

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

STATYBOS FAKULTETAS

METALINIŲ IR KOMPOZITINIŲ KONSTRUKCIJŲ KATEDRA

Mantas Garnevičius

**TECHNOLOGINIŲ SPRENDIMŲ, SKIRTŲ BETONO SUKIBČIAI SU
SINTETINIU PLAUSU GERINTI, ANALIZĖ**

**ANALYSIS OF TECHNOLOGICAL SOLUTIONS FOR IMPROVING THE
BOND BETWEEN CONCRETE AND SYNTHETIC FIBER**

Baigiamasis magistro darbas

Statinių konstrukcijų studijų programa, valstybinis kodas 6211EX040

Tiltų ir viadukų specializacija

Statybos inžinerijos 02T mokslo kryptis

Vilnius, 2019

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

STATYBOS FAKULTETAS

METALINIŲ IR KOMPOZITINIŲ KONSTRUKCIJŲ KATEDRA

TVIRTINU
Katedros vedėjas

(Parašas)

Antanas Šapalas

(Vardas, pavardė)

2019-06-03
(Data)

Mantas Garnevičius

**TECHNOLOGINIŲ SPRENDIMŲ, SKIRTŲ BETONO SUKIBČIAI SU
SINTETINIŲ PLAUSŲ GERINTI, ANALIZĖ**

**ANALYSIS OF TECHNOLOGICAL SOLUTIONS FOR IMPROVING
THE BOND BETWEEN CONCRETE AND SYNTHETIC FIBER**

Baigiamasis magistro darbas

Statinių konstrukcijų studijų programa, valstybinis kodas 6211EX040

Tiltų ir viadukų specializacija

Statybos inžinerijos 02T studijų kryptis

Vadovas

Dr. Viktor Grilimius
(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

2019-06-03
(Data)

Lietuvių kalbos konsultantas

lekt. Jūratė Jurevičiūtė
(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

2019-06-03
(Data)

Vilnius, 2019

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
STATYBOS FAKULTETAS FAKULTETAS
METALINIŲ IR KOMPOZITINIŲ KONSTRUKCIJŲ KATEDRA

Statybos inžinerijos 02T studijų kryptis

Statinių konstrukcijų studijų programa, valstybinis kodas 6211EX040

Tiltų ir viadukų specializacija

TVIRTINU
Katedros vedėjas

(Parašas)

Antanas Šapalas

(Vardas, pavardė)

2019-03-12

(Data)

BAIGIAMOJO MAGISTRO DARBO

UŽDUOTIS

2019-10-01 Nr.

Vilnius

Studentui **Mantui Garnevičiui**

Baigiamojo darbo tema: **Technologinių sprendimų, skirtų betono sukibčiai su sintetiniu plaušu gerinti, analizė**

patvirtinta 2019 m. kovo 12 d. dekanų potvarkiu Nr. 105st.

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas 2019 m. birželio 4 d.

BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:

Tikslas – eksperimentiškai nustatyti pasirinktų sintetinių plaušų sukibties su betonu parametrus ir įvertinti sukibties kokybės (stiprio) gerinimo galimybes.

Darbo tikslui pasiekti suformuluoti šie uždaviniai: 1. Atlikti literatūros šaltinių apie jau atliktus tyrimus su sintetiniais ir kitokiais plaušais analizę. 2. Atlikti sintetinio plaušo ištraukimo bandymus, keičiant plaušo tipą bei įgilinimo ilgį. 3. Įvertinti įmanomų sprendinių plaušo sukibimo savybėms pagerinimo galimybes. 4. Atlikti naujus bandymus su gerintais bandiniais.

Vadovas

(Parašas)

Dr. Viktor Gribniak

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

Užduotį gavau

(Parašas)

Mantas Garnevičius

(Vardas, pavardė)

2019-06-03

(Data)

(Baigiamojo darbo sąžiningumo deklaracijos forma)

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Mantas Garnevičius, 20132682

(Studento vardas ir pavardė, studento pažymėjimo Nr.)

Statybos fakultetas

(Fakultetas)

Statinių konstrukcijos, TILfm-17

(Studijų programa, akademinė grupė)

BAIGIAMOJO DARBO (PROJEKTO)

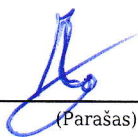
SĄŽININGUMO DEKLARACIJA

2019 m. birželio 12 d.

Patvirtinu, kad mano baigiamasis darbas tema „Technologinių sprendimų, skirtų betono sukibčiai su sintetiniu plaušu gerinti, analizė“ patvirtintas 2019 m. kovo 12 d. dekanų potvarkiu Nr. 105st, yra savarankiškai parašytas. Šiame darbe pateikta medžiaga nėra plagijuota. Tiesiogiai ar netiesiogiai panaudotos kitų šaltinių citatos pažymėtos literatūros nuorodose.

Mano darbo vadovas daktaras Viktor Gribniak.

Kitų asmenų indėlio į parengtą baigiamąjį darbą nėra. Jokių įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs (-usi).



(Parašas)

Mantas Garnevičius

(Vardas ir pavardė)

Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Statybos fakultetas
Metalinių ir kompozitinių konstrukcijų katedra

ISBN ISSN
Egz. sk.
Data-.....-.....

Antrosios pakopos studijų **Statinių konstrukcijų** programos magistro baigiamasis darbas

Pavadinimas **Technologinių sprendimų, skirtų betono sukibčiai su sintetiniu plaušu gerinti, analizė**

Autorius **Mantas Garnevičius**

Vadovas **Viktor Gribniak**

Kalba: lietuvių

Anotacija

Šio tyrimo objektas yra sintetinio makroplaušo sukibtis su betonu. Sukibtis – viena iš svarbiausių armuojančios medžiagos savybių. Ši savybė nusako armuojančios medžiagos efektyvumą ir susideda iš 2 svarbiausių parametru: sukibties stiprio bei šių medžiagų kontakto deformatyvumo. Šios savybės lemia sintetinio makroplaušo, kaip armuojančios medžiagos, efektyvumą, tačiau nėra sukurta bendros metodikos šioms savybėms įvertinti. Taip pat nėra aiškių būdų sintetinio makroplaušo sukibties kokybei pagerinti. Baigiamojo magistro darbo tikslas – eksperimentiškai nustatyti pasirinktų sintetinių plaušų sukibties su betonu parametrus ir įvertinti sukibties kokybės (stiprio) gerinimo galimybes.

Baigiamajame darbe atlikta literatūros šaltinių įvairių tipų plaušų traukimo iš betono bandymų bei parametru lemiančių jų sukibtį analizė. Atlikti sintetinio makroplaušo sukibties su betonu mechaninių savybių tyrimai; pasiūlytas šių savybių gerinimo būdas.

Baigiamąjį magistro darbą sudaro: įvadas, trys skyriai, išvados ir literatūros sąrašas. Darbo apimtis - 55 puslapiai. Tekste pateikti 47 paveikslai ir 12 lentelių. Rašant šį darbą remtasi 36 literatūros šaltiniais.

Prasminiai žodžiai: plaušas, sintetinis makroplaušas, sukibties charakterizacija, plaušo ištraukimo bandymai, sukibties gerinimas,

Vilnius Gediminas Technical University
Faculty of Civil Engineering
Department of Steel and Composite Structures

ISBN ISSN
Copies No.
Date-.....-.....

Master Degree Studies **Structural Engineering** study programme Master Graduation Thesis

Title **Analysis of technological solutions for improving the bond between concrete and synthetic fiber**

Author **Mantas Garnevičius**

Academic supervisor **Viktor Gribniak**

Thesis language: Lithuanian

Annotation

The research object of this study is the bond of synthetic macrofiber in concrete. Mechanical properties of the bond (strength and deformability) are among the most important properties, which describe the effectiveness of reinforcing materials. There are neither general methodologies to characterise effectiveness of a synthetic macrofiber nor unify methods to improve it. The aim of this thesis is to determine experimentally the bond parameters of selected synthetic fibers and evaluate possibilities to improve the bond quality.

In this thesis, analysis of literature related to bond tests of different fibre types and the corresponding mechanical properties was carried out. Pull-out tests of synthetic fibers were performed; a method to improve the bond quality was proposed as well.

The thesis consists of introduction, three chapters, conclusions, and references. Total number of pages is 55. The thesis includes 47 figures and 12 tables. The literature list includes 36 references.

Keywords: fiber, synthetic macrofiber, ,bond charecterization, pull-out tests, bond improvement

Turinys

ĮVADAS.....	11
1. LITERATŪROS APŽVALGA.....	14
1.1. Plaušo tipai, forma ir medžiagos.....	14
1.2. Plaušu armuoto betono sudėtis.....	17
1.3. Sintetinio plaušo sukibtis su betonu ir įbetonavimo ilgio nustatymas	19
1.4. Sintetinio plaušo efektyviausio įbetonavimo kampo ir plaušo formos nustatymas	20
1.5. Plaušo traukimo bandymų tipai.....	21
1.6. Tyrimuose bandyti plaušai ir bandinių tipai	23
1.7. Skyriaus išvados.....	24
2. PLAUSO SUKIBTIES SAVYBIŲ NUSTATYMAS.....	26
2.1. Plaušo aprašymas	26
2.2. Betono aprašymas.....	27
2.3. Bandinių paruošimas	28
2.4. Tyrimų atlikimo aprašymas	29
2.5. Skyriaus išvados ir rezultatų aptarimas	33
3. PLAUSO SUKIBTIES SAVYBIŲ STIPRINIMAS.....	35
3.1. Chemiškai stiprinto betono bandymai (Pirmasis stiprinimo etapas).....	35
3.1.1. Chemiškai modifikuotas betonas	35
3.1.2. Pirmojo stiprinimo etapo bandinių rezultatai	36
3.2. Betono stiprinto su plieno plaušu bandymai (Antrasis ir trečiasis stiprinimo etapai).....	39
3.2.1. Plieninio mikroplaušo ir betono aprašymas	39
3.2.2. Bandinių su plieniniu mikroplaušu paruošimas.....	42
3.2.3. Bandinių su plieniniu mikroplaušu rezultatai.....	46
3.3. Stiprinimo rezultatų aptarimas ir išvados	49
IŠVADOS IR REKOMENDACIJOS	52
LITERATŪROS ŠALTINIAI	54
PRIEDAI	56

Paveikslų sąrašas

1 pav. Sintetinis makrop্লাušas (GCP Applied Technologies Inc., 2017)	15
2 pav. Plieninis mikrop্লাušas (Fibrezone, Micro Steel Fibre Brass Coated, 2019).....	15
3 pav. Sintetinis polipropileno mikrop্লাušas (Kaklauskas et al., 2012).....	15
4 pav. Organiniai plaušai: sizolio (kairėje), kokoso (dešinėje) (Kaklauskas et al., 2012).....	16
5 pav. Stiklo plaušas (Kaklauskas et al., 2012).....	16
6 pav. Skirtingos plieninių plaušų formos (Kaklauskas et al., 2012).....	16
7 pav. Skirtingos sintetinių plaušų skerspjūvių formos (Hoover, 2016)	17
8 pav. Betono su klintimis (dešinėje) ir betono be klinčių (kairėje) struktūra (Pipilikaki et al., 2012)	17
9 pav. Klinčių įtaka porėtumui (A, B, C skirtingų frakcijų klintys) (Li et al., 2018).....	18
10 pav. Klinčių įtaka porų dydžiui (A, B, C skirtingų frakcijų klintys) (Li et al., 2018).....	18
11 pav. Skirtingo kiekio klinčių poveikis betono stiprumui, skirtingu laiku (Wang et al., 2008)....	19
12 pav. Plaušo traukimo bandymai esant skirtingiems įgilinimo ilgiams (Vrijdaghs et al., 2017) ..	20
13 pav. Atlaikomos jėgos priklausomybė nuo įgilinimo ilgio (Alberti et al., 2016)	20
14 pav. Įgilinimo ilgio ir įbetonavimo kampo įtaka didžiausiai apkrovai (Alberti et al., 2016)	21
15 pav. Skirtingais būdais įtvirtinti bandiniai (Kaklauskas et al., 2012).....	22
16 pav. Nestandartinio dydžio bandiniai (Babafemi et al., 2017).....	24
17 pav. Sintetinis plaušas „Durus S400“	27
18 pav. Sintetinis plaušas „Durus Easyfinish“	27
19 pav. Paruoštas klojinys	28
20 pav. Paruošti visi klojiniai.....	28
21 pav. Plaušas dedamas į polistireną	28
22 pav. Išlieti bandiniai.....	29
23 pav. Liejamas bandinys.....	29
24 pav. Plaušas polistirene	29
25 pav. Bandomas bandinys.....	30
26 pav. Traukiamas plaušas	30
27 pav. Kompiuteris su rezultatais	30
28 pav. LVDT matuoklis	30
29 pav. Pažeistas ir nutrūkęs plaušas.....	30
30 pav. 1 cm įgilintų plaušų palyginimas	31
31 pav. 2 cm įgilintų plaušų palyginimas	31
32 pav. Į viršų 1 cm įgilinto plaušo B1 poslinkio ir ištraukimo jėgos diagrama	32

33 pav. Suirusio pilko plaušo pavyzdžiai	33
34 pav. Balto plaušo, įgilinto 1 cm, pirmo ir antro mišinio palyginimas	37
35 pav. Balto plaušo, įgilinto 2 cm, pirmo ir antro mišinio palyginimas	37
36 pav. Pilko plaušo, įgilinto 1 cm, pirmo ir antro mišinio palyginimas	38
37 pav. Plieninis mikroplaušas (BEKAERT, 2019).....	39
38 pav. Plieninio mikroplaušo sertifikatas (BEKAERT, 2019).....	40
39 pav. Antrojo etapo slankumo bandymai su atsiskyrusiu vandeniu ir superplastikliu.....	43
40 pav. Betono be plieninio plaušo nepavykęs slankumo bandymas.....	43
41 pav. Betono be plieninio plaušo slankumo bandymas.....	44
42 pav. Betono su 0,5 % plieninio plaušo slankumo bandymas	45
43 pav. Betono su 1 % plieninio plaušo slankumo bandymas.....	45
44 pav. Balto plaušo, įgilinto 2 cm, bandinių be plieninio plaušo ir su 0,5 % plieninio plaušo palyginimas (2 etapas).....	46
45 pav. Balto plaušo, įgilinto 2 cm, bandinių be plieninio plaušo ir su 1 % plieninio plaušo palyginimas (2 etapas).....	47
46 pav. Balto plaušo, įgilinto 2 cm, bandinių be plieninio plaušo ir su 0,5 % plieninio plaušo palyginimas (3 etapas)	48
47 pav. Balto plaušo, įgilinto 2 cm, bandinių be plieninio plaušo ir su 1 % plieninio plaušo palyginimas (3 etapas)	48

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Betono sudėtis	27
2 lentelė. Kubelių stipriai po 14 d. ir 28 d.	28
3 lentelė. Gautos plaušų ištraukimui reikalingos energijos reikšmės.....	32
4 lentelė. Nemodifikuoto betono sudėtis	36
5 lentelė. Modifikuoto betono sudėtis	36
6 lentelė. Chemiškai stiprinto betono gniuždomasis stipris.....	36
7 lentelė. Energijos kiekis, reikalingas ištraukti plaušui (Pirmas stiprinimo etapas).....	38
8 lentelė. Betonas be plieninio plaušo	41
9 lentelė. Betonas su 1% plieninio plaušo	41
10 lentelė. Betonas su 0,5% plieninio plaušo.....	42
11 lentelė. Plieniniu plaušu stiprinto betono gniuždomasis stipris	42
12 lentelė. Reikalingas energijos kiekis ištraukti plaušą (3 etapas).....	49

IVADAS

Nuo paties gelžbetonio atsiradimo (~1860 m.) armatūrinio plieno korozija buvo laikoma vienu iš žalingiausių veiksnių, bloginančių armuoto betono mechaninės bei estetinės savybės. Jau 1900 m. statyboje buvo naudojamas betonas, sumaišytas su asbesto plaušais. Jis buvo naudojamas, kol nustatytas asbesto neigiamas poveikis žmonių sveikatai. Vėliau buvo pradėta ieškoti jo alternatyvų. Nuo 1960 m. vykdomi betono, į kurio sudėtį būdavo įmaišoma įvairių medžiagų plaušų (plieninių, sintetinių, stiklinių), mechaninių savybių eksperimentiniai tyrimai. Per šį laikotarpį atlikta įvairiausių tyrimų, nustatant plaušo poveikį betono mechaninėms savybėms, tačiau iki šiol šis poveikis bei plaušo elgsena betone nėra visiškai suprantami. Pagrindiniame dokumente – rekomendacijoje, galiojančioje Europoje (RILEM TC 162 TDF), – siūloma vertinti dispersiškai armuotą betoną, kaip įprastą betoną, tik su modifikuotomis mechaninėmis charakteristikomis. Šios rekomendacijos sukurtos atsižvelgiant į metalinio plaušo savybes. Projektavime ši rekomendacija priimtina, bet toks požiūris neleidžia įvertinti plaušo ir betono sąveikos parametrus arba nustatyti dispersiškai armuoto betono mechaninių savybių pasikeitimo priežastys. Nuolat sukurama vis kitokio tipo bei formos sintetinių plaušų, kurių efektyvumą sunku įvertinti dėl tyrimų metodikos nebuvimo. Todėl būtina nustatyti plaušo ir betono sąveikos (sukibties) mechaninių savybių įtaką betono mechaninių savybių (liekamojo stiprio) pokyčiams.

Viena iš svarbiausių armuojančios medžiagos savybių yra jos ir betono sukibties. Ši savybė nusako armuojančios medžiagos efektyvumą ir susideda iš 2 svarbiausių parametrų: sukibties stiprio bei šių medžiagų kontakto deformatyvumo. Šios savybės lemia plaušo, kaip armuojančios medžiagos, efektyvumą, tačiau nėra sukurtos bendros metodikos šioms savybėms įvertinti. Taip pat nėra aiškių būdų sintetinio makroplaušo sukibties kokybei pagerinti. Todėl šiame moksliniame darbe atliekami sintetinio makroplaušo sukibties su betonu mechaninių savybių tyrimai; siekiama pasiūlyti šių savybių gerinimo būdą. Tyrimams pasirinkti 2 tipų sintetiniai makroplaušai (Durus-S400, Durus Easyfinish), plačiai paplitę Lietuvoje.

Problemos formuluotė

Europoje galiojančiame dokumente – rekomendacijoje dėl dispersiškai armuoto mechaninių savybių nustatymo (RILEM TC 162 TDF) – laikoma, jog plaušu armuotas betonas yra homogeninė medžiaga su modifikuotomis savybėmis. Projektavime šis požiūris yra priimtinas, tačiau toks būdas neleidžia nustatyti betono savybių pokyčių priežastys; taip pat neįmanoma įvertinti plaušo ir betono sąveikos

mechanizmų. Todėl būtina atskirai nagrinėti paties plaušo bei jo sukibimo mechaninės savybės. Nemažai tokių tyrimų atlikta, vertinant metalinio plaušo mechanines savybes, tačiau sintetinio makroplaušo tokių tyrimų praktiškai nėra. Esami tyrimai parodė, kad sintetinis plaušas gali būti efektyviai naudojamas pastatų konstrukcijose (dažniausiai kartu su metaliniu plaušu). Todėl sintetinio makroplaušo sukibimo su betonu mechaniniai parametrai pasirinkti šio mokslinio darbo tyrimų objektu.

Plaušo efektyvumui (sukibčiai su betonu) įtakos turi šie parametrai: plaušo ilgis, betono stipris, plaušo kiekis betone, plaušo paviršiaus forma, betono tankis bei užpildo dydis. Sudėtinga nustatyti, kurios iš šių savybių ar jų kombinacijos yra optimalios plaušo ir betono efektyviausių sukibimo parametrų užtikrinti. Šiame moksliniame darbe nagrinėjamos sintetinio makroplaušo sukibimo su betonu mechaninės savybės; siekiama pagerinti plaušo efektyvumą optimizuojant betono sudėtį (siekiama padidinti plaušo ištraukimo jėgą, nesukeliant jo trapios irties).

Darbo aktualumas

Sintetinis makroplaušas retai naudojamas svarbiose konstrukcijose ar laikančiuose konstrukciniuose elementuose, nes nėra daug žinoma apie priežastis, dėl kurių šis plaušo tipas pakeičia betono savybes. Sudėtinga tiksliai nustatyti, nuo ko priklauso šio plaušo efektyvumas, nes jam įtakos turi labai daug įvairiausių veiksnių. Kad galėtume geriau suvokti sintetinio makroplaušo elgseną betone ir nustatyti, ar jis gali būti toks pat efektyvus kaip kitokio tipo plaušai ir galimai pakeisti juos, reikia tirti vieno plaušo elgseną. Todėl atlikus šiuos bandymus ir nustačius plaušo sukibties savybes, būtų galima šiuos duomenis panaudoti kuriant detalesnius modelius, kuriuose tiksliau įvertinama plaušo įtaka betonui. Taip pat nustačius tinkamą betono sudėtį ir priedus būtų galima padidinti plaušo efektyvumą, tai jį padarytų priimtinesnį statyboje. Gautus atliktų bandymų rezultatus būtų galima panaudoti ateityje tęsiant tyrimus šia tema, tiriant kitus plaušo sukibčiai su betonu įtakos turinčius veiksnius.

Tyrimų objektas

Šio tyrimo objektas yra sintetinio makroplaušo sukibtis su betonu ir šios sukibties galimas pagerinimas, atliekant vieno plaušo traukimo iš betono bandymus.

Darbo tikslas

Šio baigiamojo magistro darbo **tikslas** – eksperimentiškai nustatyti pasirinktų sintetinių plaušų sukibties su betonu parametrus ir įvertinti sukibties kokybės (stiprio) gerinimo galimybes.

Darbo uždaviniai

Darbo tikslui pasiekti suformuluoti šie **uždaviniai**:

1. Atlikti literatūros šaltinių apie jau atliktus tyrimus su sintetiniais ir kitokiais plaušais analizę.
2. Atlikti sintetinio plaušo ištraukimo bandymus, keičiant plaušo tipą bei įgilinimo ilgį.
3. Įvertinti įmanomų sprendinių plaušo sukibimo savybėms pagerinimo galimybes.
4. Atlikti naujus bandymus su gerintais bandiniais.

Tyrimų metodologija

Kad būtų galima įgyvendinti šio darbo tikslą atliekami eksperimentiniai plaušo traukimo bandymai laboratorijoje. Jiems išbetonuojami 32 kubeliai su į juos įgilintais 2 tipų plaušais.

Darbo aprobacija

Moksliniame darbe atliktų tyrimų rezultatai paskelbti mokslinėje konferencijoje: 26th Annual International Conference on Composites or Nano Engineering, ICCE-26, Paryžiuje.

Magistrinio darbo tema paskelbtas mokslinis straipsnis: M. Garnevičius, L. Plioplys, A. Sokolov, V. Gribniak, A. Rimkus, D. Hui. 2018 m. Experimental analysis of mechanical aspects of bond behavior of synthetic macro-fibers in concrete (žr. A Priedas).

1. LITERATŪROS APŽVALGA

Šiame skyriuje apžvelgiame straipsnius ir kitus šaltinius, kuriuose pristatomi atlikti tyrimai apie sintetinį makroplaušą. Nagrinėtuose straipsniuose buvo nustatytos plaušų elgsenos savybės, parametrai turintys įtakos jų sukibčiai, kurios gali turėti įtakos ir šiame darbe atliekamiems bandymams. Temai aktualiuose straipsniuose aptariami bandymų tipai, nagrinėjami jų privalumai ir trūkumai, taip pat analizuojami atlikti bandymai tiriant sintetinio plaušo sukibtį su betonu, kaip plaušas sukimba ir kokie veiksniai daro įtaką plaušo sukibčiai. Pristatomi, kokie skirtingi plaušai buvo panaudoti, kokią įtaką turi plaušo forma, ilgis, betono stipris ir medžiaga, iš kurios pagamintas plaušas. Palyginimui peržvelgti šaltiniai, kuriuose naudojami kitokio tipo plaušai (plieniniai, stiklo). Pagal rastus straipsnius ir juose gautus rezultatus taip pat bus priimami sprendimai, kaip atlikti mūsų tyrimus.

1.1. Plaušo tipai, forma ir medžiagos

Nagrinėtoje literatūroje kalbama apie skirtingus plaušų tipus. Daugiausiai statyboje naudojami dviejų skirtingų tipų plaušai: mikroplaušai (žr. 2 pav.) ir makroplaušai (žr. 1 pav.). Pagrindinis skirtumas tarp makro ir mikroplaušų yra jų skerspjūvio dydis ir ilgis. Mikroplaušas mažesnis ir smulkesnis nei makroplaušai. Mikroplaušas skirtas suvaržyti mikroplyšiams betone, o makroplaušai skirti suvaržyti makroplyšiams betone. Įvairiose straipsniuose buvo kalbama apie tai, kaip plieninius mikro-plaušus bandoma pakeisti sintetiniais makroplaušais (Won, Lim and Park, 2006), nes jie, priklausomai nuo plaušo kiekio betone ir jo formos, pagerina betono elastingumą, atsparumą smūginėms apkrovoms, atsparumą ugniai bei kitus betono rodiklius. Vienintelis jų trūkumas, mažesnis tamprumo modulis (3-7 GPa), nei plieninio plaušo (210 GPa) (Babafemi & Boshoff, 2014).



1 pav. Sintetinis makroplaušas (GCP Applied Technologies Inc., 2017)



2 pav. Plieninis mikroplaušas (Fibrezone, Micro Steel Fibre Brass Coated, 2019)

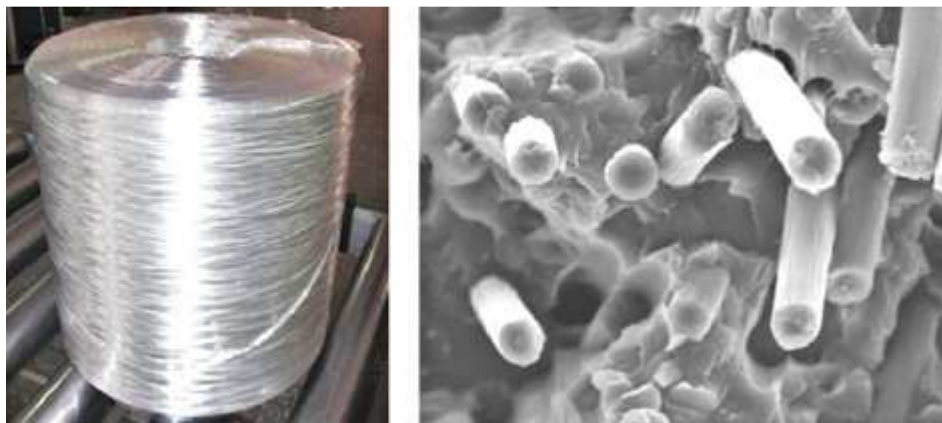
Plaušai taip pat skirstomi į organinius ir neorganinius plaušus. Pagrindiniai neorganiniai plaušai - tai visi metaliniai ir sintetiniai plaušai (žr. 3 pav.), stiklo (žr. 5 pav.) ir anglies pluošto plaušai. Organinės kilmės plaušai - tai įvairūs plaušai, gaunami iš organinių medžiagų, esančių gamtoje (žr. 4 pav.). Organiniai plaušai skirstomi į 4 klases: kamieniniai, lapiniai, paviršiniai ir medienos. Apžvelgiant šias plaušų klases ir joms priklausančius plaušus, reikia atkreipti dėmesį į tai, kad jie sudėtingos struktūros ir sudaryti iš daugybės pluoštinių ląstelių. Šiais plaušais armuoto betono savybės priklauso nuo daugybės veiksnių (Kaklauskas, Bačinskas, Gribniak ir kt., 2012).



3 pav. Sintetinis polipropileno mikroplaušas (Kaklauskas et al., 2012)

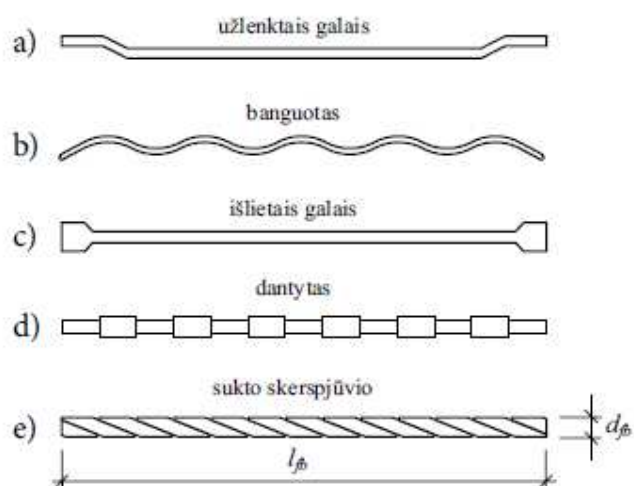


4 pav. Organiniai plaušai: sizolio (kairėje), kokoso (dešinėje) (Kaklauskas et al., 2012)



5 pav. Stiklo plaušas (Kaklauskas et al., 2012)

Didelės įtakos plaušo efektyvumui turi ir paties plaušo forma bei naudojami jo skerspjūviai, kurie gali būti labai įvairūs (žr. 6 pav.).



6 pav. Skirtingos plieninių plaušų formos (Kaklauskas et al., 2012)

Plaušai kurie yra labai lankstūs (sintetiniai, stiklo plaušai), dažniausiai gaminami įvairių skerspjūvių formos (žr. 7 pav.), kad būtų pagerinta jų sukibtis su betonu.



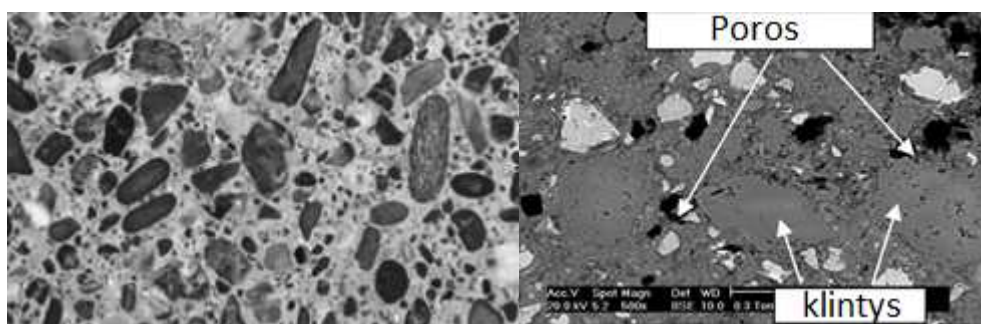
7 pav. Skirtingos sintetinių plaušų skerspjūvių formos (Hoover, 2016)

Kiekviena plaušo forma turi skirtingų privalumų ir trūkumų. Reikiama plaušo forma parenkama priklausomai nuo konstrukcijos, kurioje šie plaušai naudojami.

Šiame darbe naudojami ir tiriami baltos spalvos polipropileninis makro-plaušas „Durus-S400“ ir pilkos spalvos plaušas „Durus-Easyfinish“. Abu plaušai stačiakampio skerspjūvio su rumbuotu paviršiumi. Darbe bandoma pagerinti jų sukibtį su betonu, išvengiant staigios irties. Šie plaušai pasirinkti dėl to, kad jie plačiai naudojami Lietuvoje ir jų galima lengvai įsigyti, jie tinkamo 4 cm ilgio.

1.2. Plaušu armuoto betono sudėtis

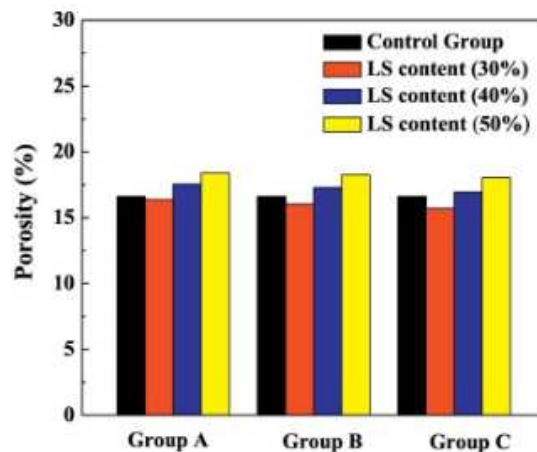
Plaušo sukibčiai ir išnaudojamumui didelę įtaką turi naudojamas betonas. Priklausomai nuo betono stiprio, sudėties bei priedų, sumažinamas betono porėtumas ir kapiliarų tūris, dėl to pagerėja plaušų sukibtis su betonu (žr. 8 pav.). Atlikta daug tyrimų, kuriuose buvo tiriamas betonas, turintis įvairiausių priedų, ir pastebėta, kad betonui didelę įtaką gali turėti klintys.



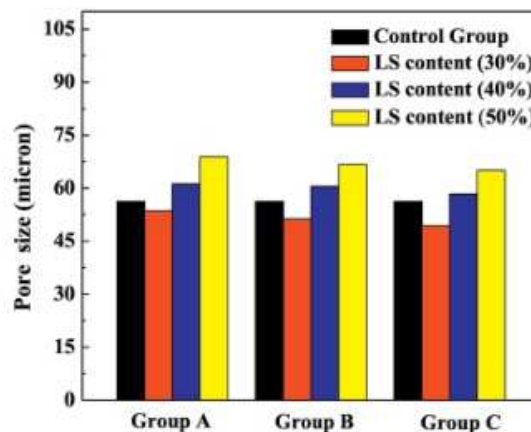
8 pav. Betono su klintimis (dešinėje) ir betono be klinčių (kairėje) struktūra (Pipilikaki et al., 2012)

Nagrinėtoje literatūroje teigiama, kad norint padaryti betoną ekonomiškesnį, stipresnį ir vienalytiškesnį naudojamos klintys (Li, Jiang, Xu and Jiang, 2018). Jos atitinkama proporcija sumaišomos su betonu norint sustiprinti betoną, bet jei didelė cemento dalis betone pakeičiama smulkios frakcijos klintimis, betonas gali prarasti dalį savo gniuždomojo stiprio, bet jame sumažėja kapiliarų ir porų kiekis, nes klintys dirba kaip labai smulkios frakcijos užpildas (žr. 8 pav.) (Li et al.,

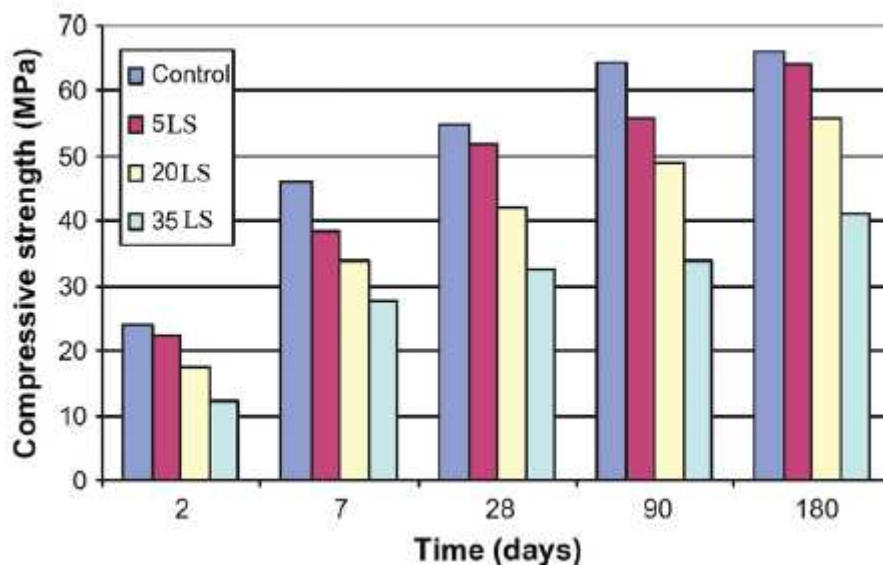
2018). Kitaip sakant, klintimis galima reguliuoti betono stiprį. Norint sustiprinti betoną galima pakeisti dalį užpildų klintimis, tai turės teigiamą poveikį betono gniuždomajam stipriui. Taip pat klintimis galima pakeisti dalį cemento, o tai sumažins betono stiprį, bet padarys jį ekonomiškesnį žr. (žr. 9-11 pav.)(Wang, Shi, Farzadnia, Shi and Jia, 2008). Klintys labai tinka betonui, kuriame panaudoti įvairios rūšies plaušai, nes plaušas taip pat gali iki 20 % padidinti betono gniuždomąjį stiprį. Prarandamas stipris atsveriamas panaudoto plaušo suteikiamu stipriu, o dėl klinčių savybės sumažinti porų dydį ir skaičių padidinimas paties plaušo efektyvumas.



9 pav. Klinčių įtaka porėtumui (A, B, C skirtingų frakcijų klintys) (Li et al., 2018)



10 pav. Klinčių įtaka porų dydžiui (A, B, C skirtingų frakcijų klintys) (Li et al., 2018)



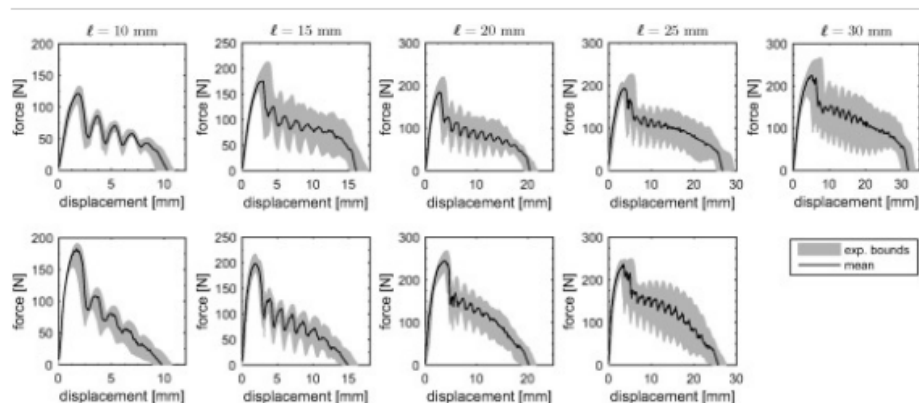
11 pav. Skirtingo kiekio klinčių poveikis betono stiprumui, skirtingu laiku (Wang et al., 2008)

Remiantis išnagrinėtais straipsniais mūsų darbe, į betoną taip pat bus maišomos klintys, kurios turėtų padėti plaušui geriau sukibti su betonu, nes jos atliks labai smulkaus užpildo funkciją, ir leis reguliuoti betono stiprį, jei to prireiktų.

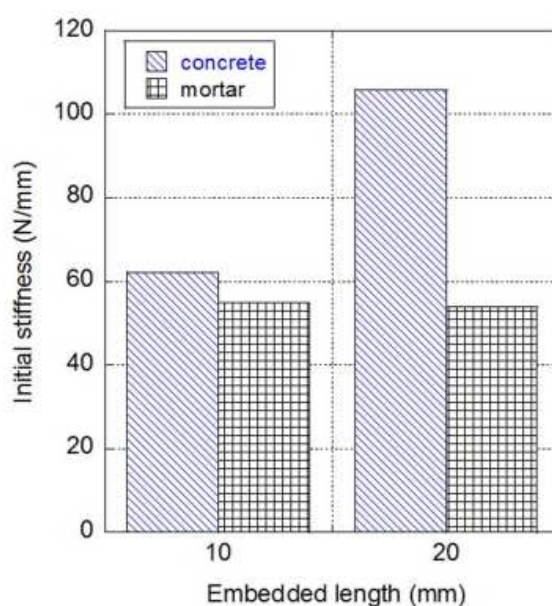
1.3. Sintetinio plaušo sukibtis su betonu ir įbetonavimo ilgio nustatymas

Nagrinėtuose straipsniuose teigiama, kad viena iš svarbiausių plaušo savybių yra jo sukibtis. Sukibtis yra armuojančios medžiagos savybė sukibti su betonu dėl cheminių, mechaninių ryšių, kurie susidaro kietėjant armuotam betonui. Pagrindinis tyrimo objektas šiame darbe bus šios sukibties nustatymas skirtingo tipo plaušams. Taip pat bus įvertinamos galimybės šią sukibtį sustiprinti, kad plaušas būtų kuo geriau išnaudojamas betone, nesukeliant staigios plaušo irties. Vienas iš labiausiai plaušo sukibtį ir efektyvumą nusakančių veiksnių yra jo įbetonavimo ilgis betone.

Perskaitytoje literatūroje buvo kalbama apie efektyvius plaušo įgilinimo ilgius, kurie buvo nustatomi eksperimentiškai (Babafemi & Boshoff, 2017). Kituose šaltiniuose buvo gauta, kad nuo plaušo įbetonavimo ilgio priklauso jo tempiamasis stipris (Alberti, Enfedaque, Gálvez and Ferreras, 2016). Tyrimai buvo atlikti su standartiniais ir nestandartiniais kubeliais, į kuriuos skirtingais ilgiais buvo įbetonuojamas plaušas ir atlikti traukimo bandymai, kurių metu buvo nustatyta didžiausia apkrova, kuriai esant sintetinis plaušas buvo ištraukiamas. Buvo tiriami skirtingų medžiagų plaušai (polipropileningiai ir kt.). Buvo tirti įvairiai įgilinti plaušai (nuo 10 iki 25 mm) (žr. 12 ir 13 pav.). Gautuose rezultatuose buvo teigiama, kad efektyviausias įbetonavimo ilgis yra apie 20 mm, nes, įgilinus daugiau plaušas traukiant pradeda irti, kol visiškai nutrūksta. (Alberti et al., 2016).



12 pav. Plaušo traukimo bandymai esant skirtingiems įgilinimo ilgiams (Vrijdaghs et al., 2017)



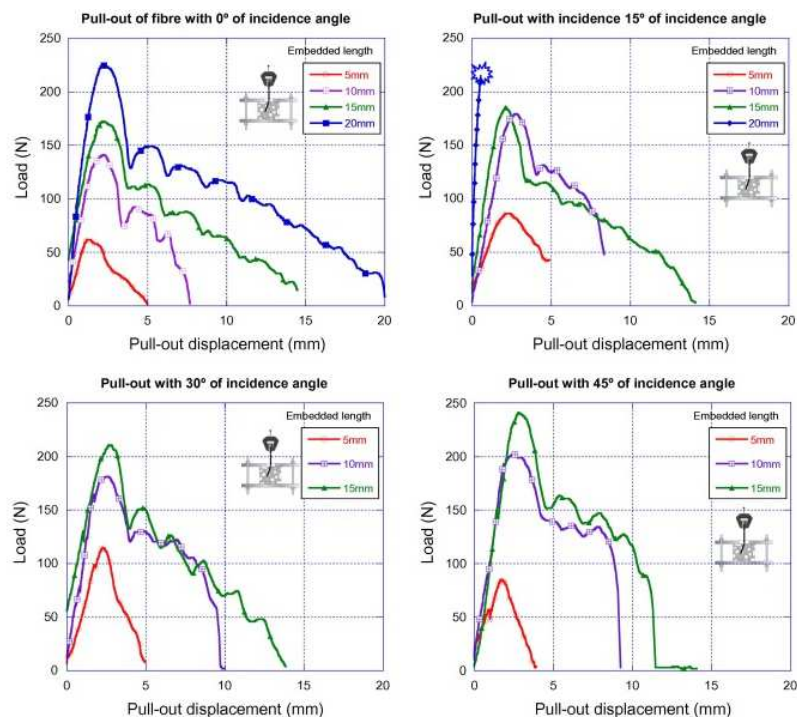
13 pav. Atlaikomos jėgos priklausomybė nuo įgilinimo ilgio (Alberti et al., 2016)

Skaitytoje literatūroje rašoma, kad efektyviausias įgilinimo ilgis yra 20 mm, todėl toks įgilinimo ilgis buvo priimtas mūsų atliekamuose bandymuose ir palyginimui dar pagaminti bandiniai su 10 mm įgilinimu.

1.4. Sintetinio plaušo efektyviausio įbetonavimo kampo ir plaušo formos nustatymas

Mokslinėje literatūroje, kalbama apie plaušo formos įtaką plaušo efektyvumui bei įbetonavimo kampo įtaką plaušo tempiamajai galiai (Vrijdaghs, Prisco and Vandewalle, 2017). Buvo tiriami plaušai, įbetonuoti skirtingais kampais (nuo 15° iki 60°). Buvo tiriama įbetonavimo kampo

įtaka plaušų tempiamajai. Taip pat buvo kalbama apie plieno plaušo įbetonavimo kampus (Breitenbücher, Meschke, Song, Zhan, 2014). R. Vrijdaghsas su kolegomis nustatė, kad įgilinimo kampas turi įtakos tempiamajai galiai (Vrijdaghs et al., 2017). Plaušas kuris buvo įbetonuotas apie 15° kampu, atlaikė didžiausias apkrovas, o įbetonuoti didesniu ar mažesniu kampu plaušai laikė mažiau. M. G. Alberti ir kt. teigia, kad didžiausią laikomąją galią plaušas pasiekė esant 45° (4 pav.), bet plaušas buvo įgilintas skirtingu ilgiu ir iš skirtingos medžiagos. Taip pat buvo atlikti tyrimai, kuriais buvo nustatomas geriausios formos plieninis plaušas. Buvo tirta skirtingai užlenkti ir skirtingų formų plaušai (briaunuoti, lenktais galais, tiesūs), nustatyta, kurie efektyviausi (N. Banthia, 1990, p 610-620).



14 pav. Įgilinimo ilgio ir įbetonavimo kampo įtaka didžiausiai apkrovai (Alberti et al., 2016)

Buvo nuspręsta betonuoti plaušus neužlenkus jų įvairiais kampais, nes juos užlenkus, bandymu metu, galima sukelti įtempių koncentraciją, kuri sukels plaušo irtį. Užlenkus plaušą galima pasiekti didesnę jo efektyvumą, todėl ši savybė tikrai svarbi ir ji galėtų būti tolimesnių tyrimų objektas.

1.5. Plaušo traukimo bandymų tipai

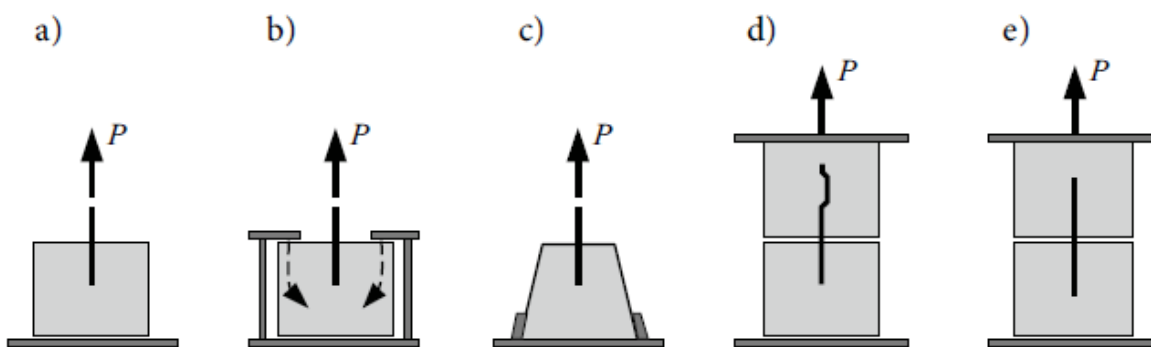
Mokslinėje literatūroje plaušo traukimo bandymai atliekami siekiant imituoti jų elgseną plyšyje, sukuriant kuo realesnę jų deformacijų ir įtempių būvį (Kaklauskas et al., 2012). Šie bandymai taip pat atliekami, kai norima sustiprinti betoną plaušu, kad jis pleišėtų mažiau, ir nustatyti tam tikros

medžiagos ar formos plaušo sukibimo su betonu savybes, kad būtų galima gautus rezultatus panaudoti sudėtingesniuose modeliuose ar bandymuose.

Iš jau atliktų tyrimų nustatyta, kad plaušo bandymo metodas turi didelę įtaką gaunamiems plaušo ir betono sukibimo rezultatams. Priklausomai nuo bandymo įrangos išdėstymo, gali būti sukeliama papildomi normaliniai įtempiai, kurie sukelia trinties dedamosios padidėjimą ir suvaržo betono mikropleišėjimą sąlyčio su plaušu zonoje (Kaklauskas et al., 2012). Atliekant šiuos bandymus stengiamasi nesukelti nerealistiškių įtempių, kurie turėtų įtakos gaunamiems rezultatams ir padidintų paklaidas.

Pagal įrangos išdėstymą ištraukimo bandymai gali būti skirstomi į dvi pagrindines grupes:

1. Plaušas traukiamas tiesiai iš kubelio (žr. 15 a, b, c pav.);
2. Plaušas inkaruojamas dviejuose kubeliuose (žr. 15 d, e pav.).



15 pav. Skirtingais būdais įtvirtinti bandiniai (Kaklauskas et al., 2012)

Kai plaušas inkaruojamas viename kubelyje, tokį bandinį daug lengviau pagaminti, bet tam reikalingi specialūs griebtai, kad būtų galima užtikrinti, jog fibros slinktis vyktų tik sąlyčio su betonu zonoje. Taip pat tokiuose bandiniuose gali susidaryti papildomi gniuždymo įtempiai dėl atraminių reakcijų, kas gali nerealistiskai padidinti fibros ištraukimo jėgą. Šią problemą galima panaikinti perkeltant kubelio atraminę reakciją, kaip pavaizduota 15 c pav. (Kaklauskas et al., 2012).

Kai plaušas inkaruojamas dviejuose kubeliuose, nebelieka problemos dėl kubelio įtvirtinimo ir atraminių reakcijų, bet atsiranda naujų problemų dėl slinkties nustatymo. Būtina užtikrinti, kad slinktis pasireikštų tik viename kubelyje. Tai galima pasiekti, plaušą inkaruojant vienoje pusėje (žr. 15 d pav.) arba naudojant skirtingų savybių betoną. Bet net ir naudojant šiuos būdus neaišku, ar slinktis vyksta tik viename kubelyje, ar gaunama neapibrėžta slinkčių suma. Naudojant bandinio įrengimo tipą, kai plaušas vienodai įgilintas abiejuose kubeliuose, teoriškai ši problema būtų išspręsta,

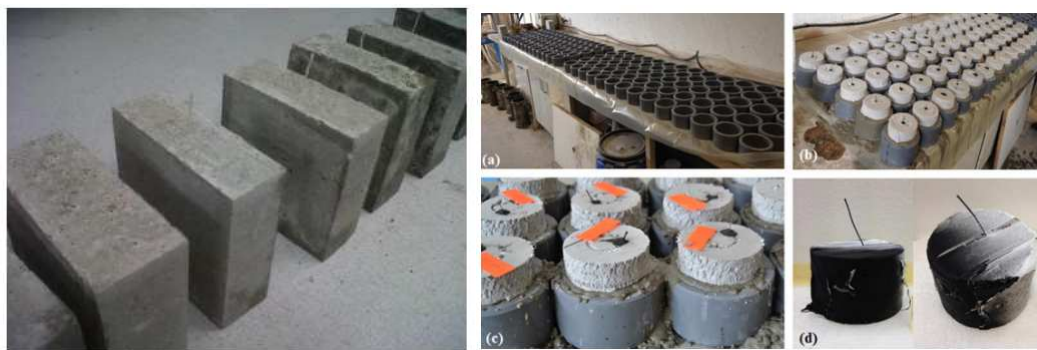
nes jis vienodai trauktųsi iš abiejų kubelių (žr. 15 e pav.), bet tada kyla problemų dėl medžiagos nepastovių savybių ir paklaidų įgilinant plaušus. Sunkumai tiksliai apibrėžiant fibros slinktį yra pagrindiniai trūkumai, dėl kurių nesirenkama naudoti dviejų kubelių bandinių (Kaklauskas et al., 2012).

Išnagrinėjus literatūrą buvo nuspręsta, kad dėl bandinio paprastesnės gamybos bus naudojamas bandymo būdas, pateiktas 15 b pav. Pasigaminus tinkamus griebtus buvo užtikrinta, kad slinktis vyks tik sąlyčio su plaušu zonoje. Dėl mažos vieno plaušo ištraukimo jėgos atraminės reakcijos neturėtų būtų didelės, dėl to ir neturėtų nerealistiškai padidinti ištraukimo jėgos.

1.6. Tyrimuose bandyti plaušai ir bandinių tipai

Dažniausiai dispersiškai armuotas betonas nagrinėjamas kaip įprastas betonas, tik su modifikuotomis savybėmis. Išskirtinis dispersiškai armuoto betono bruožas – supleišėjusio betono savybė atlaikyti tempimo įtempius dėl plaušo ir betono sukibties. Ši savybė vadinasi dispersiškai armuoto betono liekamuoju stipriu. Šiuo metu Europoje yra rekomendacijos plieninio plaušu armuoto betono *liekamajam stipriui* nustatyti (RILEM TC 162 TDF), tačiau nustatytos reikšmės naudojamos tik betonui klasifikuoti. Plaušo elgsena ir savybės betone nėra atskirai vertinamos. Dėl šios priežasties šių rekomendacijų siūlomi metodai nėra tinkami vertinti betono ir plaušo sukibčiai. Todėl mes naudojame vieno plaušo traukimo bandymus, kuriais galima nustatyti visus reikalingus plaušo parametrus, susijusius su jo ir betono sukibtimi. Gavę tyrimų rezultatus galime juos panaudoti kuriant daug detalesnį plaušu armuoto betono modelį, kuriame labiau atsižvelgiama į plaušo įtaką betono savybėms. Šiame modelyje plaušas ir betonas veikia kaip atskiri sistemos elementai.

Perskaitytuose straipsniuose pristatomi atlikti tempimo bandymai su įvairių tipų plaušais, naudojant skirtingus betoninius bandinius (Alberti et al., 2016). Daugelis bandymų buvo atliekami su skirtingų tipų sintetiniais plaušais, buvo naudojami polipropileniniai plaušai (Babafemi et al., 2017), polifiliniai plaušai (Alberti et al., 2016) ir kt. Taip pat buvo naudojami ir plaušai, pagaminti iš kitų medžiagų (plieniniai, stiklo, anglies pluošto). Visi jie buvo tyrinėjami naudojant tą patį traukimo bandymą, kurio metu buvo nustatyta skirtingų medžiagų elgsena ir įtaka tempiamajam stipriui. Buvo naudojami skirtingi kubeliai šiems tyrimams įvykdyti: daugiausia naudojami standartinio dydžio kubeliai (100mmX100mmX100mm), taip pat naudojami nestandartiniai bandiniai (Babafemi et al., 2017). Nestandartiniai bandiniai buvo įvairių matmenų, cilindro, kvadrato ir stačiakampio formos (žr. 16 pav.).



16 pav. Nestandartinio dydžio bandiniai (Babafemi et al., 2017)

Atliekamuose bandymuose jau pasirinktas naudojamas plaušas ir taip pat bus panaudoti standartinio dydžio kubeliai, nes nebuvo rasta priežasties naudoti kokius nors kitų tipų bandinius, be to, standartinio tipo bandiniai puikiai tinka bandyti su mūsų turima įranga.

1.7. Skyriaus išvados

Išnagrinėjus literatūroje paskelbtus rezultatus, padarytos tokios išvados:

- Nustatyta, kad sintetinio makroplaušo mechaninės savybės bei sukibtis su betonu yra kitokie, nei plieninio makroplaušo.
- Tyrimams parinkti plaušo traukimo iš standartinių 100x100x100 mm kubelių bandymai. Tai plačiausiai taikomi bandiniai atlikti tokio tipo tyrimus, bei jie tinkami bandyti su mūsų turima įranga.
- Nagrinėjamas plaušas įbetonuotas vertikaliai, kad būtų galima išvengti įtempių koncentracijos, dėl kurios plaušas gali suirti.
- Literatūroje buvo nustatyta, kad plaušas pasiekia didžiausias sukibties jėgas ir įtempius, kai jis įgilintas 2 cm, todėl buvo ieškoma apie 4 cm ilgio plaušų. Tyrimams buvo parinkti: baltas plaušas „Durus S400“ ir pilkas plaušas „Durus Easyfinish“. Šie plaušai yra plačiai taikomi Lietuvoje. Taip pat palyginimui nagrinėjamas 1 cm įgilintas plaušas.
- Sintetinio makroplaušo sukibties su betonu mechaniniai parametrai priklauso nuo: betono stiprio, betono sudėties, betono porėtumo, betono vienalytiškumo, plaušo ilgio, užpildų dydžio, betono tankio, todėl pagerinti šią mechaninę savybę galima įvairiais būdais: didinti betono stiprį, įgilinti daugiau plaušo į betoną, užtikrinti betono vienalytiškumą su tinkamais skirtingų frakcijų užpildų kiekiais bei kuo labiau sumažinti betono porėtumą. Taip pat plaušo mechanines savybes galima pagerinti maišant į plaušą priedų arba taikant plieninį plaušą.

- Literatūros analizė parodė, kad įdėjus į betoną klinčių galima reguliuoti betono stiprį ir užtikrinti plaušo vienalytiškumą bei sumažinti jo porėtumą.

2. PLAUSO SUKIBTIES SAVYBIŲ NUSTATYMAS

Šioje darbo dalyje bus aprašyta pirmų sintetinio plaušo traukimo bandymų eiga, pateikti ir aptarti rezultatai bei suformuluotos išvados. Buvo atliekami bandymai su baltu „Durus S400“ ir pilku „Durus Easyfinish“ plaušu. Detaliai aprašytas klojinių ruošimas, bandinių liejimas ir bandymų atlikimas. Remiantis gautais rezultatais bus nuspręsta, ar verta bandyti gerinti šių plaušų sukibties savybes. Visi bandymai buvo atlikti VGTU Inovatyviųjų statybinių konstrukcijų laboratorijoje.

2.1. Plaušo aprašymas

Buvo atlikti plaušo traukimo iš betono bandymai, kurių metu buvo išbandomi dviejų skirtingų rūšių sintetiniai plaušai. Pirmas išbandytas plaušas buvo „Durus S400“ (žr. 17 pav.), kitas – „Durus Easyfinish“ (žr. 18 pav.). Plaušai buvo įgilinami į betoną dviem skirtingais ilgiais. Vieni bandiniai buvo įgilinami 20 mm, kiti 10 mm. Toliau baltą plaušą vadiname B1 ir B2, atitinkamai pagal įgilinimo ilgį, o pilką plaušą P1 ir P2. Baltas plaušas buvo 45 mm ilgio, o pilkas 40 mm ilgio. Plaušai buvo įbetonuoti į 10x10x10 cm betono standartinius kubelius.

Pagrindinė šio tipo plaušų pasirinkimo priežastis yra ta, kad šie sintetiniai makroplaušai plačiai paplitę Lietuvoje ir jų čia galima lengvai įsigyti bei tai, kad abiejų šių plaušų ilgis apie 4 cm.

„Durus S400“ plaušo mechaninės ir geometrinės savybės:

plaušo ekvivalentinis diametras – 0,9 mm;

plaušo ilgis – 45 mm;

tempiamasis stipris – 465 MPa;

amprumo modulis – 3350 MPa.

„Durus Easyfinish“ plaušo mechaninės ir geometrinės savybės:

plaušo ekvivalentinis diametras – 0,7 mm;

plaušo ilgis – 40 mm;

tempiamasis stipris – 470 MPa;

tamprumo modulis – 6000 MPa.



17 pav. Sintetinis plaušas „Durus S400“



18 pav. Sintetinis plaušas „Durus Easyfinish“

2.2. Betono aprašymas

Šiame tyrime naudoto betono sudėtis pateikta 1 lentelėje. Jis pagamintas iš portlandcemenčio ir vietinės žvirgždo skaldos ir smėlio. Į šio betono sudėtį taip pat įdėta klinčių, kurios paskirtis dalinai pakeisti cementą, tam kad sumažėtų betono stipris, nes jis prieš tai bandytuose bandiniuose buvo didesnis nei numatyta ir nuo stiprio priklauso plaušo sukibimas su betonu. Taip pat klintys veikia kaip smulkios frakcijos užpildas ir turėtų sumažinti betono porėtumą ir porų dydį, kas pagerins betono sukibtį su plaušu.

Iš viso buvo pagaminti 32 kubeliai betono, kiekvienam plaušui ir įgilinimui po 8 kubelius. Visi kubeliai buvo išlieti vienu kartu iš tokio pačio betono. Visi bandiniai buvo palikti kietėti laboratorijos sąlygomis, vidutiniškai 18 °C temperatūroje. Kubeliai buvo bandomi po 28 d. Kubelių sudėtis pateikta 1 lentelėje. Taip pat kubelių gniuždomasis stipris buvo išbandytas po 14 ir 28 dienų (žr. 2 lentelę). Gniuždomasis stipris buvo nustatytas 100x100x100 kubeliams.

1 lentelė. Betono sudėtis

Medžiaga	Tipas	Kiekis
Cementas	CEM I 42,5 R	300
Vanduo	-	165
Klintys	-	988
Smėlis	0/4	100
Žvirgždo skalda	4/16	787
Superplastiklis	0,35 % nuo betono masės	1,05

2 lentelė. Kubelių stipriai po 14 d. ir 28 d.

Betono amžius, dienomis	Betono stipris f_c , MPa
14	37,72
28	44,75

2.3. Bandinių paruošimas

Į vieną 10x10x10 cm kubelį buvo įbetonuojami 3 plaušai: vienas plaušas iš viršaus ir 2 iš šonų. Šoniniai plaušai būdavo pažymimi su žymekliu ir įgilinami į polistireną (žr. 21, 23 ir 24 pav.), tada pastatomi į klojinį (žr. 19 ir 20 pav.), palikus plaušus iš polistireno išsikišusius tiek kiek jie turi būti įgilinti betone, per pažymėtą plaušo ilgį. Plaušas dedamas iš viršaus irgi būdavo pažymimas (žr. 22 pav.). Jis buvo dedamas kai jau betonas būdavo išlietas ir jis taip pat buvo įgilinamas tiek kiek būdavo pažymėtas žymekliu. Plaušai buvo įgilinti 1 cm ir 2 cm į betoną, įgilinimo ilgiai vienodi ir viršų esantiems plaušams, ir iš šonų esantiems plaušams. Kiekvieno tipo kubelių buvo pagaminta po 8 vienetus. Visi bandiniai buvo atitinkamai pažymėti (žr. 23 pav.). Pilki plaušai, kurie buvo įgilinti 1 cm buvo pažymėti – P1, pilki plaušai įgilinti 2 cm buvo žymimi P2, tas pats buvo padaryta su baltu plaušu, 2 cm įgilinti buvo užvadinti B2, o 1cm įgilinti B1.



19 pav. Paruoštas klojinys



20 pav. Paruošti visi klojiniai



21 pav. Plaušas dedamas į polistireną



22 pav. Išlieti bandiniai



23 pav. Liejamas bandinys



24 pav. Plaušas polistirene

2.4. Tyrimų atlikimo aprašymas

Bandymų metu įbetonuotas plaušas būdavo padengiamas apsaugine plėvele, kuriai naudojamas buvo paprastas laido apvalkalas, kad būtų sumažinama plaušo pažeidimo tikimybė, kai jį įstatėme į metalines plokšteles. Tarp plokštelių įstačius plaušą jos buvo suveržiamos 2 varžtais, stengiantis abu varžtus veržti kuo tolygiau, nes tada tikimybė plaušui būti pažeistam labai maža ir plaušas būtų tvirtai užveržiamas. Tada plokštelės būdavo įstatomos į traukimo aparato griebtus (žr. 25 ir 26 pav.). Bandymo metu plaušas buvo traukiamas 0,8 mm/min ištraukimo greičiu, tol kol jis būdavo pilnai ištraukiamas. Matavimai buvo atliekami kiekvieną sekundę su dvejais LVDT matuokliais (žr. 28 pav.). Visi matuokliai buvo prijungti prie nešiojamo kompiuterio (žr. 27 pav.).

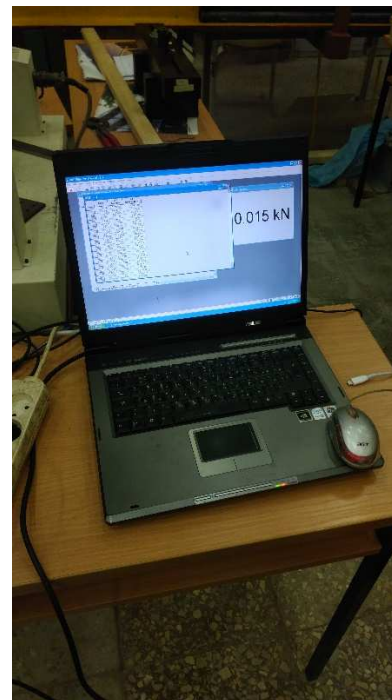
Atliekant bandymus plaušo ir betono sukibtis būdavo suardoma 3 skirtingais būdais: 1. Plaušas ištraukiamas iš betono. 2. Plaušas suirdavo traukiamas iš betono. 3. Plaušas suirdavo, kai būdavo pažeidžiamas ruošiantis bandymui. Šitas suirimo tipas būdingas plaušui, kuris būdavo įbetonuotas iš viršaus, nes jis dažniausiai praslysdavo iš plokštelių bandymo metu. bandant išvengti plaušo praslydimo, buvo bandoma stipriau užveržti plaušą tarp plokštelių ir jis dažnai būdavo pažeidžiamas ir nutrūkdavo (žr. 29 pav.). Visi bandymai atlikti, kai betono amžius 28 dienos ir daugiau. Toliau pateikiami ir aprašomi bandymų rezultatai.



25 pav. Bandomas bandinys



26 pav. Traukiamas plaušas



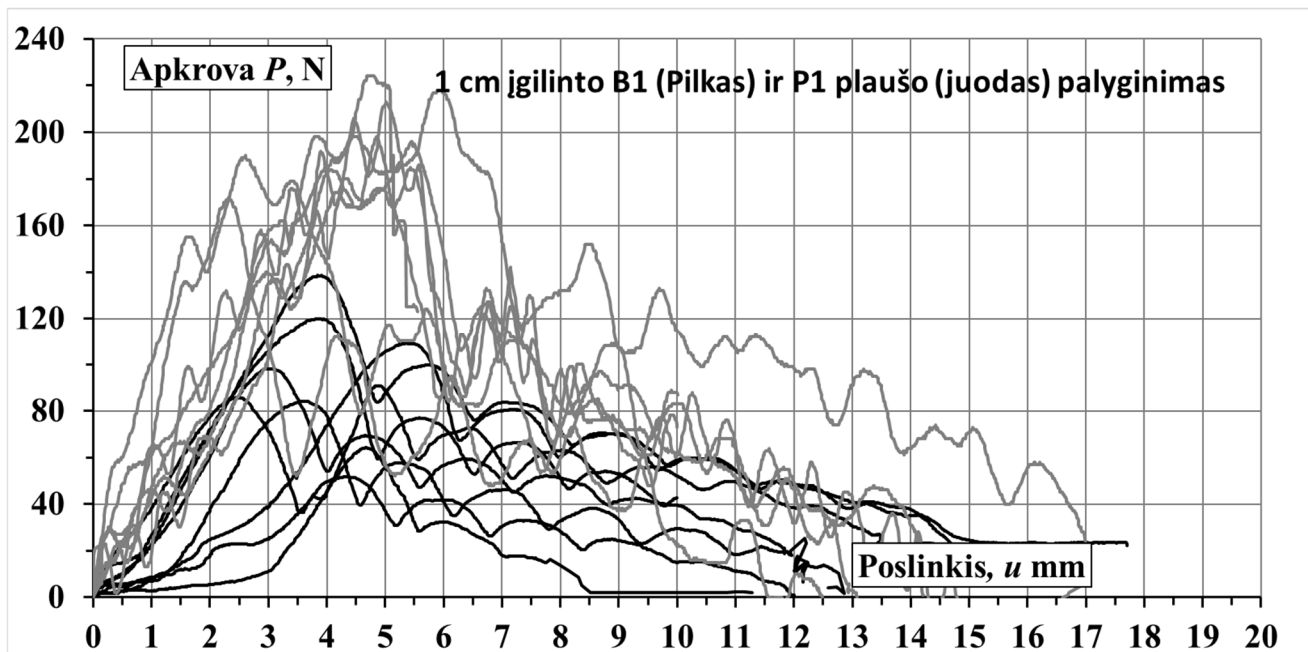
27 pav. Kompiuteris su rezultatais



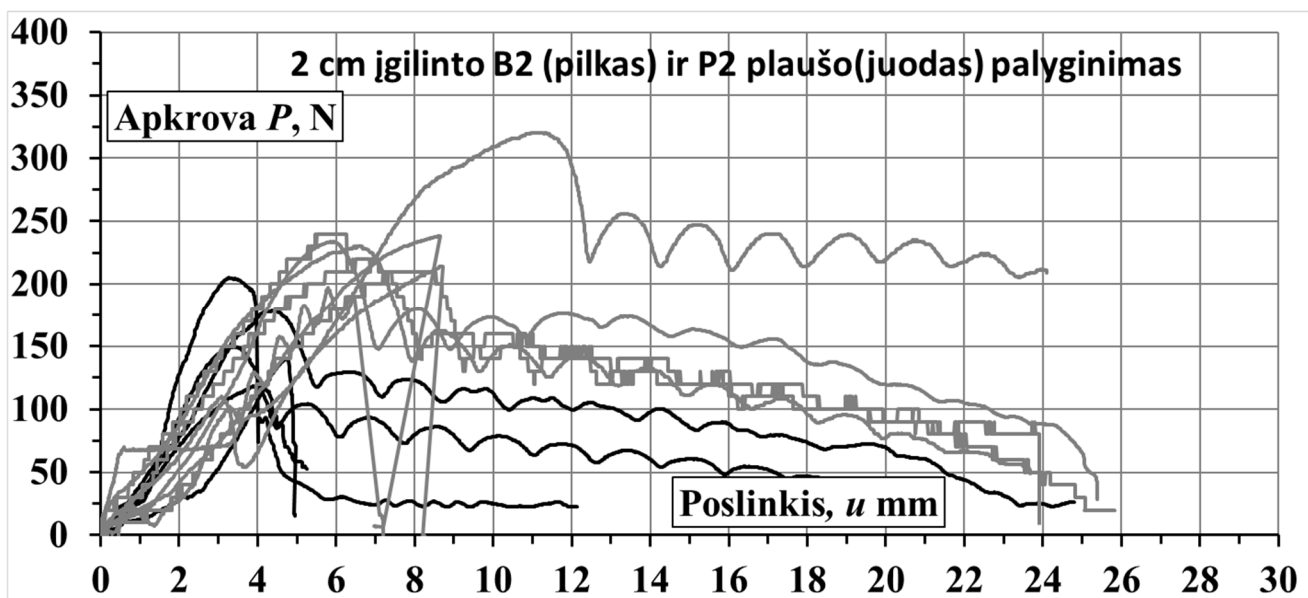
28 pav. LVDT matuoklis



29 pav. Pažeistas ir nutrūkęs plaušas



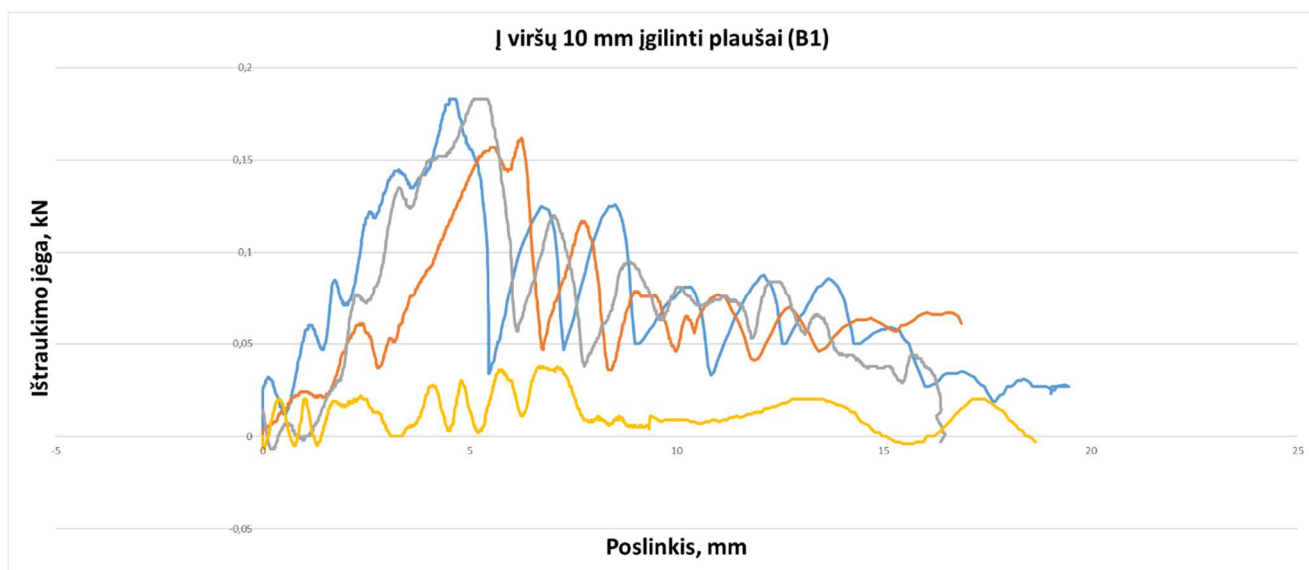
30 pav. 1 cm įgilintų plaušų palyginimas



31 pav. 2 cm įgilintų plaušų palyginimas

Iš gautų grafikų (žr. 30 ir 31 pav.) matyti, kad baltas sintetinis makroplaušas „Durus S400“ atlaiko didesnę ištraukimo jėgą, nei plaušas „Durus Easyfinish“. Visi iš viršaus įgilinto plaušo rezultatai nepateikiami, nes betonui kietėjant jis iškildavo arba nugrimzdavo, todėl šio plaušo įgilinimas gavosi labai mažas arba labai didelis, dėl to ir jo rezultatų išsibarstymas gavosi labai didelis. Pateiktame pavyzdyje (žr. 32 pav.) matome, kad 1 cm įgilintas plaušas, atliekant bandymą buvo traukiamas beveik 2 cm, jo įgilinimas dvigubai padidėjo iki kol betonai sukietėjo. Taip pat šio tipo plaušų didžiausia ištraukimo jėga yra apie 20 % mažesnė nei tokio pat tipo plaušų įgilintų iš kubelių šonų 1 cm, nors jų įgilinimo ilgis artimas 2 cm įgilintiems plaušams. Bus bandoma pagerinti

iš viršaus įgilinamo plaušo fiksacijos būdą, kad rezultatai gautųsi panašūs kaip ir plaušo įgilinto iš šonų. Likusios, kubelio viršuje įbetonuotų sintetinių plaušų, ištraukimo jėgos ir poslinkio diagramos pateikiamos šio darbo prieduose.



32 pav. Į viršų 1 cm įgilinto plaušo B1 poslinkio ir ištraukimo jėgos diagrama

Be gautų ištraukimo jėgos ir poslinkio grafikų, taip pat buvo apskaičiuota reikalinga energija ištraukti plaušą, ji gaunama apytiksliai apskaičiavus grafikų plotą po kreive, šios reikšmės pateiktos 3 Lentelėje. Kuo didesnė reikalinga energija tuo plaušas efektyvesnis. Skaičiuojant plaušų plotus priimama, kad visi išsitraukė tiek kiek buvo įgilinti, nevertinamas jų pailgėjimas dėl deformacijos ar įgilinimo paklaidos. Visos reikšmės pateiktos Nm.

3 lentelė. Gautos plaušų ištraukimui reikalingos energijos reikšmės

Pilkas, įgilintas 1 cm	P1. 1 S1	P1. 3 S1	P1. 3 S2	P1. 4 S1	P1. 4 S2	P1. 5 S1	P1. 5 S2	P1. 6 S1	P1. 6 S2
Energija, Nm	188,7045	782,0938	409,0562	578,7515	535,3312	652,9429	965,6943	455,648	415,0381
Pilkas, įgilintas 2 cm	P2. 1 S1 N	P2. 1 S2 N	P2. 2 S1	P2. 2 S2	P2. 3 S1	P2. 3 S2	–	–	–
Energija, Nm	372,8245	267,346	644,6715	1439,796	2003,566	692,5805	–	–	–
Baltas, įgilintas 1 cm	B1. 1 S1	B1. 1 S2	B1. 2 S1	B1. 2 S2	B1. 3 S1	B1. 3 S2	B1. 4 S1	B1. 4 S2	–
Energija, Nm	928,277	1039,528	754,383	1218,279	1175,255	330,841	1153,793	1130,237	–
Baltas, įgilintas 2 cm	B2. 1 S1	B2. 2 S1	B2. 2 S2	B2. 3 S1	B2. 4 S1	B2. 5 S1	B2. 5 S2	B2. 6 S1	B2. 6 S2
Energija, Nm	656,619	934,298	4078,146	2671,235	3440,45	886,15	2663,5	2863,117	926,727

Iš reikšmių pateiktų lentelėje matyti, kad baltam plaušui vidutiniškai reikia daugiau energijos ištraukti, nei pilkam plaušui. Balto plaušo įgilinto 2 cm vidutinis energijos kiekis reikalingas ištraukimui yra 2124,471 Nm, o 1 cm įgilinto plaušo – 966,324 Nm. Pilkam plaušui, įgilintam 2 cm, ištraukti reikalingas energijos kiekis yra 903,464 Nm, o įgilintam 1 cm – 553,696 Nm.

2.5. Skyriaus išvados ir rezultatų aptarimas

Buvo išbandyta po 5, 1 ir 2 cm įgilintus, balto ir pilko tipo kubelius, atlikti jų ištraukimo iš betono bandymai. Bandymų metu plaušai įbetonuoti į betoninį kubelį buvo apvelkami apsauginiu guminiu apvalkalu, tam kad nebūtų pažeidžiami, tvirtinami tarp plokštelių ir tada statomi į traukimo aparato griebtus. Atliekant bandymą buvo matuojamos jų ištraukimo jėgos ir poslinkio diagramos. Vertinant bendinių suirimo pobūdį buvo įvertintos plaušų sukibties stiprinimo galimybės.

- Iš ištraukimo jėgos ir poslinkių diagramų, gautų nustatant plaušo sukibties savybes, nustatyta, kad baltas (Durus S400) plaušas yra stipresnis ir atlaiko daug didesnę traukimo jėgą negu pilkas plaušas (Durus Easyfinish), apie 25-30 %. Pilko plaušo didžiausia atlaikoma jėga – 200 N, o balto plaušo – 300 N. Vidutiniškai pilkas plaušas atlaiko apie 170 N, o baltas plaušas apie 225 N.
- Plaušai, įgilinti 2 cm, turi didesnę tendenciją nutrūkti (baltas plaušas apie 10-20 %, pilkas plaušas apie 50 %), nei plaušai, įgilinti 1 cm (abiejų tipų plaušai nutrūko tik 1-2 kartus ir taip atsitiko dėl pažeisto plaušo įstatant jį į griebtus): 2 cm įgilinti plaušai atlaiko apie 20-30 % didesnę traukimo jėgą, nei plaušai, kurie įgilinti 1 cm. Pilkas plaušas „Durus Easyfinish“ yra linkęs suirti trapiau nei baltas plaušas. Jis dažniau suirdavo ir pasižeisdavo jį parengiant traukimui ir traukimo metu (žr. 33 pav.), todėl išbandžius visus bandinius, tinkamų rezultatams pilkų plaušų gauta mažiau, nei baltų plaušų „Durus S400“.



33 pav. Suirusio pilko plaušo pavyzdžiai

- Plaušui „Durus S400“, įgilintam 2 cm, ištraukti reikalingas vidutinis energijos kiekis yra 50 % didesnis už energijos kiekį reikalingą ištraukti tiek pat įgilintą „Durus Easyfinish“ plaušą. Skirtumas tarp balto ir pilko 1 cm įgilintų plaušų vidutinio energijos kiekio taip pat panašus ir siekia apie 40 %. Balto plaušo ištraukimas pareikalavo beveik dvigubai daugiau energijos, nei pilko plaušo ištraukimas.

- Prieš bandymus išmatavus išsikišusios iš kubelių plaušų dalies ilgį, buvo pamatyta, kad jų įgilinimo ilgis atitinka numatytus 1 cm ir 2 cm, bet beveik visų plaušų poslinkis, atlikus bandymus, gaunamas didesnis nei jų įgilinimo ilgis. Taip atsitikdavo, nes plaušai deformuodavosi tempiant bei uždėjus ant jų griebtus plaušas būdavo prispaudžiamas prie kubelio, o bandant jis išsitiesindavo ir bendras poslinkis gaudavosi didesnis, nei įgilinimo ilgis.
- Išanalizavus gautus ištraukimo jėgos ir poslinkio grafikus, galima teigti, kad pilkas plaušas netinka stiprinimui, nes jis pasiekęs didžiausią savo ištraukimo jėgą, esant 2 cm įgilinimui, dažnai nutrūksta, todėl nėra prasmės bandyti stiprinti jo sukibties savybių, nes šio tipo plaušas atlaiko mažesnę jėgą, nei baltas plaušas ir yra linkęs trapiam suirti.
- Būtina atkreipti dėmesį į plaušo paruošimą ir pastatymą į griebtus, nes užveržiant plaušą griebtuose yra labai lengva jį pažeisti, kas sugadina bandymo rezultatus, nes pažeistas plaušas, nepasiekęs savo didžiausios ištraukimo jėgos, nutrūksta.
- Norint apsaugoti plaušą nuo pažeidimų, jis buvo apmaunamas plastikine apsauga nuo elektros laidų. Tinkamos apsaugos savybės buvo parinktos, bandant įvairaus tipo laidus. Apsaugotas plaušas buvo mechaniškai apspaudžiamas metalinėse plokštelėse ir tik vėliau plokštelės buvo tvirtinami bandymo įrangoje.
- Išanalizavus visus rezultatus buvo nuspręsta gerinti balto plaušo sukibtį bei 1 cm įgilinto pilko plaušo sukibtį, nes šių tipų plaušai trapiam nesuirdavo. Jie galėtų atlaikyti ir didesnę ištraukimo jėgą.

3. PLAUSO SUKIBTIES SAVYBIŲ STIPRINIMAS

Šiame skyriuje aprašoma atlikti bandymai siekiant pagerinti pilko „Durus Easyfinish“ 1 cm įgilinto plaušo ir balto plaušo „Durus S400“ sukibimą bei pateikti rezultatai ir išvados. Norint sustiprinti plaušo sukibimą su betonu, reikia modifikuoti betono sudėtį, pridėti į ją priedų, kurie galimai padidins didžiausią jėgą, kuriai esant plaušas išsitraukia, bet ne tiek sustiprinti sukibtį, kad plaušai suirtų trapiai (nutrūktų).

Tokiu pačiu principu, kaip ir antrame skyriuje, ruošiami klojiniai, maišomas betonas, liejami bandiniai ir atliekami bandymai. Bandymai buvo atliekami su „Durus S400“ ir „Durus Easyfinish“ plaušu. Baltas plaušas buvo įgilintas 1 ir 2 cm, o pilkas plaušas buvo įgilintas tik 1 cm, nes esant 2 cm įgilinimui jis linkęs nutrūkti. Buvo bandoma taip sustiprinti plaušo ir betono sukibtį, kad plaušas kuris įgilintas į chemiškai modifikuotą betoną išsitrauktų esant didesnei apkrovai, nei plaušai pirmųjų bandymų metu. Kadangi negalima lyginti dviejų skirtingų betonavimų rezultatus buvo liejami ir bandomi kontroliniai bandiniai, kuriuos būtų galima palyginti su stiprintais bandiniais.

Šioje darbo dalyje iš viso buvo 3 bandymų etapai. Pirmajame etape buvo bandoma sustiprinti plaušo sukibtį pridėdant į betoną priedo, TCAM 10, kuris turėtų padidinti betono hidrataciją ir tokiu būdu sustiprinti sukibtį. Daugiau niekas bandymų metu, nei betono sudėtyje nesikeitė.

Antrajame ir trečiajame etape buvo nuspręsta bandyti plaušo sukibtį su betonu didinti į betoną papildomai įmaišant ir plieninio mikroplošo.

3.1. Chemiškai stiprinto betono bandymai (Pirmasis stiprinimo etapas)

3.1.1. *Chemiškai modifikuotas betonas*

Kolega Pui Lamas iš Inovatyviųjų statybinių konstrukcijų laboratorijos pasiūlė, panaudoti priedą TCAM 10, kuris padidintų betono hidrataciją, taip būtų sustiprinama sukibtis tarp plaušo ir betono. Šis priedas buvo pilamas į betoną jį maišant maišyklėje kartu su vandeniu. Betono sudėtys skyrėsi tik tuo, kad į vieną mišinį buvo pridėta šio priedo, o kitas paliktas nemodifikuotas. Chemiškai modifikuotas betonas buvo užvadintas mišiniu 2 (žr. 5 lentelę), o nemodifikuotas betonas buvo pavadintas mišiniu 1 (žr. 4 lentelę). Su išbandytais kubeliais buvo atliekami gniuždymo bandymai, norint nustatyti jų gniuždomąjį stiprį. Iš viso buvo išlieti 24 kubeliai, 12 su modifikuotu betonu, 12 su nemodifikuotu. Po 4 kubelius kiekvienam plaušo tipui ir įgilinimui. Toliau pateikiama betonų sudėtis ir kubelių gniuždomasis stipris (žr. 4-6 lenteles).

4 lentelė. Nemodifikuoto betono sudėtis

Mišinys 1	Svoris, kg		
	Teorinis, m3 1,000	Faktinis, m3 0,047	Smėl. Drėg., % 3
Betono klasė	C30/37		
Cementas(CEM I 42,5 R)	300	14,040	14,040
Vanduo	165	7,722	7,490
Žvirgždo skalda 4/16	988	46,238	46,238
Klinteris	100	4,680	4,680
Smėlis 0/4	787	36,832	37,937
Superplastiklis (0,75%)	2,25	0,105	0,1053

5 lentelė. Modifikuoto betono sudėtis

Mišinys 2	Svoris, kg		
	Teorinis, m3 1,000	Faktinis, m3 0,047	Smėl. Drėg., % 3
Betono klasė	C30/37		
Cementas(CEM I 42,5 R)	300	14,040	14,040
Vanduo	163	7,628	7,400
Žvirgždo skalda 4/16	988	46,238	46,238
Klinteris	100	4,680	4,680
TCAM 10	2	0,094	0,094
Smėlis 0/4	787	36,832	37,937
Superplastiklis (0,75%)	2,25	0,105	0,1053

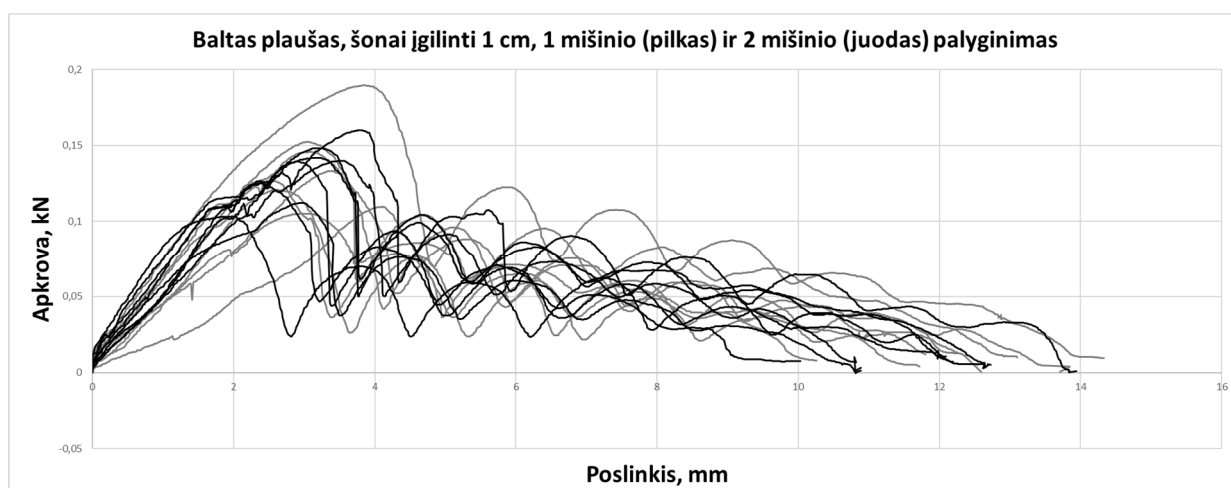
6 lentelė. Chemiškai stiprinto betono gniuždomasis stipris

Betono amžius, dienomis	Betono stipris f_c , MPa
28	39,5

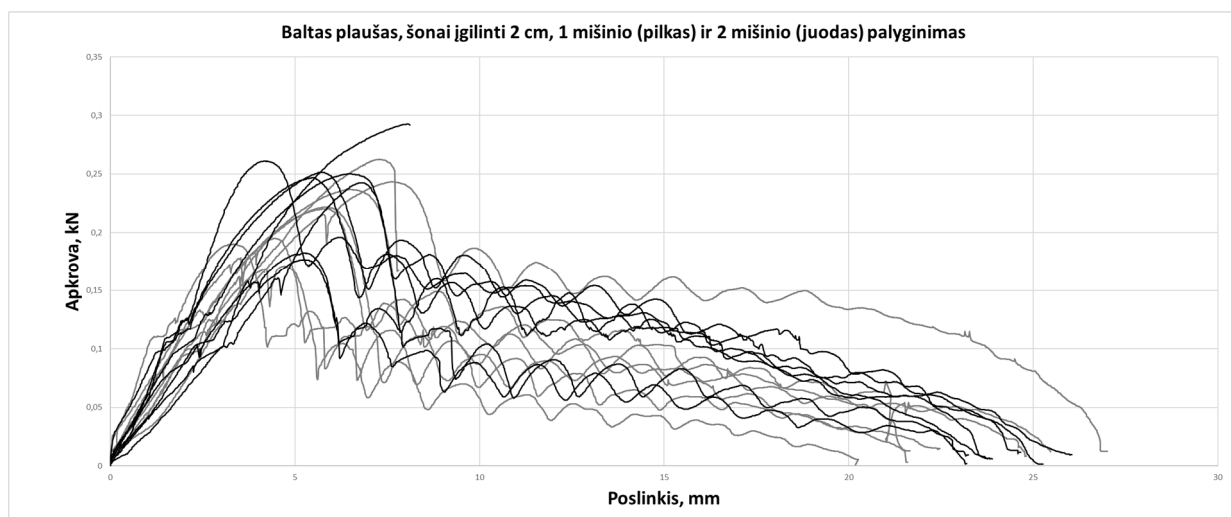
3.1.2. Pirmojo stiprinimo etapo bandinių rezultatai

Kaip ir pirmųjų bandymų metu, buvo paruošti klojiniai, betonuojami bandiniai ir atlikti plaušo traukimo bandymai, kurių metu plaušas buvo traukiamas iš chemiškai modifikuoto betono kubelių ir nemodifikuoto betono kubelių. Detalesnis aprašymas nepateikiamas, nes visi bandymai buvo aprašyti 2 skyriuje.

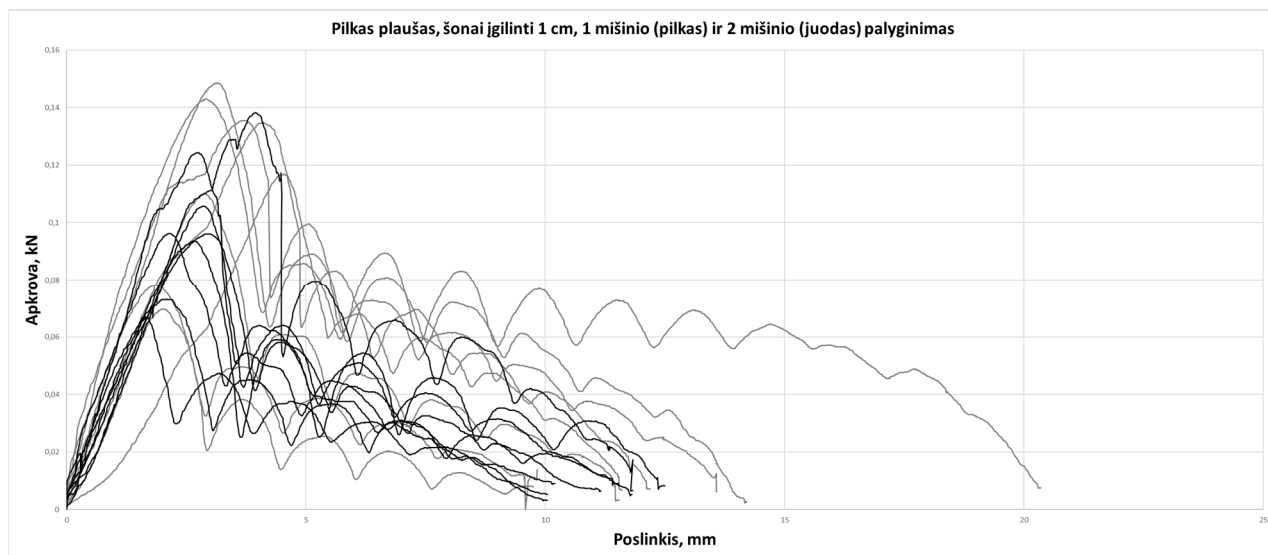
Atlikus bandymus buvo gautos bandinių ištraukimo jėgos ir poslinkio diagramos, kurios pateiktos žemiau:



34 pav. Balto plaušo, įgilinto 1 cm, pirmo ir antro mišinio palyginimas



35 pav. Balto plaušo, įgilinto 2 cm, pirmo ir antro mišinio palyginimas



36 pav. Pilko plaušo, įgilinto 1 cm, pirmo ir antro mišinio palyginimas

Iš gautų apkrovos-poslinkio diagramų (žr. 34-36 pav.) matyti, kad į betoną įmaišius TCAM 10 priedo, jis neturėjo įtakos plaušo sukibimui su betonu ir abiejų sintetinių makroplaušų diagramos yra labai panašios. Nors buvo pagerintas į viršų įbetonuotų plaušų fiksavimo padėtyje metodas, tačiau šio tipo plaušų rezultatai vis tiek gavosi stipriai išsibarstę tiek poslinkio, tiek apkrovos atžvilgiu.

Taip pat pateikiami energijos kiekiai (žr. 7 lentelę), apskaičiuoti tokiu pačiu principu, kaip ir plaušo sukibties savybių nustatymo etapo metu.

7 lentelė. Energijos kiekis, reikalingas ištraukti plaušui (Pirmas stiprinimo etapas)

Baltas, įgilintas 1 cm, nemodifikuotas	B1.1(1) (S1)	B1.1(1) (S2)	B1.1(2) (S1)	B1.1(2) (S2)	B1.1(3) (S1)	B1.1(3) (S2)	B1.1(4) (S1)	B1.1(4) (S2)
Energija, Nm	617,583	527,043	844,609	603,867	730,839	1078,461	535,156	690,421
Baltas, įgilintas 1 cm, su TCAM 10	B1.2(1) (S1)	B1.2(1) (S2)	B1.2(2) (S1)	B1.2(2) (S2)	B1.2(3) (S1)	B1.2(3) (S2)	B1.2(4) (S1)	B1.2(4) (S2)
Energija, Nm	555,965	796,044	798,763	545,376	710,868	849,691	563,5	669,896
Baltas, įgilintas 2 cm, nemodifikuotas	B2.1(1) (S1)	B2.1(1) (S2)	B2.1(2) (S1)	B2.1(2) (S2)	B2.1(3) (S1)	B2.1(3) (S2)	B2.1(4) (S1)	B2.1(4) (S2)
Energija, Nm	2249,187	2170,394	3075,91	1317,979	1732,37	1210,78	1917,654	2422,42
Baltas, įgilintas 2 cm, su TCAM 10	B2.2(1) (S1)	B2.2(1) (S2)	B2.2(2) (S1)	B2.2(2) (S2)	B2.2(3) (S1)	B2.2(3) (S2)	B2.2(4) (S1)	B2.2(4) (S2)
Energija, Nm	1665,819	1796,089	1348,657	2654,237	2733,73	2989,079	2462,107	2814,934
Pilkas, įgilintas 1 cm, nemodifikuotas	P1.1(1) (S1)	P1.1(1) (S2)	P1.1(2) (S1)	P1.1(2) (S2)	P1.1(3) (S1)	P1.1(3) (S2)	P1.1(4) (S1)	P1.1(4) (S2)
Energija, Nm	254,859	791,701	773,697	495,617	714,614	359,912	847,511	555,803
Pilkas, įgilintas 1 cm, su TCAM 10	P1.2(1) (S1)	P1.2(1) (S2)	P1.2(2) (S1)	P1.2(2) (S2)	P1.2(3) (S1)	P1.2(3) (S2)	P1.2(4) (S1)	P1.2(4) (S2)
Energija, Nm	300,288	474,745	687,492	454,345	355,757	406,916	484,137	489,373

Vidutinės energijos reikšmės ištraukti plaušą tiek iš chemiškai modifikuoto, tiek ir nemodifikuoto betono, labai panašios. Baltam 1 cm įgilintam plaušui jos lygios: 703,5 Nm nemodifikuotam betonui ir 686,3 Nm chemiškai stiprintam betonui. Baltam 2 cm įgilintam plaušui: 2012,1 Nm nemodifikuotam betonui ir 2308,1 Nm chemiškai stiprintam betonui. Pilkam 1 cm įgilintam plaušui: 599,2 Nm nemodifikuotam plaušui ir 456,6 Nm chemiškai stiprintam plaušui.

3.2. Betono stiprinto su plieno plaušu bandymai (Antrasis ir trečiasis stiprinimo etapai)

3.2.1. Plieninio mikroplaušo ir betono aprašymas

Kai buvo pamatyta, kad TCAM 10 neturėjo įtakos betono ir plaušo sukibčiai, buvo pasitarta su kolega Pui Lamu ir nuspręsta tam naudoti plieninį mikroplaušą. Plieniniam plaušui mechaniškai apspaudus sintetinį plaušą, jo sukibtis su betonu turėtų pagerėti.

Buvo pasirinktas „Dramix“ plieninis plaušas (žr. 38 pav.) , kurio mechaninės savybės pateiktos sertifikate (žr. 37 pav.):

Ilgis – 13 mm;

Diametras – 0,16 mm;

Tempiamasis stipris – 2000 N/mm²



37 pav. Plieninis mikroplaušas (BEKAERT, 2019)

Dramix®

better together

DATA SHEET

OL 13/.16

OL13/.16

What is Dramix®?

Dramix® steel fibres, from industry specialist Bekaert, have set a new standard for concrete reinforcement with their unique combination of flexibility and cost-efficiency.

Dramix® is a cold drawn steel wire fibre with hooked ends for optimum anchorage. What you get from Dramix® reinforced concrete is ductility and high load bearing capacity. On top of that, you receive a quick and easy application, an efficient and cost effective solution.

OL 13/.16 offers you:

Dramix® Hi Perform
Dramix® Hi Perform fibres are providing high performance and crack resistance. These are products of choice to create optimal ductility in high strength but brittle concretes from 100 N/mm² onwards.

GEOMETRY AND PERFORMANCE

length (l)

13 mm

diameter (d)

0,16 mm

Bright

High Carbon

490.000 Fibres/kg

MATERIAL PROPERTIES

Tensile strength: Rm min: 2000 N/mm²

PACKAGING

36 boxes (25kg)
900 kg

Handle with care: Verify our handling, mixing and dosing recommendations.

STORAGE

KEEP DRY

NO STACKING

APPROVALS

ISO 9001

• ISO 9001 LABEL: Dramix® OL type is ISO 9001 certified. Production plant:
• Slovak Republic

Bekaert will advise on the most suitable fibre for your application. Ask for our recommendations on handling, dosing and mixing at: www.bekaert.com/building infobuilding@bekaert.com

All Bekaert company names are trademarks owned by NV Bekaert SA Zaventem - Belgium. Modifications reserved. All details describe our products in general form only. For detailed information, product specifications available on request.

© 2008 Bekaert

38 pav. Plieninio mikroploušo sertifikatas (BEKAERT, 2019)

Išsirinkus plieninį mikroploušą, buvo maišomi 3 skirtingi betono mišiniai. Kiekvienam mišiniui buvo betonuojama po 2 kubelius. Buvo išbetonuotas mišinys be plieninio ploušo (žr. 8 lentelę). Bandiniai be plieninio ploušo bus reikalingi palyginimui, taip nustatant kokį poveikį plieninis ploušas turėjo betono ir sintetinio ploušo sukibčiai. Tada buvo išbetonuoti dar 2 mišiniai su 0,5% (0,94 kg) (žr. 10 lentelę) ir 1% (0,188 kg) (žr. 9 lentelę) plieninio ploušo betono sudėtyje. Toliau pateikiamos betono sudėtys ir kubelių nustatytas gniuždomasis stipris (žr. 11 lentelę).

8 lentelė. Betonas be plieninio plaušo

Mišinys 3	Svoris, kg	
	Teorinis, m3	Faktinis, m3
	1,000	0,002
Betono klasė	C30/37	
Cementas(CEM I 42,5 R)	330	0,792
Vanduo	170	0,408
Žvirgždo skalda 2 /5	800	1,92
Klintis	165	0,396
Smėlis 0/4	865	2,076
Superplastiklis (0,75%)	5	0,012
Plieninis mikroplaušas	0	0

9 lentelė. Betonas su 1% plieninio plaušo

Mišinys 3a	Svoris, kg	
	Teorinis, m3	Faktinis, m3
	1,000	0,002
Betono klasė	C30/37	
Cementas(CEM I 42,5 R)	330	0,792
Vanduo	169,2	0,406
Žvirgždo skalda 2 /5	787,7	1,89
Klintis	165	0,396
Smėlis 0/4	851,8	2,044
Superplastiklis (0,75%)	5,8	0,014
Plieninis mikroplaušas	78,5	0,188

10 lentelė. Betonas su 0,5% plieninio plaušo

Mišinys 3b	Svoris, kg	
	Teorinis, m3 1,000	Faktinis, m3 0,002
Betono klasė	C30/37	
Cementas(CEM I 42,5 R)	330	0,792
Vanduo	168,4	0,406
Žvirgždo skalda 2 / 5	775,5	1,89
Klintis	165	0,396
Smėlis 0/4	838,5	2,044
Superplastiklis (0,75%)	6,6	0,014
Plieninis mikroplaušas	39,25	0,94

11 lentelė. Plieniniu plaušu stiprinto betono gniuždomasis stipris

Betono amžius, dienomis	Betono stipris f_c , MPa
28	53,4

3.2.2. Bandinių su plieniniu mikroplaušu paruošimas

Šiems bandymams buvo naudojami tik balti ir 2 cm įgilinami sintetiniai plaušai. Taip pat skyrėsi šių kubelių betonavimo eiga, nes buvo betonuojamas daug mažesnis jų kiekis, todėl nebuvo naudojama didelė maišyklė. Maišant su mažesniu maišytuvu buvo susidurta su problema, dėl betono tešlos išsisluoksniavimo ir vandens atsiskyrimo nuo mišinio.

2 etape dėl netinkamo užpildo proporcijų ir dydžio parinkimo, įvyko vandens ir superplastiklio atsiskyrimas nuo cemento tešlos (žr. 39 pav.), taip pat dėl mažos maišyklės ir per didelės frakcijos užpildo, išsisluoksniavo betonas, bet bandiniams sukietėjus ir juos išbandžius buvo pamatyta, kad plaušo sukibimas pastebimai pagerėjo, nors betonas buvo technologiškai netinkamas.



39 pav. Antrojo etapo slankumo bandymai su atsiskyrusiu vandeniu ir superplastikliu

Tam, kad būtų pasiekiami tenkinantys rezultatai trečiajame bandymų etape teko keisti superplastiklį ir sumažinti žvirgždo skaldos užpildo frakciją iki 2/5. Išmaišius kiekvieną betono mišinį buvo žiūrima, kad vanduo neatsiskirtų nuo betono tešlos ir kad betonas būtų gerai išmaišomas bei visų mišinių konsistencija būtų panaši, todėl buvo atliekami slankumo bandymai.

Išmaišius pirmąją betono mišinį ir atlikus slankumo bandymą, šis mišinys praktiškai nebuvo paveiktas bandymo (žr. 40 pav.), tik matomas nedidelis vandens atsiskyrimas nuo cemento tešlos. Tam, kad padidintume mišinio slankumą buvo padidintas vandens ir superplastiklio kiekis betone iki reikšmių pateiktų lentelėje, taip pat buvo padidintas ir vandens ir superplastiklio kiekis kituose mišiniuose, kad visų mišinių proporcijos būtų vienodos.



40 pav. Betono be plieninio plaušo nepavykęs slankumo bandymas

Pataisius betono sudėtį, buvo dar kartą atliekamas slankumo bandymas su mišiniu be plaušo pavadintu mišiniu 3. Atlikus bandymą betono, kuriame nebuvo plieninio mikro-plaušo, slankumas buvo gautas 16 cm (žr. 41 pav.). Šis mišinys buvo naudojamas palyginimui su kubeliais, kuriuose panaudotas plieninis mikroplaušas.



41 pav. Betono be plieninio plaušo slankumo bandymas

Po šio bandymo buvo atliekamas bandymas su betono mišiniu, kuriame panaudota 0,5% plieninio mikroplaušo (žr. 42 pav.). Šis mišinys buvo pavadintas mišiniu 3b. Dėl plieninio plaušo betono sudėtyje, šio tipo mišiniui taip pat buvo panaudota daugiau superplastiklio, kad būtų pasiekama reikiama mišinio konsistencija ir slankumas. Šio mišinio slankumas buvo gautas 16,5 cm.



42 pav. Betono su 0,5 % plieninio plaušo slankumo bandymas

Tada buvo bandomas mišinys kuriame panaudotas 1% plieninio mikroplaušo. Jis užvadintas mišiniu 3a. Šio mišinio slankumas šiek tiek mažesnis nei prieš tai buvusių mišinių, apie 14,5 cm (žr. 43 pav.). Dedant į jį daugiau superplastiklio nebebuvo gaunami geresni rezultatai, nes vanduo ir superplastiklis pradėjo atsiskirti nuo cemento tešlos.



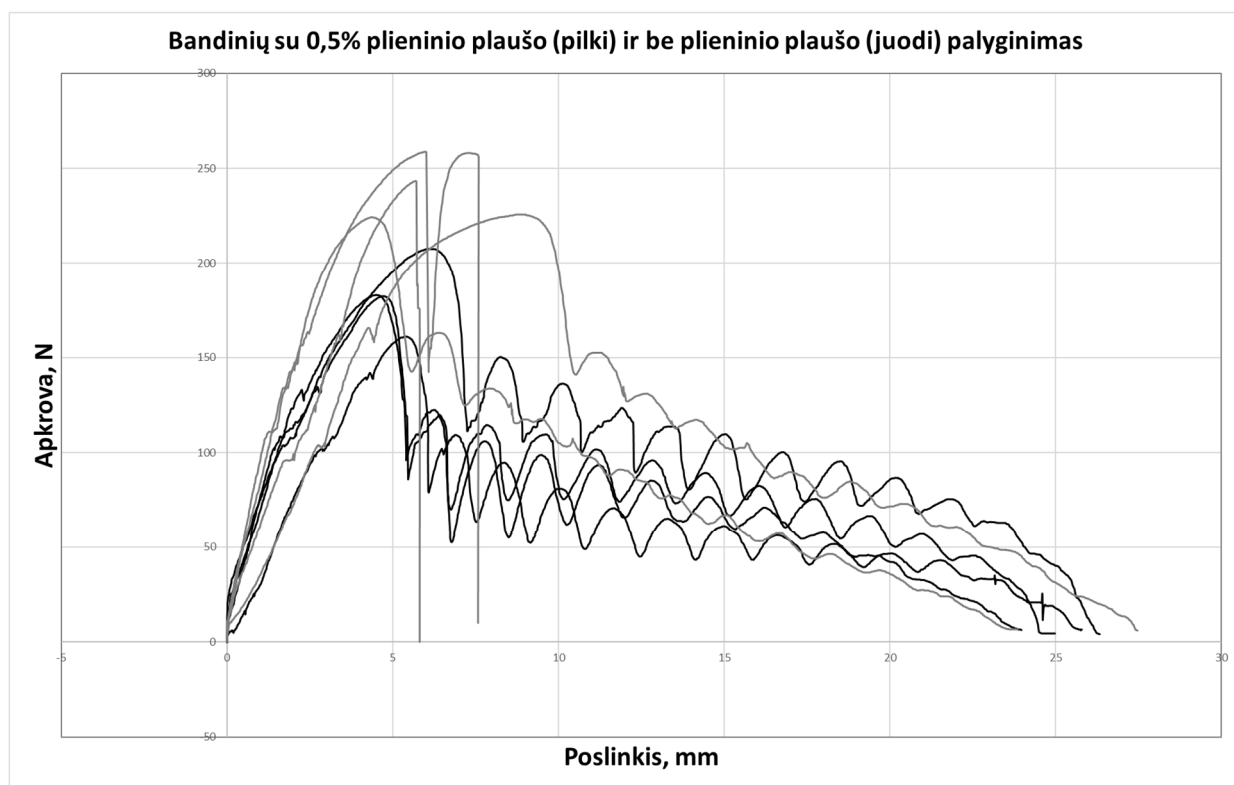
43 pav. Betono su 1 % plieninio plaušo slankumo bandymas

Kai buvo gautas tinkamas mišinių slankumas, šie mišiniai buvo supilami į iš anksto paruoštus klojinius, vibruojami ir paliekami kietėti. Praėjus 30 dienų nuo jų išbetonavimo, jie buvo tokiu pačiu principu kaip ir pirmuose bandymuose, išbandomi ir gaunami šių bandymų rezultatai. Tolimesnė bandymų eiga nesiskyrė, nuo prieš tai buvusių bandymų, todėl ji detaliau nebus aprašoma.

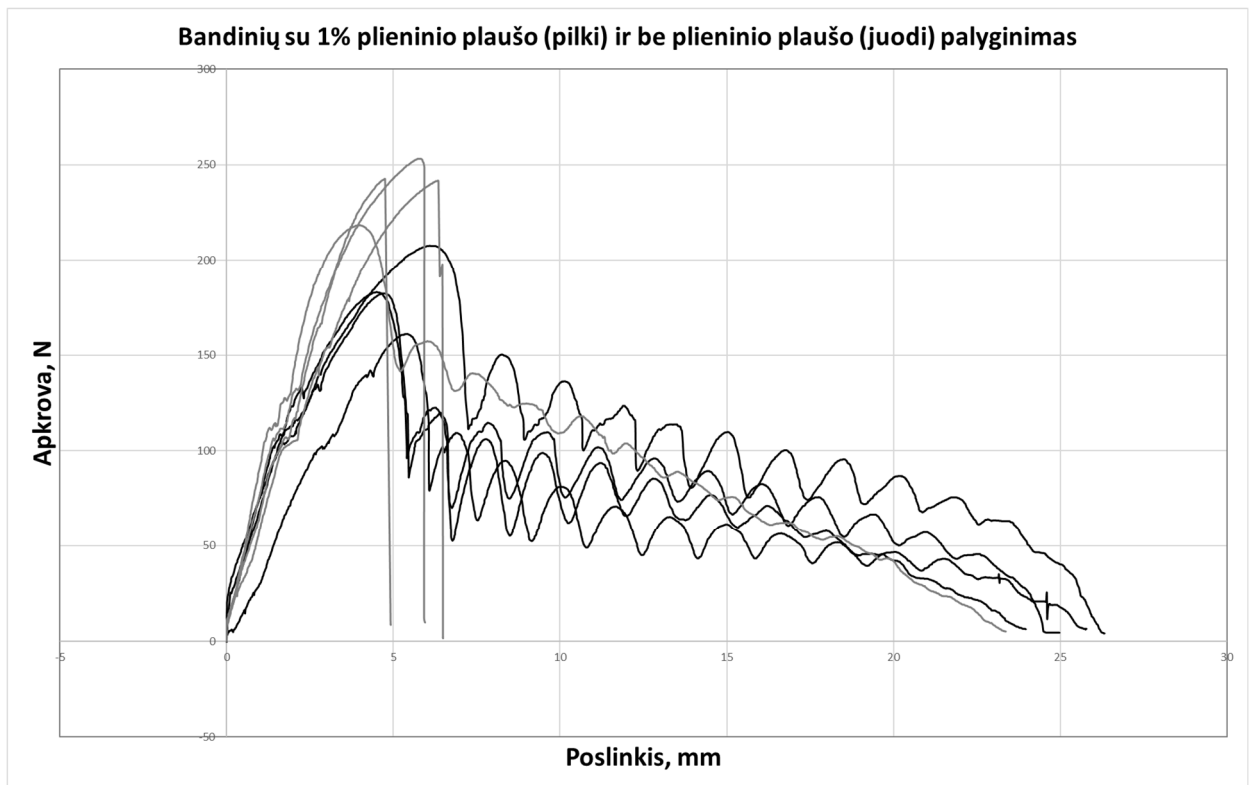
3.2.3. Bandinių su plieniniu mikroplaušu rezultatai

Kaip ir plaušo sukibties nustatymo bei pirmojo stiprinimo etapo bandymų metu buvo paruošti klojiniai, betonuojami bandiniai ir atlikti plaušo traukimo bandymai, kurių metu plaušas buvo traukiamas iš plieniniu plaušu stiprintų kubelių.

Atlikus antrojo etapo bandymus buvo gautos bandinių ištraukimo jėgos ir poslinkių diagramos, kurios pateiktos 44-45 paveikslėliuose:



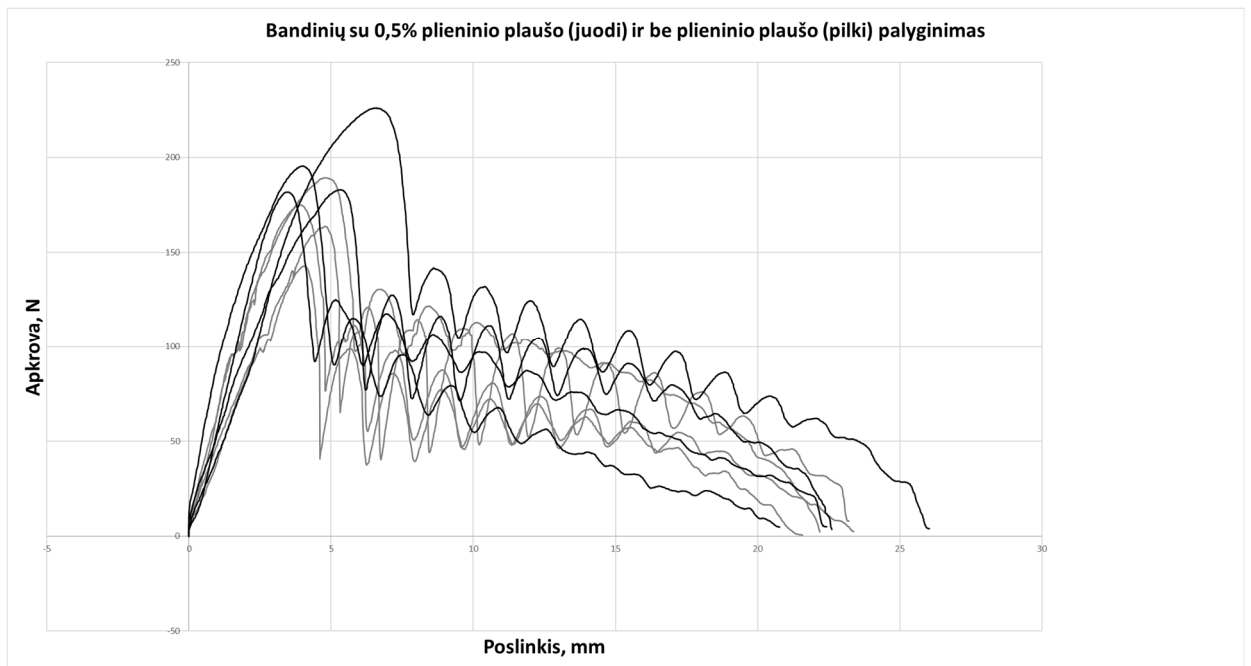
44 pav. Balto plaušo, įgilinto 2 cm, bandinių be plieninio plaušo ir su 0,5 % plieninio plaušo palyginimas (2 etapas)



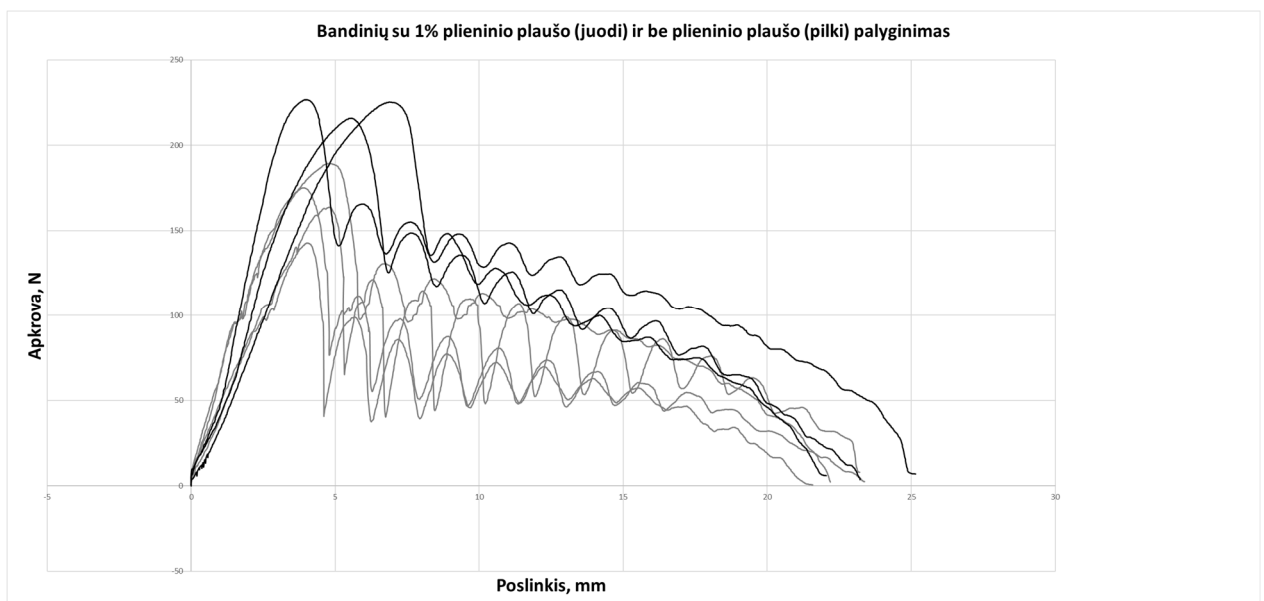
45 pav. Balto plaušo, įgilinto 2 cm, bandinių be plieninio plaušo ir su 1 % plieninio plaušo palyginimas (2 etapas)

Iš antrojo etapo gautų apkrovos ir poslinkio diagramų (žr. 44 ir 45 pav.) matyti, jog bandymas sustiprinti sintetinio plaušo sukibtį su betonu pavyko ten kur į betoną buvo įmaišyta 0,5 % plieninio mikroplaušo, ten kur buvo įmaišyta 1 % plieninio mikroplaušo, sintetiniai plaušai pradėjo trūkti, o jų didžiausios atlaikomos traukimo jėgos jau mažai kuo skyrėsi nuo bandinių kur buvo įmaišyta 0,5 % plieninio plaušo.

Atlikus trečiojo etapo bandymus buvo gautos bandinių ištraukimo jėgos ir poslinkio diagramos, kurios pateiktos 46-47 paveikslėliuose:



46 pav. Balto plaušo, įgilinto 2 cm, bandinių be plieninio plaušo ir su 0,5 % plieninio plaušo palyginimas (3 etapas)



47 pav. Balto plaušo, įgilinto 2 cm, bandinių be plieninio plaušo ir su 1 % plieninio plaušo palyginimas (3 etapas)

Iš gautų apkrovos ir poslinkio diagramų (žr. 46 ir 47 pav.) nustatyta, jog bandymas sustiprinti sintetinio plaušo sukibtį su betonu pavyko ten, kur į betoną buvo įmaišyta 1 % plieninio mikroplaušo ir dalinai, kur buvo įmaišyta 0,5% plieninio mikroplaušo. Šių bandymų metu taip pat buvo bandyti plaušai, įbetonuoti į kubelių viršų, bet jie kaip ir ankstesniųjų bandymų metu gauti labai stipriai išsibarstę, su stipriai besiskiriančiais įgilinimo ilgiais, dėl to jie netinka šiems tyrimams. Polistirenas, kuris buvo padedamas ant nesukietėjusių formų viršaus, kietėjant dalinai nugrimzdavo į betoną, dėl ko plaušų įgilinimo ilgiai vis tiek būdavo labai skirtingi.

Trečio etapo bandymų ištraukimo jėgos nebuvo tokios didelės, kokios buvo gautos antrojo etapo metu, nors betono teslos slankumas ir buvo subalansuotas, tai leidžia manyti, kad papildomas sintetinio plaušo mechaninis sukibimas su betono matrica užtikrina sukibties kokybę.

Taip pat, kaip ir praeituose skyriuose, buvo apskaičiuota reikalinga energija ištraukti plaušą 3 stiprinimo etape, kuri pateikta 12 lentelėje.

12 lentelė. Reikalingas energijos kiekis ištraukti plaušą (3 etapas)

Baltas, įgilintas 2 cm, be plaušo	B2. 1 (0) (S1)	B2. 1 (0,5) (S2)	B2. 2 (0) (S1)	B2. 2 (0) (S1)
Energija, Nm	1267.493	1523.559	1706.21	2056.438
Baltas, įgilintas 2 cm, 0,5 % plaušo	B2. 1 (0,5) (S1)	B2. 1 (0,5) (S2)	B2. 2 (0,5) (S1)	B2. 2 (0,5) (S1)
Energija, Nm	1481.665	2394.204	1713.506	1927.884
Baltas, įgilintas 2 cm, 1 % plaušo	B2. 1 (1) (S1)	B2. 1 (0,5) (S2)	B2. 2 (1) (S1)	B2. 2 (1) (S1)
Energija, Nm	2289.725	Pažeistas	2589.714	2288.675

Iš lentelės matyti, jog kuo daugiau plieninio plaušo pridėta į betoną, tuo daugiau energijos reikia suvartoti, tam kad būtų ištraukiamas sintetinis makroplaušas. Vidutiniškai reikia 1638,425 Nm ištraukti plaušą iš betono be plieninio mikroplaušo, tada reikia 1879, 315 Nm ištraukti plaušą iš betono, kuriame įdėta 0,5 % plieninio mikroplaušo ir reikia 2389,371 Nm, tam kad būtų ištraukiamas plaušas iš 1 % plieniniu plaušu armuoto betono.

3.3. Stiprinimo rezultatų aptarimas ir išvados

Buvo atlikti sintetinio plaušo ir betono sukibties stiprinimo bandymai. Tyrimai buvo išskirstyti į 3 etapus. Pirmojo etapo metu siekiama chemiškai pagerinti sukibties mechanines savybes, naudojant TCAM 10 priedą, gerinti betono hidrataciją. Pirmojo bandymų etapo metu, buvo išbetonuota po 8 kubelius kiekvienam plaušo įgilinimo ilgiui ir tipui (iš viso 24). Antrojo bandymų etapo metu buvo betonuojami 6 kubeliai (po 2 esant skirtingiems plieninio plaušo kiekiams betone). Plieninio plaušo taikymas leido padidinti ištraukimo jėgą, kuriai esant plaušas ištraukiamas, bet betonas buvo gautas technologiškai netinkamas: nepavyko pasiekti priimtino mišinio slankumo. Trečiojo etapo metu taip pat buvo betonuojami 6 kubeliai (po 2 esant skirtingiems plieninio plaušo kiekiams betone). Šio etapo metu buvo pakeistas superplastiklio kiekis betone ir sumažintas užpildo dydis bei pridėta į betoną plieninio mikroplaušo.

- Analizuojant pirmojo, plaušo ir betono sukibties, stiprinimo etapo ištraukimo jėgos ir poslinkio diagramas nustatyta, kad TCAM 10 priedas, kuris pagerina betono hidrataciją, neturėjo jokio

poveikio sintetinio makroplaušo ir betono sukibčiai. Visų plaušo tipų ir įgilinimo ilgių atvejais tiek modifikuoti, ir tiek nemodifikuoti bandiniai pasiekė panašias ištraukimo jėgas.

- Chemiškai modifikuoto betono pilko 1 cm įgilinto plaušo didžiausia ištraukimo jėga – 135 N, nemodifikuoto betono pilko plaušo didžiausia pasiekta ištraukimo jėga – 150 N. Vidutinės šio tipo plaušo ištraukimo jėgų reikšmės: nemodifikuotiems betono bandiniams – 70 N, o chemiškai modifikuotiems bandiniams – 50 N. Nemodifikuoti bandiniai atlaiko didesnę jėgą, nei modifikuoti bandiniai, todėl stiprinimas neturėjo jokio poveikio arba netgi turėjo neigiamą poveikį pilko 1 cm įgilinto plaušo sukibčiai su betonu.
- Buvo gautos apkrovos ir poslinkio diagramos. Plotas apibrėžtas šiomis diagramomis apibūdina deformacijos energiją. Energijos kiekiai reikalingi ištraukti plaušą, tiek iš chemiškai modifikuoto betono ir nemodifikuoto betono yra labai panašūs, nesiskiria daugiau nei 10 %. Vienintelio pilko plaušo reikalingas energijos kiekis ištraukti plaušą iš chemiškai stiprinto betono, nukrito 25 %.
- Balto plaušo įgilinto 1 cm į chemiškai nemodifikuotą betoną, didžiausia atlaikoma ištraukimo jėga – 185 N, o tokio pačio tipo, modifikuotam plaušui – 165 N. Vidutinės reikšmės šio plaušo tipui irgi labai panašios, nemodifikuotiems bandiniams – 70 N, o modifikuoto betono bandiniams – 60 N. Šiuo atveju plaušas trauktas iš nemodifikuoto betono kubelių taip pat atlaikė daugiau, nei tie kurie buvo traukti iš chemiškai modifikuoto betono kubelių. Balto plaušo įgilinto 2 cm didžiausia ištraukimo jėga nemodifikuotame betone – 260 N, o modifikuotame betone – 290 N. Vidutinės šio tipo plaušo ištraukimo jėgos reikšmės: nemodifikuotam plaušui – 125 N, o modifikuoti – 130 N.
- Baltas plaušas įgilintas 2 cm į chemiškai modifikuotą betoną atlaikė šiek tiek daugiau, nei nemodifikuotas, bet skirtumas labai nežymus (iki 5%).
- Cheminio priedo taikymas reikšmingai sumažino eksperimentinių rezultatų išsibarstymą. Modifikuoti bandiniai nėra taip išsibarstę, kaip nemodifikuoti, bet skirtumas irgi labai nedidelis. Taip pat buvo nuspręsta toliau bandyti tik 2 cm įgilintą baltą plaušą, nes mūsų tikslui pasiekti užtenka sustiprinti vieno plaušo tipo sukibtį.
- Trečiame bandymų etape metu įdėjus į betoną 1 % plieninio mikroplaušo jėga reikalinga ištraukti plaušą, vidutiniškai padidėjo iki 30 %: nuo 170 N iki 225 N, o įdėjus 0,5 % plieninio mikroplaušo, jėga vidutiniškai padidėjo 10 %: nuo 175 N iki 190 N.
- Pagal šiame bandymų etape gautos apkrovos ir plaušo deformacijų diagramos apskaičiuotas reikalingos energijos ištraukti plaušą kiekius matome, kad padidėjo reikalinga energija ištraukti plaušą, todėl sintetinio plaušo efektyvumas buvo padidintas: 1 % plieniniu plaušu armuotas betonas padidino energijos kiekį reikalingą ištraukti plaušą 45 %, o 0,5 % plieniniu plaušu armuotas betonas padidina reikalingą energijos kiekį 15 %. Tikėtina, jog metalinio plaušo

įmaišymas į betona pagerina didžiausias plaušo atlaikomas traukimo jėgas, kas turi įtakos ir konstrukcijos mechaninės savybėms, kuriose naudojamas plaušais armuotas betonas.

- Sintetinio plaušo sukibties su betonu pagėrėjimą galima būtų paaiškinti, tuo kad plieninis mikrop্লাušas mechaniškai apspaudė betoną, kas padarė įtakos ir sintetinio makrop্লাušo sukibčiai, tai rodo ir trečio bei antro etapo skirtumai, kur antrame etape, betonas buvo netinkamas, bet ištraukimo jėgos reikšmė antrojo stiprinimo etapo jėgos ir poslinkio grafikuose buvo vidutiniškai 10 procentų didesnė (vidutiniškai 250 N) nei ta kuri buvo pasiekta trečiajame etape. Trečiajame etape buvo gauta didžiausia 225 N jėga.

IŠVADOS IR REKOMENDACIJOS

Tyrimų metu buvo nustatomos sintetinių makroplaušų sukibties su betonu savybės ir įvertinama galimybė pagerinti šias savybes sintetiniams makroplaušams. Plaušo sukibties su betonu savybių nustatymo bandymų metu buvo išbetonuoti 8 bandiniai, kiekvienam plaušo tipui ir įgilinimo ilgiui (iš viso 32), kurie buvo išbandyti, traukiant plaušą, įgilintą į šiuos betoninius bandinius ir gaunant ištraukimo jėgos ir poslinkio diagramas. Gavus rezultatus ir nustatčius, kokio tipo plaušų sukibtį su betonu būtų galima pagerinti, buvo atlikti plaušo sukibties stiprinimo bandymai. Tyrimai buvo išskirstyti į 3 etapus. Pirmojo etapo metu siekiama chemiškai pagerinti sukibties mechanines savybes, naudojant TCAM 10 priedą, gerinti betono hidrataciją. Pirmojo bandymų etapo metu, buvo išbetonuota po 8 kubelius kiekvienam plaušo įgilinimo ilgiui ir tipui (iš viso 24). Antrojo bandymų etapo metu buvo betonuojami 6 kubeliai (po 2 esant skirtingiems plieninio plaušo kiekiams betone). Plieninio plaušo taikymas leido padidinti ištraukimo jėgą, kuriai esant plaušas ištraukiamas, bet betonas buvo gautas technologiškai netinkamas: nepavyko pasiekti priimtino mišinio slankumo. Trečiojo etapo metu taip pat buvo betonuojami 6 kubeliai (po 2 esant skirtingiems plieninio plaušo kiekiams betone). Šio etapo metu buvo pakeistas superplastiklio kiekis betone ir sumažintas užpildo dydis bei pridėta į betoną plieninio mikroplaušo.

- Atlikus eksperimentinius tyrimus buvo gautos sintetinio makroplaušo ištraukimo jėgos ir poslinkio diagramos, iš kurių buvo įvertinta plaušo sukibtis su betonu, esant skirtingiems 1 cm ir 2 cm įgilinimo ilgiams. Gauta, kad 1 cm įgilintas plaušas atlaiko 20-30 % mažiau, nei 2 cm įgilintas sintetinis plaušas. Vidutiniškai pilkas plaušas (Durus Easyfinish) atlaiko apie 170 N, o baltas plaušas (Durus S400) apie 225 N. Remiantis gautomis jėgos ir poslinkių diagramomis, buvo nuspręsta, kad stiprinimui tinka baltas, „Durus S400“ plaušas, nes jis pademonstravo stiprio rezervą, o pilko „Durus Easyfinish“ 2 cm įgilinto plaušo stiprinti nereikia, nes jis ir taip pakankamai efektyvus nagrinėtame 44,75 MPa gniuždomojo stiprio betone (50 % visų bandinių plaušas nebuvo ištraukiamas, o nutrūkdavo).
- Pasirinkus cheminį TCAM 10 priedą arba papildomai įmaišant į betoną plieninį mikroplaušą „Dramix“ buvo bandoma sustiprinti sintetinio plaušo sukibtį su betonu, kad jis pasiektų didesnę ištraukimo jėgą ir nesuirtų. Buvo nustatyta, kad cheminis priedas, skirtas cemento hidratacijai gerinti, TCAM 10 neturėjo įtakos plaušo sukibčiai.
- Plieninio mikroplaušo įmaišymas į betoną turėjo teigiamą poveikį sintetinio makroplaušo sukibčiai su betonu, nes įdėjus į betoną 1 % plieninio mikroplaušo jėga, reikalinga ištraukti plaušą, vidutiniškai padidėjo iki 30 %, nuo 170 N iki 225 N, o įdėjus 0,5 % plieninio mikroplaušo, jėga vidutiniškai padidėjo 10 %, nuo 175 N iki 190 N.

- Iš 2 bandymų etapo ištraukimo jėgos ir poslinkio diagramų buvo nustatyta, kad didžiausia pasiekta ištraukimo jėga buvo 270 N, o 3 bandymų etapo metu buvo pasiekta 250 N ištraukimo jėga. Todėl galima teigti jog sintetinio plaušo sukibimo kokybė tikėtina, kad padidėjo dėl mechaninio apspaudimo, kurį suteikė įmaišytas plieninis plaušas, nes net ir su per stambiu užpildu ir atsiskyrusiu vandeniu, sintetinio plaušo sukibtis vidutiniškai didesnė (iki 10 % esant 1 % plieninio plaušo ir 15 % esant 0,5 % plieninio plaušo) ir jie dažniau pradėjo trūkti, nei betoną paruošus tinkamai, kaip kad buvo padaryta 3 stiprinimo etape, suregulavus užpildus ir cemento teslos slankumą. Didžiausia ištraukimo jėga pasiekta antrajame stiprinimo etape buvo 270 N įdėjus 0,5 % plieninio plaušo į betoną, o trečiajame stiprinimo etape įdėjus 0,5 % plieninio plaušo, didžiausia ištraukimo jėga buvo 210 N. Dėl šių priežasčių geriausia būtų į betoną maišyti ir sintetinį makroplaušą ir plieninį mikroplaušą, tai patvirtina ir rasti literatūros šaltiniai, juose rašoma, kad skirtingo tipo plaušai, sustiprina atsparumą skirtingo tipo betono pleišėjimui (mikropleišėjimui ir makropleišėjimui).
- Eksperimentiškai nustatyta, kad plaušų įbetonuotų kubelių viršuje ištraukimo jėgos ir poslinkiai yra labiau išsibarstę (nuo 20 % šoninėse plokštumose, sintetinio plaušo maksimalios ištraukimo jėgos išsibarstymas padidėjo iki 70 %) ir netinkami daryti išvadas apie plaušo sukibtį, nes jie nugrimzdavo į betoną arba iškildavo iš jo, betonui kietėjant. Tokie bandiniai pasiekdavo 20 % mažesnę ištraukimo jėgą, nei bandiniai įgilinti iš betoninio kubelio šonų, nors dėl plaušo nugrimzdimo į betoną kai kurių bandinių įgilinimo ilgis gaudavosi panašus į 2 cm įgilintų sintetinių plaušų.

Rekomendacijos:

1. Plaušai, įgilinti į betoninių kubelių viršų, nėra tinkami atlikti bandymams su sintetiniu makroplaušu, nes nėra sugalvoto tinkamo būdo juos užfiksuoti vietoje taip, kad jie nenugrimztų ar neiškiltų iš betono, todėl rekomenduojama tirti plaušus, įbetonuotus šonuose.
2. Rekomenduojama skirti dėmesį sintetinio makroplaušo paruošimui ištraukimo bandymams, panaudoti apsaugines priemones, tokias kaip gumines plėveles, leidžiančios išvengti plaušo suirimo dėl įtempių koncentracijos, t. y., kad plaušas nebūtų pažeidžiamas statant jį į griebtus, nes bus gaunami netinkami rezultatai.
3. Naudojant plaušu armuotą betoną, kad jo liekamas stipris būtų kuo didesnis ir betonas bei plaušas nesuirėtų trapijai, geriausia būtų naudoti skirtingų tipų (mikro ir makro) plaušus. Tokie betonai turėtų būti tolesnių tyrimų objektas.

LITERATŪROS ŠALTINIAI

1. Babafemi, A.J., Boshoff, W.P., (2017). Pull-out response of macro synthetic fibre from concrete matrix: Effect of loading rate and embedment length, *Construction and Building Materials*, 135, (590-599).
2. Won, J.P., Lim, D., Park, C., (2006). Bond behaviour and flexural performance of structural synthetic fibre-reinforced concrete, *Mag. Concr. Res.*, 58, (401-410).
3. Vrijdaghs, R., Prisco, M., Vandewalle, L., (2017). Short-term and creep pull-out behavior of polypropylene macrofibers at varying embedded lengths and angles from a concrete matrix, *Construction and Building Materials*, 147, (858-864).
4. Zheng, Z., Feldman, D., (1995). Synthetic fibre-reinforced concrete, *Progress in Polymer Science*, 20, (185-210).
5. Alberti, M.G., Enfedaque, A., Gálvez, J.C., Ferreras, A., (2016). Pull-out behaviour and interface critical parameters of polyolefin fibres embedded in mortar and self-compacting concrete matrixes, *Construction and Building Materials*, 112, (607-622).
6. Macanovskis, A., Krasnikovs, A., Kononova, O., Lukasenoks, A., (2017). Mechanical Behavior of Polymeric Synthetic Fiber in the Concrete, *Procedia Engineering*, 172, Pages (673-680).
7. Chaallal, O., Benmokrane, B., (1993). Pull-out and bond of glass-fiber rods embedded in concretes and grout *J. Mater. Struct.*, 26, (167-175).
8. Naaman, A.E., Namur, G.G., Alwan, J.M., Najm, H., (1991). Fiber pull-out and slip. I: analytical study, *J. Struct. Eng.*, 117, (2769-2790).
9. Naaman, A.E., Najm, H., (1991). Bond-slip mechanisms of steel fibers in concrete, *ACI Mater. J.*, 88, (135-145).
10. Armelin, H.S., Banthia, N., (1997). Predicting the flexural postcracking performance of steel fiber reinforced concrete from the pull-out of single fibers, *ACI Mater. J.*, 94, (18-31).
11. Cunha, V., Barros, J., Sena-Cruz, J., (2010). Pull-out behavior of steel fibers in selfcompacting concrete, *J. Mater. Civ. Eng.*, 22, (1-9).
12. Won, J.P., Park, C.G., Lee, S.W., Jang, C.I., Kim, H.Y., (2009). Performance of synthetic macro fibres in reinforced concrete for tunnel linings, *Mag. Concr. Res.*, 61, (165-172).
13. Kobayashi, K., Cho, R., (1976) Mechanics of concrete with randomly oriented discontinuous fibres, *2nd International Conference on Mechanical Behaviour of Materials*, (1938-1942).
14. Yin, S., Tuladhar, R., Riella, J., Chung, D., Collister, T., Combe, M., Sivakugan, N., (2016). Comparative evaluation of virgin and recycled polypropylene fibre reinforced concrete, *Constr. Build. Mater.*, 114, (134-141).
15. Prisco, M., Plizzari, G., Vandewalle, L., (2009). Fibre reinforced concrete: new design perspectives, *Mater. Struct.*, 42, (1261-1281).
16. Bentur, A., Mindess, S., (1990) Fibre Reinforced Cementitious Composites, *Elsevier Science Publishers LTD*.
17. Breitenbücher, R., Meschke, G., Song, F., Zhan, Y., (2014). Experimental, analytical and numerical analysis of the pullout behaviour of steel fibres considering different fibre types, inclinations and concrete strengths, *Struct. Concr.*, 15, (126-135).

18. Fu, X., Lu, W., Chung, D.D.L., (1996). Improving the bond strength between carbon fiber and cement by fiber surface treatment and polymer addition to cement mix, *Cem. Concr. Res.*, 26, (1007–1012).
19. Banthia, N., (1990). A study of some factors affecting the fibermatrix bond in steel fiber reinforced concrete, *Can. J. Civ. Eng.*, 17, (610–620).
20. Zhao, G., Verstrynge, E., di Prisco, M., Vandewalle, L., (2012). Investigation on Single Fiber Pullout and Interfacial Debonding Mechanisms with Acoustic Emission Techniques, *RILEM Publications S.A.R.L.*, (111–112).
21. Li, V.C., Wang, Y., Backer, S., (1990). Effect of inclining angle, bundling and surface treatment on synthetic fibre pull-out from a cement matrix, *Composites*, 21, (132–140).
22. Singh, S., Shukla, A., Brown, R., (2004). Pullout behavior of polypropylene fibers from cementitious matrix, *Cem. Concr. Res.*, 34, (1919–1925).
23. European Committee for Standardization, (2006). En 14889-2 fibres for concrete. polymer fibres. definitions, specifications and conformity, (30).
24. Chan, Y.W., Li, V.C., (1997) Age effect on the characteristics of fibre/cement interfacial properties, *J. Mater. Sci.*, 32, (5287–5292).
25. Cunha, V.M.C.F., Barros, J.A.O., Sena Cruz, J.M., (2010) Pullout Behavior of Steel Fibers in Self-Compacting Concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 22, (1-9).
26. Habel, K., (2004). Structural behaviour of elements combining Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concretes and Reinforced Concrete, *Swiss Federal Institute of Technology Lausanne*.
27. Habel, K., Denarié, E., Brühwiler, E., Time dependent behavior of elements combining Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concretes and Reinforced Concrete. *Mater Struct*.
28. Pakravan, H.R., Jamshidi, M., Latifi, M., (2013). Polymeric fibers pull-out behavior and microstructure as cementitious composites reinforcement, *J. Text. Inst.*, 104, (1056–1064).
29. Di Maida, P., Radi, E., Sciancalepore, C., Bondioli, F., (2015). Pullout behavior of polypropylene macro-synthetic fibers treated with nano-silica, *Construction and Building Materials*, 82, (39-44).
30. Tran, T.K., Kim, D.J., (2014). High strain rate effects on direct tensile behavior of high performance fiber reinforced cementitious composites, *Cem. Concr. Compos.*, 45, (186–200).
31. Cunha, V.M.C.F., Barros, J.A.O., Sena Cruz, J.M., (2010) Pullout behavior of steel fibers in self-compacting concrete, *J Mater Civil Eng*, 22, (1-9).
32. Kaklauskas, G., Bačinskas, D., Gribniak, V., ir kt. (2012) Kompozitais armuotos betoninės konstrukcijos, (301).
33. Babafemi, A. J., Boshoff, W. P., (2014) Tensile creep of macro-synthetic fibre reinforced concrete (MSFRC) under uni-axial tensile loading. *Department of Civil Engineering. Stellenbisch University*, (8).
34. Wang, D., Shi, C., Farzadnia, N., Shi, Z., Jia, H., (2018). A review on effects of limestone powder on the properties of concrete, *Construction and building materials*, 192, (153-166).
35. Kumar Mehta, P., Monteiro, P. J. M., (2001) CONCRETE. Microstructure, Properties and Materials, (239).
36. Li, C., Jiang, L., Xu, N., Jiang, S., (2018) Pore structure and permeability of concrete with high volume of limestone powder addition, (9).

PRIEDAI

A PRIEDAS

Magistrinio darbo tema paskelbtas mokslinis straipsnis

EXPERIMENTAL ANALYSIS OF MECHANICAL ASPECTS OF BOND BEHAVIOR OF SYNTHETIC MACRO-FIBERS IN CONCRETE

Aleksandr Sokolov¹, Viktor Gribniak^{1*}, Arvydas Rimkus¹, David Hui², Mantas Garnevičius¹, and Linas Plioplys¹

¹ Laboratory of Innovative Building Structures, Vilnius Gediminas Technical University, Vilnius, Lithuania

² Department of Mechanical Engineering, University of New Orleans, New Orleans, USA

* Viktor.Gribniak@vgtu.lt

Introduction

An increased attention worldwide is related with application of different kinds of fibers for improving physical properties of concrete. Numerous of studies are dedicated for analysis of mechanical characteristics of fibers in concrete. The mechanical efficiency is closely related with ability of fibers resisting tensile stresses in cracked concrete that is a consequence of the stress transferring mechanism secured by the fibers crossing the crack [1]. Different kinds of pull-out tests are often used for quantification of bond mechanisms responsible for the stress transferring. However, it is not a trivial task, since the different loading positions of the fibers must be included in the test consideration. Test protocols of synthetic fibers might be even more complicate the due to variation of material properties and reduced resistance of fibers to the gripping stresses [2, 3]. Thus, the existed test results are remaining insufficient for development of reliable models.

This study is dedicated for analysis of the bond behavior of synthetic macro-fibers. Two different types of 40 mm polypropylene fiber existing at the market are used. Different embedment length l_e (10 mm and 20 mm) is considered. Figure 1 shows the fiber examples.

Test specimens and setup

The fibers were pulled-out using 100 mm cubes. Eight cubes were produced for each fiber type and embedment length. In total, 32 cubes were prepared. Three fibers (one on the top and two on the opposite sides) were inserted in each cube (Fig. 2). To assure a correct position, the fibers were marked as shown in Fig. 1. The “side” fibers were positioned and fixed using expanded polystyrene, while the “top” fiber in the specimen was placed manually. All specimens were made in one batch. Proportions of m³ of concrete are following: 300 kg of cement CEM I 42.5 R,

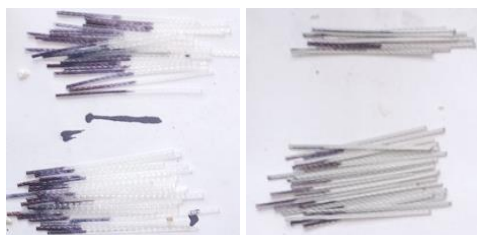


Figure 1. Fiber examples highlighting the embedment length: Type A (left) and Type B (right)

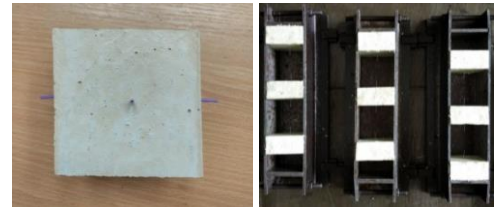


Figure 2. Test specimens: a typical cube with fibers (left) and forms for production of the specimens (right)

165 l of water, 100 kg of limestone powder, 787 kg of 0/4 mm sand, and 988 kg of 4/16 mm crushed aggregates; 0.75% (by the cement weight) of the superplasticizer *Mapei Dynamon XTend*. Compressive strength of the 100 mm concrete cubes at 28 day and final 153 day was equal to 39.14 MPa and 46.16 MPa, respectively.

After the curing, the actual length of the unbonded part of a fiber was measured. A plastic sleeve was used for protecting the unbonded part as shown in Fig. 3; the fiber was fixed using steel clamps designed for preventing localization of stresses induced by the gripping system.

The tests were carried out using a 70 kN capacity electromechanical machine. The deformation-control path with the 0.8 mm/min velocity was applied. The load was fixed using a load-cell with 2 kN capacity. As can be observed in Fig. 3, linear variable differential transformers (LVDT) were used for monitoring vertical displacements of the grips. Additional LVDT was used for monitoring vertical displacements of the cube. All devices (LVDT and the load-cell) were connected to personal computer through signal processing equipment ALMEMO 2890-9. The readings were taken every second.

Results and discussion

Three failure types were identified: (I) extrusion (pull-out) of a fiber from the concrete (nominal outcome); (II) failure of a fiber (uneven outcome); (III) a damage before



Figure 3. Test preparation: fiber protected with a plastic sleeve (left), steel clamps (middle), testing machine (right)

the test (uneven outcome). The latter outcome was mainly related with insufficient bond-strength of the “top” fibers. In all cases, bond characteristics of the fibers installed to the top surface of cubes were noticeably worse than the corresponding properties of the fibers positioned at the side surfaces. The further analysis, therefore, is based only on the test outcomes of the “side” fibers.

Figures 4 and 5 show the load-displacement diagrams of the alternative fibers. A noticeable scatter is characteristic of these diagrams. Variations of the embedment length could be identified as a cause of the scatter though the bond defects could be also mentioned in this regard. A low flexural stiffness of synthetic fibers (concerning steel as the reference) could be mentioned as a cause of the latter defects. Analysis of the diagrams presented in Figs. 4 and 5 evidences noticeable differences in tensile resistance of the considered fibers. The increase of the length l_e (from 1 cm to 2 cm) has also different effect on the bond behavior of the alternative fibers.

Table 1 summarizes the bond properties. It specifies the maximum reaction P_{max} and the corresponding displacement u_P ; the total deformation energy δ (evaluated as area beneath the load-displacement curve) and the corresponding displacement u_δ . Table 1 includes only results of the fibers properly placed in the concrete, i.e. normal to the concrete surface, with minimal discrepancies of the length l_e from the target value, and without evident bond defects. Analysis of the results reveals that the loading capacity (the displacement energy δ) of the Type A fiber is almost twice of the Type B fiber. The average energy δ released for the length $l_e = 1$ cm is equal to 1085.4 Nmm and 559.2 Nmm; of the length $l_e = 2$ cm, it is equal to 2909.6 Nmm and 1469.7 Nmm, respectively. A similar tendency is characteristic for the ultimate load P_{max} .

Concluding comment

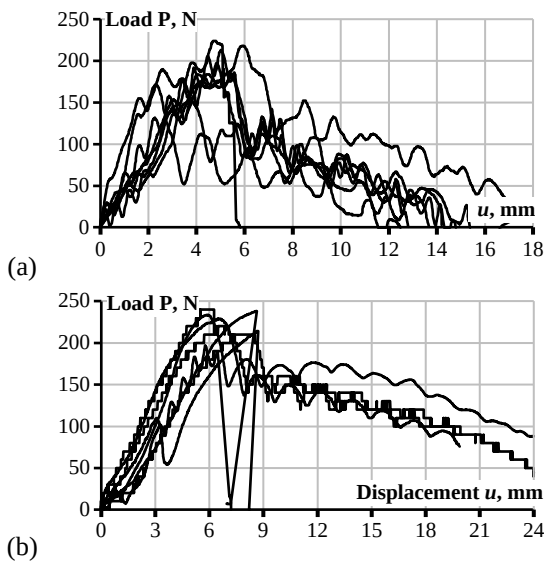


Figure 4. Load-displacement diagrams of the Type A fibers of different embedment length l_e : $l_e = 1$ cm (a) $l_e = 2$ cm (b)

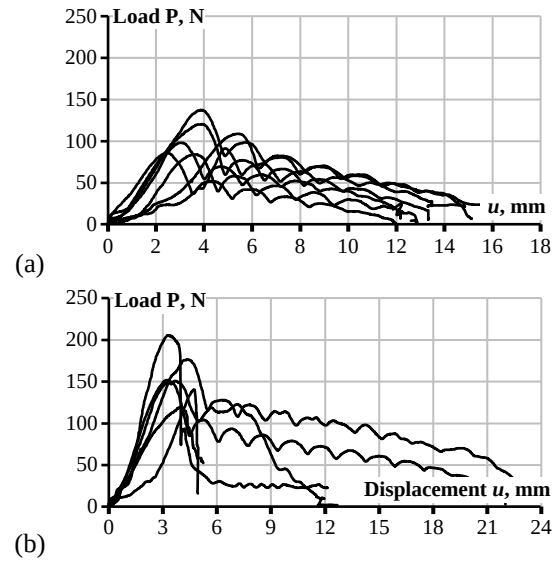


Figure 5. Load-displacement diagrams of the Type B fibers of different length l_e : $l_e = 1$ cm (a) $l_e = 2$ cm (b)

Table 1. Summary of the pull-out tests results

Notation*	P_{max} , N	u_P , mm	δ , Nmm	u_δ , mm
A1.1-1	175	4.93	928.3	10
A1.1-2	197	4.89	1039.5	10
A1.3-1	196	5.46	1175.3	10
A1.3-2	224	4.81	330.8	5.55
A1.4-1	212	5.04	1153.8	10
A1.4-2	193	2.68	1130.2	10
A2.1-1	197	5.79	656.6	7.21
A2.3-1	230	6.65	2671.2	20
A2.4-1	260	8.54	3440.5	20
A2.5-1	240	6.27	886.2	6.30
A2.5-2	220	7.08	2663.5	20
A2.6-1	230	5.96	2863.1	20
A2.6-2	241	8.62	926.7	8.64
B1.3-1	139	3.85	782.1	10
B1.3-2	86	2.46	409.1	10
B1.4-1	109	5.45	578.8	10
B1.4-2	98	3.03	535.3	10
B1.5-1	120	3.91	652.9	10
B1.5-2	71	3.17	644.7	10
B1.6-1	91	4.90	455.6	10
B1.6-2	84	3.69	415.0	10
B2.1-1	119	4.01	372.8	5.25
B2.1-2	141	4.74	267.3	4.95
B2.2-1	152	3.30	965.7	20
B2.2-2	150	3.43	1439.8	20
B2.3-1	178	4.43	2003.6	20

*Notations: the letter designates the fiber type; the first number indicates the embedment length (in cm); the remaining two numbers describe the cube number and the fiber number.

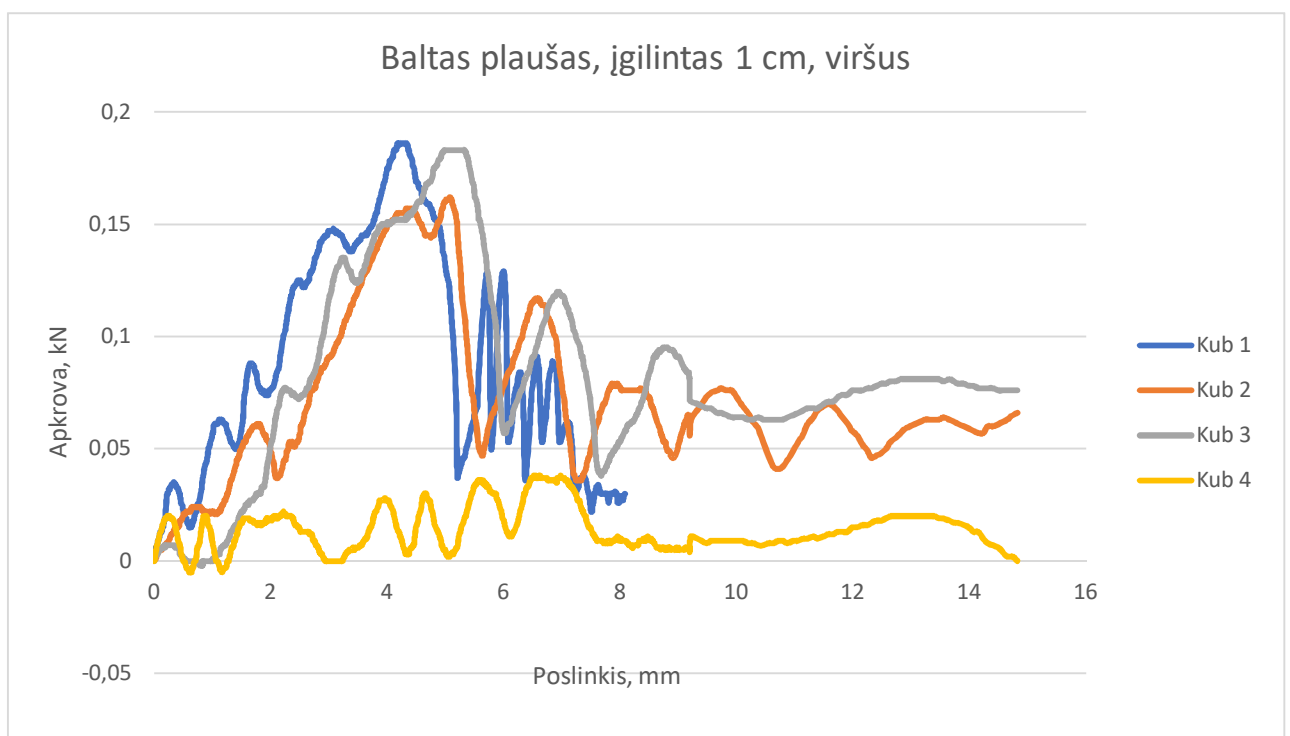
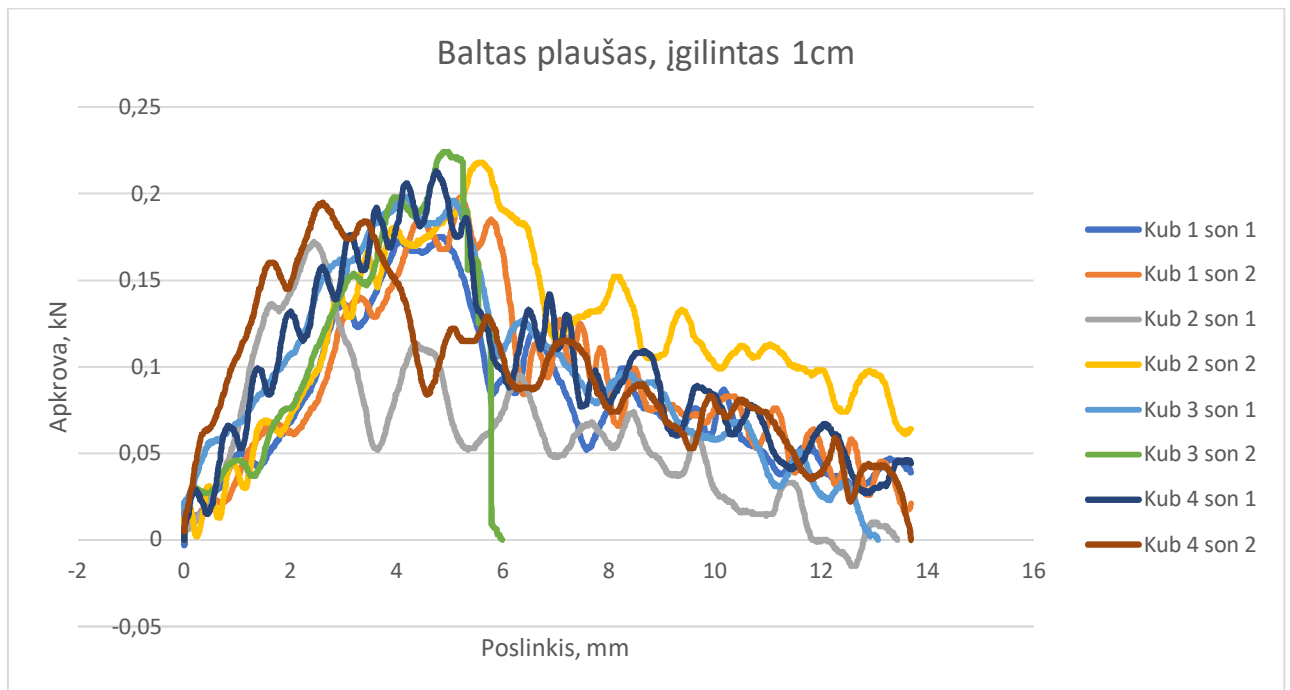
The observed results should be considered in the context of the structural behavior when the number of the fibers crossing a crack could represent the fiber efficiency. In this context, a 100 g of product approximately contains 6,900 of the Type B fibers and only 3,840 of the Type A fibers. However, the beneficial mechanical properties of the latter fiber identified in this study might be important for resisting more intensive tensile stresses than the Type B counterpart resists. It should be the topic for further research.

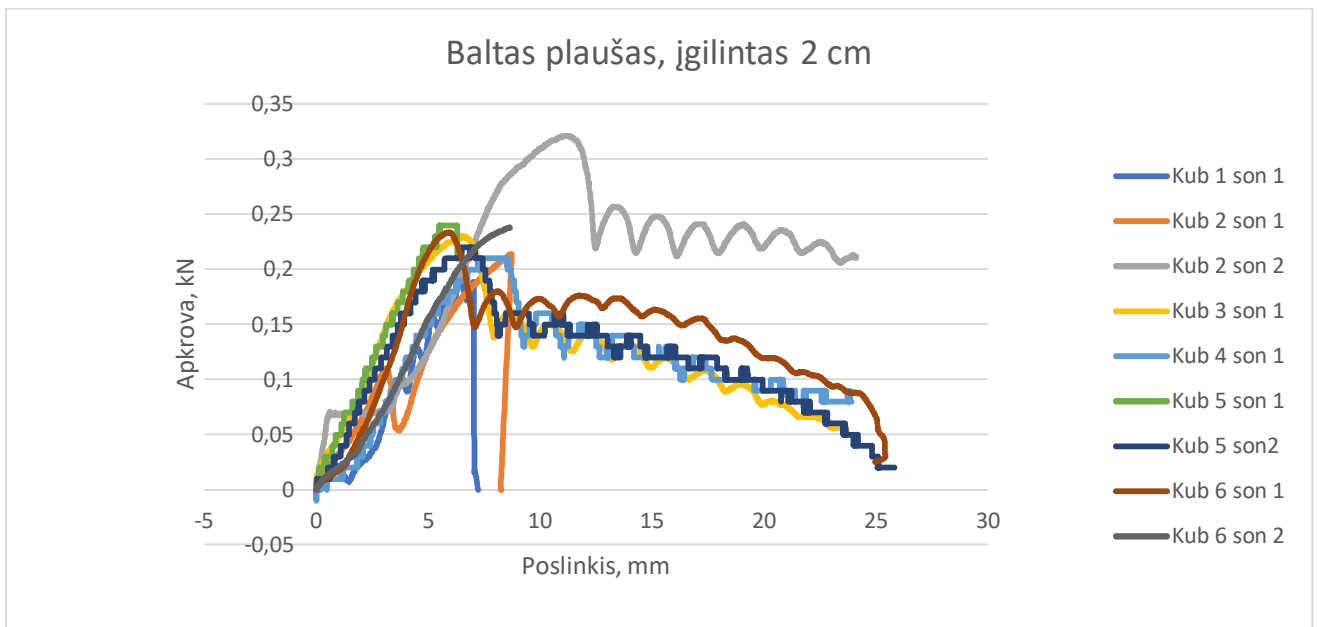
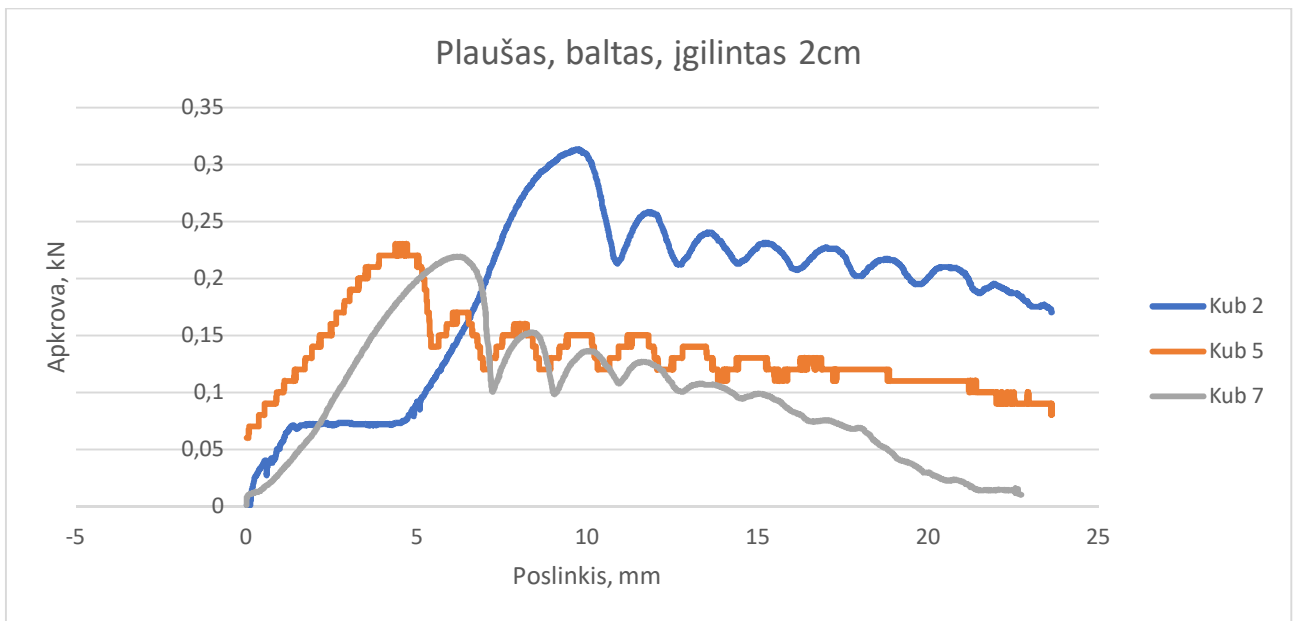
References

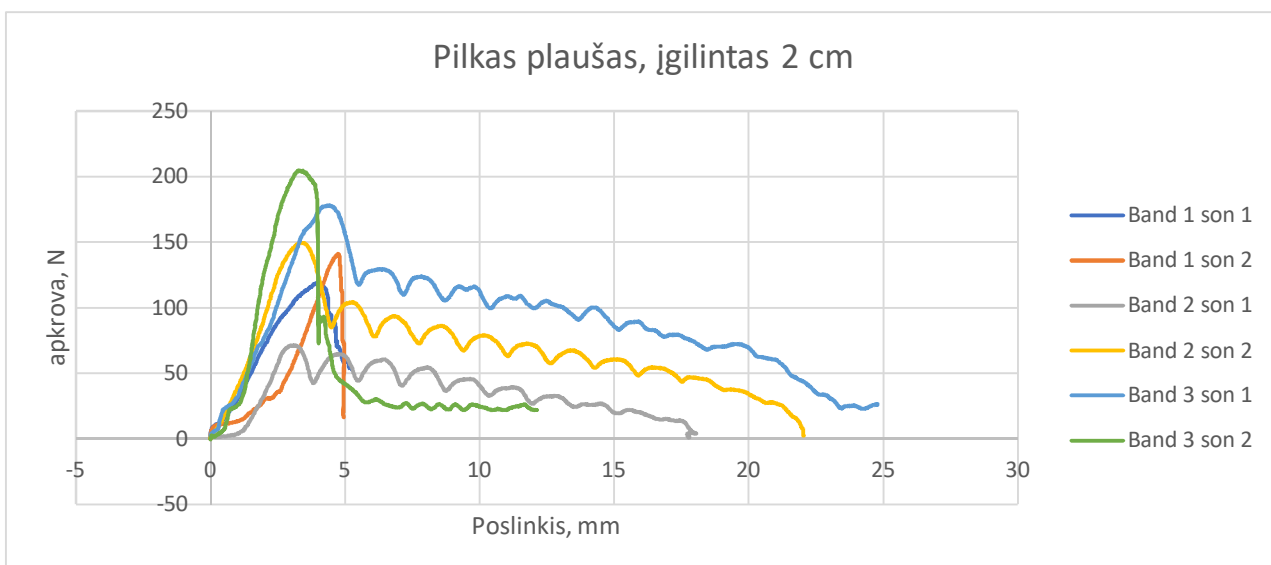
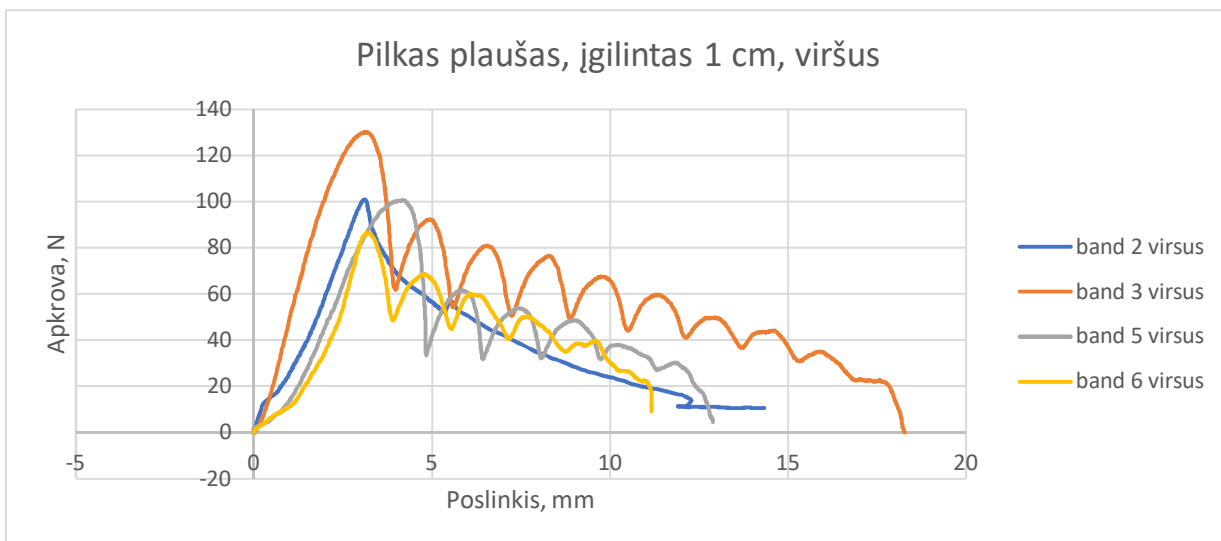
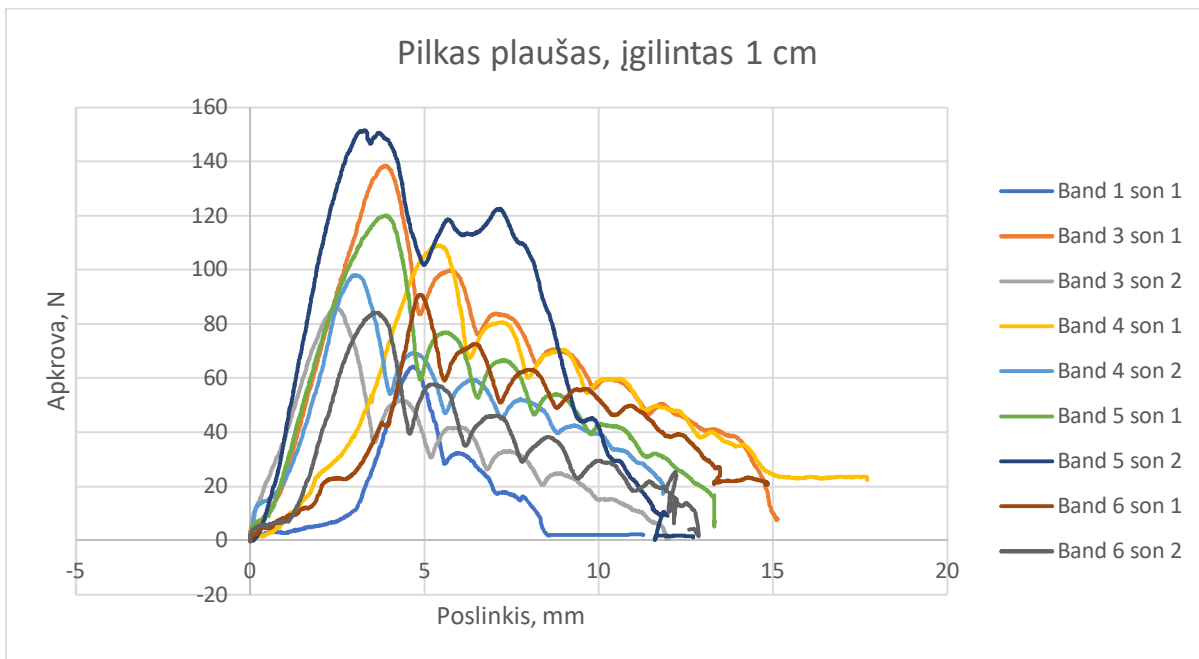
- [1] Meskenas A, Gribniak V, Kaklauskas G, Sokolov A, Gudonis E, Rimkus A. Experimental investigation of cracking behaviour of concrete beams reinforced with steel fibres produced in Lithuania. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* 2017;12(2):82-87.
- [2] Babafemi AJ, Boshoff WP. Pull-out response of macro synthetic fibre from concrete matrix: Effect of loading rate and embedment length. *Construction and Building Materials* 2017; 135:590-599.
- [3] Vrijdaghs R, di Prisco M, Vandewalle L. Short-term and creep pull-out behavior of polypropylene macrofibers at varying embedded lengths and angles from a concrete matrix. *Construction and Building Materials* 2017;147:858-864.

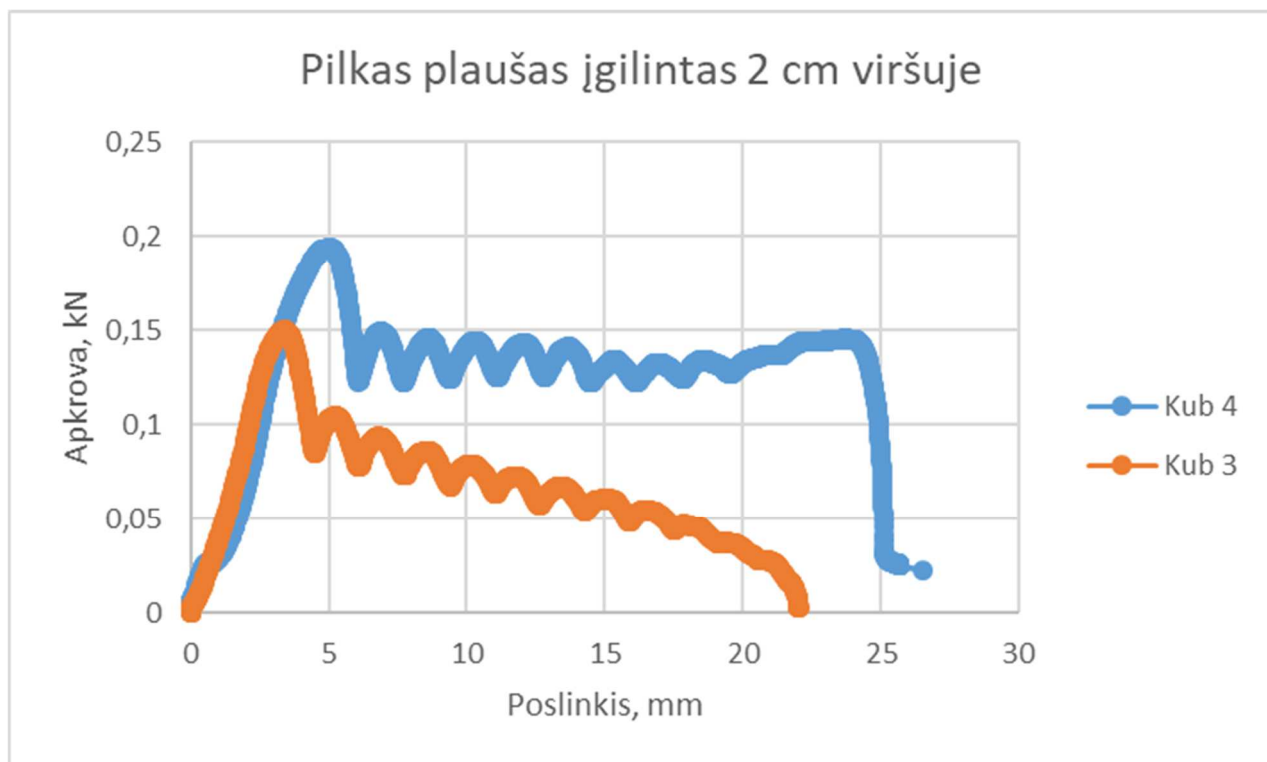
B PRIEDAS

Plaušų sukibties savybių nustatymo bandymų ištraukimo jėgos ir poslinkio grafikai:









C PRIEDAS

Sintetinių makroplaušų sertifikatai



Technical data sheet

Product description

Polymer	Density	Melting Point	Ignition temperature
PP	0,905 kg/dm³	165 °C	> 360°C

Properties

Physical Properties	Standard	Performance	Tolerance
Equivalent Diameter	EN 14889-2:2006	0,9 mm	+/-0,05 mm
Length	EN 14889-2:2006	45 mm	+/-2 mm
Aspect ratio	EN 14889-2:2006	50	+/- 5
Number of fibres per kg		38.600	
Mechanical Properties	Standard	Performance	Tolerance
Elastic Modulus	EN 14889-2:2006	3350 MPa	-335 MPa
Tensile strength	EN 14889-2:2006	465 MPa	-35 MPa
Effect on consistency of concrete	Standard	Performance	Dosage
Vebe Time	EN 14889-2:2006	2 s	5 kg
Control concrete	EN 14889-2:2006	1 s	
Effect on strength of concrete	Standard	Performance	Dosage
Strength @CMOD - 0,5mm	EN 14889-2:2006	1,5 N/mm²	5 kg
Strength @CMOD - 3,5mm	EN 14889-2:2006	1,7 N/mm²	
CE regulation	Standard	Performance	
Class	EN 14889-2:2006	II	

Advantages

The product will enhance the toughness of the concrete and alleviate the need for steel mesh or steel fibres when used with the appropriate design and at the recommended dosage.

Mixing instructions

When adding fibres into a cementitious product careful attention must be taken in the batching and mixing procedure in order to achieve optimum results. If you need further details on the recommended mixing instructions, please consult a member of the ADFIL team.

Storage

Fibres must be stored on a clean surface in dry conditions, undercover and away from the possibility of damage.



Low & Bonar nv
Industriestraat 39, 9240 Zele, Belgium
T: +44 1482 863777 /
info@adfil.com / www.adfil.com

Durus® EasyFinish

Macro Monofilament



Technical data sheet

Product description

Polymer	Density	Melting Point	Ignition temperature
Modified PP	0,922 kg/dm³	165 °C	> 360°C

Properties

Physical Properties	Standard	Performance	Tolerance
Equivalent Diameter	EN 14889-2:2006	0,7 mm	+/-0,03 mm
Length	EN 14889-2:2006	40 mm	+/-2 mm
Aspect ratio	EN 14889-2:2006	57	+/- 7
Number of fibres per kg		70.423	

Mechanical Properties	Standard	Performance	Tolerance
Elastic Modulus	EN 14889-2:2006	6000 MPa	-600 MPa
Tensile strength	EN 14889-2:2006	500 MPa	-37,5 MPa

Effect on consistency of concrete	Standard	Performance	Dosage
Vebe Time	EN 14889-2:2006	10 s	4 kg
Control concrete	EN 14889-2:2006	8 s	

Effect on strength of concrete	Standard	Performance	Dosage
Strength @CMOD - 0,5mm	EN 14889-2:2006	1,8 N/mm²	4 kg
Strength @CMOD - 3,5mm	EN 14889-2:2006	2 N/mm²	
Plastic Shrinkage reduction	ASTM C1579-13	100 %	4 kg

CE regulation	Standard	Performance
Class	EN 14889-2:2006	II

Advantages

The product will enhance the toughness of the concrete and alleviate the need for steel mesh or steel fibres when used with the appropriate design and at the recommended dosage.

Mixing instructions

When adding fibres into a cementitious product careful attention must be taken in the batching and mixing procedure in order to achieve optimum results. If you need further details on the recommended mixing instructions, please consult a member of the ADFIL team.

Storage

Fibres must be stored on a clean surface in dry conditions, undercover and away from the possibility of damage.