secināt, ka gadījumos, kad šķiedra orientēta leņķī pret tās izvilksanas virzienu, pastāv iespēja aproksimēt eksperimentos novēroto šķiedras izvilksanas mikromehāniku, mainoties plašā diapazonā šķiedras orientācijas leņķim un iegremdēšanas dziļumam, ņemot vērā tikai divus nelineārus procesus: a) šķiedras-matricas berzi un b) šķiedras plastisko deformēšanos. Tomēr jāatzīst, ka šī pieeja nespēj aprakstīt mikromehāniku šķiedrai, kas novietota paralēli izvilksanas virzienam. Lai uzlabotu modeli, izraušanas procesā jāņem vērā sīku daļiņu sastrēgumu veidošanās starp šķiedru un

matricu, ko var veikt, ievadot mainīgo nelineāro berzes koeficientu starp šķiedru un matricu izvilšanas gaitā.

VI. SECINĀJUMI

Darbā aprakstīti detalizēti 3D skaitliski (izmantojot GEM) pētījumi, modelējot vienas atsevišķas elastīgi-plastiskas šķiedras izraušanu no betona matricas. Modelēšanas rezultāti tika salīdzināti ar eksperimentāliem datiem, velkot tērauda šķiedru no betona matricas. Pierādīts, ka modeļi, kas balstās tikai uz pieņēmumiem par berzi starp šķiedru un matricu un elastīgi-plastisko šķiedras deformēšanos, nespēj prognozēt eksperimentāli iegūtās līknes. Ir jāņem vērā mazo betona daļiņu atdalīšanās no šķiedras kanāla iekšējās virsmas, pateicoties šķiedras berzei, un sīko daļiņu sastrēgumu veidošanās process. Sīko daļiņu sastrēgums starp šķiedru un matricu palielina pretestību šķiedras izvilšanai. Kad sīko daļiņu sastrēgums tiek pārvarēts, nepieciešamā izvilšanas spēka lielums samazinās. Nelielas daļiņas kanālā starp šķiedru un matricu pēc kāda laika veido nākamo daļiņu sastrēgumu. Ar skaitlisko modelēšanu parādīts, ka situācijā, kad šķiedras ievietotas leņķī pret pielikto izraušanas spēka virzienu, sīku daļiņu sastrēgumu veidošanās mikromehānismu var aizvietot, daļēji palielinot šķiedras plastiskās deformēšanās ietekmi uz izvilšanas spēka lielumu, kas pēc būtības nav pareizi, bet tomēr noved pie labas eksperimentālo līkņu aproksimācijas.

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

- Li, C., Mobasher, B. Finite element simulations of fiber pull-out toughening in fiber reinforced cement based composites. *Journal of Advanced Cem. Based Mater.*, vol. 7, no. 3–4, 1998, pp. 123–132.
- Mobasher, B., Li, C. Modeling of stiffness degradation of the interfacial zone during fiber debonding. *Journal of Compos. Eng.*, vol. 5, no. 10–11, 1995, pp. 1349–1365.
- Tsai, J., Patra, A., Wetherhold, R. Finite element simulation of shaped ductile fiber pull-out using a mixed cohesive zone/friction interface model. *Compos. Part A, Appl. Sc. Manuf.* vol. 36, no. 6, 2005, pp. 827–838.
- Krasnikovs, A., Khabaz, A. and Kononova, O. Numerical 2D Investigation of Non-metallic (glass and carbon) Fiber Micro-mechanical Behavior in Concrete Matrix. *Sc. Proceedings of Riga Technical University, Architecture and Construction Science.* 2. vol. 10, 2009, pp. 67–78.
- Krasnikovs, A., Kononova, O. Strength prediction for concrete reinforced by different length and shape short steel fibers. *Sc. Proceedings of Riga*

- Technical University. Transport and Engineering*, 6, vol. 31, 2009, pp. 89–93.
- Krasnikovs, A., Khabaz, A., Telnova, I., Machanovsky, A., Klavinsh, I. Numerical 3D investigation of non-metallic (glass, carbon) fiber pull-out micromechanics (in concrete matrix). *Sc. Proceedings of Riga Technical University, Transport and engineering*, 6, vol. 33, 2010, pp. 103–108.
- Stang, H. In *Fracture of Brittle, Disordered Materials: Concrete, Rock and Ceramics*. Baker, G.; Karihaloo, B.L., Eds.; E&FN Spon: London, 1995, pp. 131–148.
- Li, V. *ASCE J, Mater. Civil Eng.* 1992, 4, pp. 41–57.
- Li V., Stang, H. and Krenchel, H. *Mater. Struct.* 1993, 26, pp. 486–494.
- Stang, H., Li, V. and Krenchel, H.J. *Mater. Struct.* 1995, 28, pp. 210–219.
- Hutchinson, J.W., Jensen, H.M. Models of fiber debonding and pullout in brittle composites with friction. *Journal of Mechanics of Materials* 9, 1990, pp. 139–163.
- Jones, P. A., Austin, S. A., Robins, P. J. Predicting the flexural load-deflection response of steel fiber reinforced concrete from strain, crack-width, fiber pull-out and distribution data. *Journal of Materials and Structures*, 2008, pp. 449–463.
- Robins, P., Austin, S., Jones, P. Pull-out behaviour of hooked steel fibers. *Materials and Structures*, 35, 2002, pp. 434–442.
- Bentur, A., Wu, S., Banthia, N., Baggott, R., Hansen, W., Katz, A., Leung, C., Li, V., Mobasher, B., Naaman, A., Robertson, R., Soroushian, P., Stang, H. and Taerwe, L. In *High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites*; Naaman, A., Reinhardt, H., Ed., London, 1995, pp. 149–191.
- Li, V. and Maalej, M. *Cement and Concrete Composites* 18, 1996, pp. 239–249.
- Georgiadi-Stefanidi, K., Mistakidis, E., Pantousa, D., Zygomalas, M. Numerical modelling of the pull-out of hooked steel fibers from high-strength cementitious matrix, supplemented by experimental results. *Constr. Build. Mater.* 24, 2010, pp. 2489–2506.
- Pupurs, A., Krasnikovs, A., Kononova, O., Shakhmenko, G. Non-linear post-cracking behavior prediction method for high concentration steel fiber reinforced concrete (HCSFRC) beams. *Scientific proceedings of Riga Technical University, Construction science*, 2007, pp. 60–70.
- Krasnikovs, A., Pupurs A., High-Performance Steel Fiber Reinforced Concrete (SFRC) Fracture. Fiber Pull-Out Experimental Investigation. In: *8th International Symposium on Utilization of High-Strength and High-Performance Concrete*. October 27–29, 2008, Tokyo, Japan, 2008, pp. 161–170.
- Pupurs, A. *Prediction of Load Bearing Capacity of Structural Steel Fiber Reinforced Concrete*. Doctoral Theses, Riga Technical University, 2011, 149 p.
- Rozīte, L. *High Strength Fiberconcrete Use in Structural Elements Subjected to Bending*. M.Sc. Theses, Riga Technical University, 2009, 51 p.
- Pupurs A. and Varna J. Fracture Mechanics Analysis of Debond Growth in a Single-Fiber Composite under Cyclic Loading. *Mechanics of Composite Materials*. vol. 47, no. 1, 2011, pp. 109–124.

Andrejs Krasnikovs, Dr. sc. ing., Professor, Institute of Mechanics, <http://www.mi.rtu.lv>, <http://www.bml.rtu.lv>. Riga Technical University. Address: 6 Ezermalas iela, Rīga, LV-1006, Latvia. Phone: +371 29436518; Fax: + 371 67089159; E-mail: akrasn@latnet.lv

Arturs Macanovskis, Dr. sc. ing., Researcher, Institute of Mechanics, <http://www.mi.rtu.lv>. Riga Technical University. Address: 6 Ezermalas iela, Rīga, LV-1006, Latvia. E-mail: artursmacanovskis@inbox.lv

Andrejs Krasnikovs, Arturs Macanovskis. Elasto-plastic fiber pull-out modeling

In the present work numerical modeling results were obtained for single fiber pull-out of elastic matrix. Obtained results are compared with the experimental data for single steel fiber pull-out of high strength concrete matrix. Fiber is behaving elasto-plastically. The pull-out process was studied by means of accurate 3D elasto-plastic modeling. Numerical modeling takes into account the non-linearity of material for finite element method (FEM). Numerical modeling was performed for straight-shape fiber embedded into elastic matrix under variable angles to applied pulling force and at variable depth. Friction between fiber and matrix, concrete matrix shrinkage, and elastic and plastic deformations in fiber were investigated. Compared to experimental data, the objective of numerical modeling was to evaluate the significance of different phenomena such as friction between steel fiber and concrete matrix, matrix shrinkage and fiber's plasticity in single fiber pull-out process. The numerical values of the parameters of steel fiber in concrete matrix were successfully obtained and analyzed. The reason of insignificant non-coincidence of the results of numerical modeling and experimental data was analyzed. As a result, was proposed a hypothesis about the "plato" appearance in diagram force-displacement. It can be explained by plugs formation in concrete matrix channel.