VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Rimvydas MOCEIKIS

DISPERSIŠKAI ARMUOTO APDAILINIO
BETONO TECHNOLOGINIŲ IR
EKSPLOATACINIŲ SAVYBIŲ TYRIMAI

DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,
MEDŽIAGŲ INŽINERIJA (T 008)

Vilnius, 2021

Disertacija rengta 2016–2021 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.

Vadovas

doc. dr. Asta KIČAITĖ (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, medžiagų inžinerija – T 008).

Vilniaus Gedimino technikos universiteto Medžiagų inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo taryba:

Pirmininkas

dr. Valentin ANTONOVIČ (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, medžiagų inžinerija – T 008).

Nariai:

prof. dr. Mindaugas DAUKŠYS (Kauno technologijos universitetas, statybos inžinerija – T 002),

doc. dr. Karel DVORAK (Brno technologijos universitetas, Čekija, medžiagų inžinerija – T 008),

dr. Modestas KLIGYS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, medžiagų inžinerija – T 008),

prof. dr. Juozas VALIVONIS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, statybos inžinerija – T 002).

Disertacija bus ginama viešame Medžiagų inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo tarybos posėdyje **2021 m. liepos 9 d. 9 val.** Vilniaus Gedimino technikos universiteto senato posėdžių salėje.

Adresas: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lietuva.

Tel.: (8 5) 274 4956; faksas (8 5) 270 0112; el. paštas doktor@vilniustech.lt

Pranešimai apie numatomą ginti disertaciją išsiųsti 2021 m. birželio 8 d.

Disertaciją galima peržiūrėti Vilniaus Gedimino Technikos universiteto talpykloje <http://dspace.vgtu.lt> ir Vilniaus Gedimino technikos universiteto bibliotekoje (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lietuva).

Vilniaus Gedimino technikos universiteto 2021-032-M mokslo literatūros knyga

doi: 10.20334/2021-032-M

© Vilniaus Gedimino technikos universitetas, 2021

© Rimvydas Moceikis, 2021

rimvydas.moceikis@vilniustech.lt

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Rimvydas MOCEIKIS

**INVESTIGATION OF TECHNOLOGICAL
AND PERFORMANCE CHARACTERISTICS
OF DECORATIVE CONCRETE WITH
DISPERSE REINFORCEMENT**

DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,
MATERIALS ENGINEERING (T 008)

Vilnius, 2021

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2016–2021.

Supervisor

Assoc. Prof. Dr Asta KIČAITĖ (Vilnius Gediminas Technical University, Materials Engineering – T 008).

The Dissertation Defence Council of Scientific Field of Materials Engineering of Vilnius Gediminas Technical University:

Chairman

Dr Valentin ANTONOVIČ (Vilnius Gediminas Technical University, Materials Engineering – T 008).

Members:

Prof. Dr Mindaugas DAUKŠYS (Kaunas University of Technology, Civil Engineering – T 002),

Assoc. Prof. Dr Karel DVORAK (Brno University of Technology, Czech Republic, Materials Engineering –T 008),

Dr Modestas KLIGYS (Vilnius Gediminas Technical University, Materials Engineering – T 008),

Prof. Dr Juozas VALIVONIS (Vilnius Gediminas Technical University, Civil Engineering – T 002).

The dissertation will be defended at the public meeting of the Dissertation Defence Council of Materials Engineering in the Senate Hall of Vilnius Gediminas Technical University at **9 a. m. on 9 July 2021**.

Address: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lithuania.

Tel.: +370 5 274 4956; fax +370 5 270 0112; e-mail: doktor@vilniustech.lt

A notification on the intend defending of the dissertation was send on 8 June 2021. A copy of the doctoral dissertation is available for review at Vilnius Gediminas Technical University repository <http://dspace.vgtu.lt> and at the Library of Vilnius Gediminas Technical University (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lithuania).

Reziumė

Disertacijoje nagrinėjamos dispersiškai armuotų smulkiagrūdžių apdailinių betonų (DASAB) su skirtingais užpildais (kvarciniu smėliu, granito atsijomis bei vietinių karjerų įprastiniu smėliu), plaušais (stiklo, bazalto, anglies, polivinilo alkoholio) bei mineraliniais priedais (SiO_2 mikrodulkėmis (SD) ir metakaolinu (MK)) savybės. Šio darbo tikslas yra sukurti dispersiškai armuotą betoną surenkamųjų sieninių elementų gamybai ir ištirti plaušų, užpildų bei aktyvių mineralinių priedų poveikį mišinių konsistencijai bei segregacijai ir betono apdailinio paviršiaus eksploatacinėms savybėms.

Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai, bendrosios išvados, naudotos literatūros ir autoriaus publikacijų disertacijos tema sąrašai, santrauka anglų kalba bei septyni priedai.

Pirmasis skyrius skirtas literatūros analizei. Jame pateikiama informacija apie DASAB gamybos technologijas bei jų raidą, skirtingų plaušų įtaką betono mišinio ir sukietėjusio betono fizikinėms ir mechaninėms savybėms. Taip pat analizuojamas šių kompozitų eksploatacinių savybių pastovumas, įvairių įmaišų bei priedų poveikis ilgaamžiškumui. Skyriaus pabaigoje formuluojamos išvados ir tikslinami disertacijos uždaviniai.

Antrajame skyriuje aprašytos tiriamajame darbe panaudotos medžiagos bei jų savybės. Pateiktos tyrinėtų betono mišinių sudėtys, aprašytas pasirinktas betono maišymo procesas ir bandinių formavimas. Aptariami tyrimo metodai bei naudota laboratorinė įranga.

Trečiajame skyriuje aprašyti DASAB kompozito technologinių, mechaninių savybių bei ilgaamžiškumo tyrimai. Pateikiami duomenys apie plaušų bei trupintų uolienu užpildų poveikį betono mišinio konsistencijai ir segregacijai, taip pat atsparumo šalčiui tyrimų duomenys su cementinę matricą modifikuojančiais MK ir SD priedais. Panaudojus tyrimų rezultatus, sukurtas dispersiškai armuotas betono kompozitas, kurio lenkimo stipris – 10,1 MPa, lenkimo deformacijų energija – 1149 N/m ir kuris gali būti panaudotas fasadų konstrukcijoms, eksploatuojamoms ne mažiau kaip 20 metų agresyviomis Baltijos regiono klimato sąlygomis, kurioms būdingas užšaldymo ir atšildymo ciklų poveikis.

Disertacijos tema atspausdinti 7 moksliniai straipsniai: trys – recenzuojamuose mokslo žurnaluose, du – recenzuojamoje tarptautinių konferencijų medžiagoje įtrauktoje į *Clarivate Analytics Web of Science* ir du kitų tarptautinių konferencijų duomenų bazių leidiniuose. Disertacijos tema pristatyti septyni pranešimai Lietuvos ir kitų šalių mokslinėse konferencijose.

Abstract

The dissertation deals with properties of dispersive reinforced fine-grained finishing concretes (DASAB) with different aggregates (quartz sand, crushed granite, and conventional quarry sand), fibers (glass, basalt, carbon, polyvinyl alcohol) and mineral additives (SiO_2 micro fume and metakaolin (MK)). The aim of this work is to develop dispersive reinforced concrete for production of prefabricated wall elements and to investigate the effect of fibers, aggregates and active mineral additives on the consistency and segregation of mixtures and the durability of the concrete surface.

The dissertation consists of an introduction, three chapters, general conclusions, used literature and lists of the author's publications on the topic of the dissertation, a summary in English and seven appendices.

The first chapter is devoted to the analysis of the literature. It provides information on DASAB production technologies and their development, the influence of different fibers on the physical and mechanical properties of concrete mix and hardened concrete. The durability mechanisms of these composites and the effect of various mineral additives on durability are also analyzed. At the end of the chapter, conclusions are formulated and the tasks of the dissertation are specified.

The second chapter describes the materials used in the research and their properties. The compositions of the investigated concrete mixtures are presented, the selected concrete mixing process and sample formation are described. Research methods and used laboratory equipment are discussed.

The third chapter describes the research of technological, mechanical properties and durability of DASAB composite. Data on the effect of fiber and crushed rock aggregates on the workability and segregation of concrete mix, as well as data on frost resistance studies with cement matrix-modifying MK and SD additives are presented. Using the research results, a dispersive reinforced concrete composite with a flexural strength of 10.1 MPa and a flexural strain energy of 1149 N/m was developed, which can be used for facade structures operated for at least 20 years in aggressive climatic conditions of the Baltic region, which are characterized by the effects of freezing and thawing cycles.

7 scientific articles were published on the topic of the dissertation: three in the peer-reviewed scientific journals, two in the publications of the Clarivate Analytics Web of Science database in Conference Proceedings, and two in the other conference proceedings. Seven papers on the topic of the dissertation were presented at scientific conferences in Lithuania and other countries.

Žymėjimai

Simboliai

A_0 – bandymų mašinos atliekamas darbas, Nm;
 A – deformacijas sukeliančios jėgos atliktas darbas, Nm;
 A_{lig} – plyšio plotas (bandinio skerspjūvio plotas), mm²;
 D_1 – didžiausias pasklidusio mišinio skersmuo, cm;
 D_2 – vidinis pasklidusio mišinio skersmuo, cm;
 d_1 – užpildo dalelės ilgoji kraštinė, mm;
 d_2 – užpildo dalelės trumpoji kraštinė, mm;
 d_{max} – užpildo dalelių didžiausias matmuo, mm;
 F – deformacijas sukelianti jėga, N;
 G_f – lenkimo deformacijų energija, N/m;
 h – betono mišinio suslūgimas (Sutardo viskozimetro aukštis), cm;
 I – užpildo pailgumo indeksas;
 S – bandinio įlinkis (poslinkis);
 W – konsistencijos rodiklis, cm;
 x – užpildo kiekis, %.

Santrumpos

AP – anglies plaušas;

AR – stiklas – šarmams atsparus stiklo plaušas;
BP – bazalto plaušas;
CSH – kalcio hidrosilikatai;
DASAB – dispersiškai armuotas smulkiagrūdis apdailinis betonas;
FCM – virtualaus plyšio modelis;
MK – metakaolinas;
PVA – polivinilo alkoholio polimerų plaušas;
SD – SiO₂ mikrodulkės;
S.I.C. – plaušo cementinėje matricoje bandymo metodas;
SPAB – stiklo plaušu armuotas smulkiagrūdis apdailinis betonas;
SP – stiklo plaušas;
V/C – vandens ir cemento masių santykis.

Sąvokos

Apdailinis betonas – tai betono paviršius su dekoratyvine funkcija, kuriam nėra atliekama jokia papildoma apdaila.

Plaušu armuotas smulkiagrūdis betonas – tai kompozitas, kurį sudaro cementinė matrica su smulkiu užpildu (iki 2 mm frakcijos) bei armuojantis plaušas (stiklo, bazalto, anglies arba PVA polimerų).

Plaušas – tai trumpi elementai (fibros), kurie gaunami automatizuotai karpant ištisinį pluoštą (stiklo, bazalto ar anglies).

Dispersinis armavimas – tai armavimo būdas, kai į betono mišinį yra įmaišomi trumpi armuojantys elementai (plaušai, fibros).

Intensyvaus maišymo metodas – tai betono mišinio ruošimo būdas, kai naudojamas spiralinės formos maišytuvas, besisukantis aplink savo ašį 1000 aps./min greičiu.

Takus betono mišinys – tai mišinys, kuriam nereikalingas išorinis ar vidinis vibravimas, kad pasklistų formoje.

Standus betono mišinys – tai netakus betono mišinys, kuris sklinda tik intensyviai tankiniant.

Mišinio konsistencija – tai betono mišinio technologinis rodiklis, apibūdinantis mišinio tinkamumą tam tikram gamybos (formavimo) būdai, kuris nusakomas dviem parametrais – mišinio pasklidimo ir suslūgimo.

Mišinio pasklidimas – tai betono mišinio technologinis parametras, apibūdinamas kaip didžiausias pasklidusio mišinio skersmuo.

Mišinio suslūgimas – tai betono mišinio technologinis parametras, apibūdinamas kaip aukščių skirtumas tarp pasklidusio mišinio paviršiaus ir bandymų cilindro (Sutardo viskozimetro) aukščio.

Mišinio segregacija – dalelių išsiskirstymas mišinyje dėl jų dydžio, tankio, formos ar kitų skirtingų savybių.

Segregacijos rodiklis – tai betono mišinio segregacijos lygį įvertinantis dydis.

Užpildo dalelių pailgumo indeksas – užpildo dalelės formos parametras, ilgesnės kraštinės santykis su trumpesniąja.

Plastinės lenkimo deformacijos – deformacijos, kurios vyksta toliau atsivėrus plyšiams ir pasiekus maksimalų stiprumą.

Liekamasis stipris – bandinio lenkimo stipris prie labai didelių deformacijų (arti suirimo).

Lenkimo deformacijų energija – energijos kiekis, reikalingas pilnai suardyti bandinį.

Cikliškas užšaldymas ir atšildymas – betono struktūrą ardantis procesas, kurio metu įmirkęs bandinys yra cikliškai užšaldomas ir atšildomas kintant temperatūrai nuo +20 °C iki –20 °C.

Paviršiniai masės nuostoliai – tai atskilę betono paviršiaus struktūros elementai dėl užšaldymo ir atšildymo ciklų poveikio.

Plaušo – matricos kontaktinė zona – tai zona tarp plaušo paviršiaus ir cementinio akmens, kuri užtikrina dviejų skirtingų medžiagų tarpusavio sukibimą.

Statinis nuovargis – laipsniškas SiO₂ ryšių trūkinėjimas ties stiklo plaušelio paviršiuje esančio plyšio viršūne veikiant statinei apkrovai.

Turinys

IVADAS	1
Problemos formulavimas.....	1
Darbo aktualumas.....	2
Tyrimų objektas.....	2
Darbo tikslas.....	2
Darbo uždaviniai	3
Tyrimų metodika	3
Darbo mokslinis naujumas	4
Darbo rezultatų praktinė reikšmė	4
Ginamieji teiginiai	5
Darbo rezultatų aprobavimas.....	5
Disertacijos struktūra.....	6
1. DISPERSIŠKAI ARMUOTŲ SMULKIAGRŪDŽIŲ BETONŲ TECHNOLOGINIŲ IR EKSPLOATACINIŲ SAVYBIŲ TYRIMŲ APŽVALGA	7
1.1. Dispersiškai armuotų betonų gamybos raida	7
1.2. Dispersiškai armuotų betonų gamybos technologija	11
1.3. Dispersiškai armuotų smulkiagrūdžių betonų savybių apžvalga	13
1.3.1. Mišinių konsistencija.....	14
1.3.2. Mechaninės savybės	16
1.4. Skirtingų betono komponentų charakteristikos ir panaudojimas.....	18
1.5. Plaušu armuoto smulkiagrūdžio betono ilgaamžiškumas	23

1.5.1. Mechaninių savybių pastovumo vertinimo principai.....	23
1.5.2. Mechaninių savybių pastovumo tyrimo metodai.....	25
1.5.3. Stiklo plaušu armuoto betono korozijos procesai	28
1.5.4. Korozijos procesų vertinimas pagal betono lenkimo deformacijų energiją	32
1.6. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas.....	34
2. KOMPOZITUI SUKURTI NAUDOTOS MEDŽIAGOS IR TYRIMO METODAI .	37
2.1. Naudotos medžiagos	37
2.2. Mišinių sudėtys	42
2.3. Tyrimo metodai.....	43
2.3.1. Mišinių ruošimas ir bandinių formavimas	43
2.3.2. Mišinių konsistencijos nustatymas	45
2.3.3. Betono mechaninių savybių nustatymas.....	46
2.3.4. Atsparumo šalčiui nustatymas.....	48
2.3.5. Technologinių ir kitų savybių nustatymas	49
2.4. Antrojo skyriaus išvados	50
3. MINERALINIAIS PRIEDAIS MODIFIKUOTO APDAILINIO BETONO SU DISPERSINIŲ ARMAVIMU TECHNOLOGINIŲ IR EKSPLOATAVINIŲ SAVYBIŲ TYRIMAI.....	51
3.1. Smulkiagrūdžio apdailinio betono su skirtingais plaušais technologinių bei mechaninių savybių tyrimai.....	52
3.1.1. Betono mišinio konsistencija.....	52
3.1.2. DASAB betono mechaninės savybės ir plaušo parinkimas	54
3.2. Stiklo plaušu armuotų betonų segregacijos ir konsistencijos tyrimai	58
3.2.1. Užpildų poveikis stiklo plaušu armuotų mišinių konsistencijai	58
3.2.2. Aktyvių mineralinių priedų poveikis stiklo plaušu armuotų mišinių konsistencijai.....	64
3.3. Stiklo plaušu armuoto betono fizikinių bei mechaninių savybių tyrimai	65
3.4. Stiklo plaušu armuoto betono atsparumas šalčiui.....	72
3.4.1. Įtraukto oro kiekis betono mišinyje	73
3.4.2. Betono paviršiaus destrukcijos dėl užšaldymo ir atšildymo ciklų poveikio tyrimai	74
3.4.3. Betono mechaninių savybių bei lenkimo deformacijų energijos pokyčių dėl cikliško užšaldymo ir atšildymo tyrimai.....	78
3.5. Tyrimo rezultatų praktinis taikymas.....	85
3.6. Trečiojo skyriaus išvados	86
BENDROSIOS IŠVADOS	89
LITERATŪRA IR ŠALTINIAI.....	91
AUTORIAUS MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS..	101

SUMMARY IN ENGLISH.....	103
PRIEDAI ¹	119
A priedas. Portlandcemenčio CEM I 52,5R fizinės ir mechaninės savybės	121
B priedas. Užpildų pagrindinės fizinės ir cheminės charakteristikos	122
C priedas. Aktyvių mineralinių priedų fizinės charakteristikos	123
D priedas. Superplastiklio charakteristikos	124
E priedas. Betono mišinių sudėtys.....	125
F priedas. Autoriaus sąžiningumo deklaracija.....	127
G priedas. Bendraautorių sutikimai teikti publikacijose skelbtą medžiagą daktaro disertacijoje.....	128
H priedas. Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema kopijos.....	134

¹ Priedai pateikiami pridėtoje kompaktinėje plokštelėje.

Contents

INTRODUCTION	1
Formulation of the problem	1
Relevance of the thesis	2
The object of research	3
The aim of the thesis	3
The tasks of the thesis	3
Research methodology	4
Scientific novelty.....	4
Practical value of the research findings.....	5
Defended statements	5
Approval of the research findings	5
The structure of the dissertation	6
1. RESEARCH ANALYSIS OF TECHNOLOGICAL AND PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF DECORATIVE CONCRETE WITH DISPERSE REINFORCEMENT	7
1.1. Brief history of fiber reinforced concrete	7
1.2. Production principles of fiber reinforced concrete	11
1.3. Properties of fine graded fibre reinforced concrete	13
1.3.1. Concrete mix workability	14
1.3.2. Mechanical properties	16
1.4. Properties and implementation of different concrete components	18

1.5. Durability investigation of fine graded fiber reinforced concrete.	23
1.5.1. Durability assesement principles of mechanical properties.....	23
1.5.2. Durability investigation methods.....	25
1.5.3. Ageing processes of glass fiber reinforced concrete	28
1.5.4. Ageing process assesement by flexural stain energy	32
1.6. Conclusions of the first chapter and formulation of the objectives of thesis.....	34
 2. MATERIALS USED FOR THE COMPOSITE AND RESEARCH METHODS.....	37
2.1. Used materials	37
2.2. Concrete compositions	42
2.3. Test methods	43
2.3.1. Concrete mix and specimen preparation.....	43
2.3.2. Workability of concrete mix.....	45
2.3.3. Mechanical characteristics of concrete	46
2.3.4. Freeze/thaw testing.....	48
2.3.5. Technological and other properties	49
2.4. Conclusions of the second chapter	50
 3. RESEARCH OF TECHNOLOGICAL AND PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF DECORATIVE CONCRETE WITH DISPERSE REINFORCEMENT MODIFIED BY MINERAL ADDITIVES	51
3.1. Investigation of technological and mechanical properties of fine-grained decorative concrete with disperse reinforcement.....	52
3.1.1. Concrete mix workability	52
3.1.2. Concrete mechanical properties and fiber selection	54
3.2. Investigation of glass fibre reinforced concrete mix workability and segregation.....	58
3.2.1. Influence of aggregates on concrete mix workability.....	58
3.2.2. Influence of active mineral additives on concrete mix workability.....	64
3.3. Investigation of physical and mechanical properties of glass fiber reinforced concrete.....	65
3.4. Resistance to freezing and thawing of glass fiber reinforced concrete.....	72
3.4.1. Entrained air in concrete mix.....	73
3.4.2. Investigation of the effect of concrete surface destruction due to cyclic freezing and thawing	74
3.4.3. Investigation of mechanical properties of concrete and flexural strain energy changes due to cyclic freezing and thawing	78
3.5. Practical implementation of research findings	85
3.6. Conclusions of the third chapter.....	86
 GENERAL CONCLUSIONS	89
 REFERENCES	91

LIST OF SCIENTIFIC PUBLICATIONS BY THE AUTHOR ON THE TOPIC OF THE DISSERTATION	101
SUMMARY IN ENGLISH.....	103
ANNEXES ²	119
Annex A. Physical and mechanical properties of Portlandcement CEM I 52,5R ..	121
Annex B. Main physical and chemical characteristics of aggregates.....	122
Annex C. Main physical characteristics of reactive micro fillers.....	123
Annex D. Superplasticiser GLENIUM ACE 430 characteristics	124
Annex E. Concrete mix compositions	125
Annex F. Author's declaration of integrity	127
Annex G The co-authors' agreements for providing the materials of the joint publications in the thesis.....	128
Annex H. Copies of the scientific publications by the author on the topic of the thesis.....	134

²The annexes are supplied in the enclosed compact disc.

Įvadas

Problemos formulavimas

Cementinėje matricoje įmaišius didelio tempimo stiprio ir deformacijų modulio plaušą, trapi medžiaga (betonas) virsta naujo tipo kompozitu, atspariu įvairių dinaminių apkrovų poveikiui. Mokslinėje literatūroje nagrinėjant šių kompozitų mechanines charakteristikas, dažnai apsiribojama tik lenkimo stipriu, kuris nenu-sako šiai medžiagai būdingų plastinių savybių. Todėl dispersiškai armuotų betono kompozitų mechaniniam atsparumui apibūdinti būtų tikslinga panaudoti lenkimo deformacijų energiją, kuri nusako medžiagos gebėjimą plastiškai deformuotis iki suirimo (bandiniui pasiekus tam tikrą ribinį įlinkį).

Betono mišinio konsistencija daro įtaką formuojamo gaminio paviršiaus ko-kybiniams parametrams (struktūrai, faktūrai bei porų kiekiui), taip pat ir cementi-nės matricos vientisumui bei plaušo pasiskirstymui joje. Todėl būtina ištyrinėti trupintų uolienų užpildų poveikį mišinių konsistencijai bei segregacijai, nustatyti šių parametų priklausomybes nuo užpildo dalelių formos. Dispersiškai armuoto apdailinio betono kompozito technologiniams parametrams bei eksploatacinėms savybėms pagerinti gali būti naudojami aktyvūs mineraliniai priedai – SiO_2 mik-rodulkės ir metakaolinas, kurių poveikis kompozito atsparumui užšaldymo ir at-šildymo ciklų poveikiui bei lenkimo deformacijų energijai dar nėra ištyrinėtas.

Darbo aktualumas

Statybų sektoriuje pastaruoju metu sparčiai populiarėja natūralaus betono fasadų apdaila. Nors ši tendencija iš esmės susijusi su architektūros, kaip estetinės išraiškos poveikiu ieškant naujo subtilaus medžiagiškumo, tačiau tai paliečia ir labai svarbius statybinių medžiagų tvarumo klausimus. Per paskutinius dešimtmečius didelį pranašumą įgijo fasadai iš apdailinio betono, kai sienos yra suprojektuojamos iš surenkamų trisluoksnių arba atskirų vieno sluoksnio apdailinių sieninių elementų. Toks statybos būdas leidžia gerokai sutaupyti darbo jėgos, automatizuoti įvairius technologinius procesus, kuriuos lengviau kontroliuoti ir užtikrinti žymiai geresnę gaminamų sieninių elementų kokybę.

Dispersiškai armuotų betonų taikymas pramoninėje trisluoksnių sieninių elementų gamyboje yra perspektyvi inovacija, kuri itin palengvintų konstrukcijas bei sumažintų sienų storį. Dėl to sumažėtų transportavimo kaštai, laikančiųjų sienų, pamatų apkrovos, padidėtų vidaus patalpų plotas. Tai pat trumpėtų ir gaminio formavimo laikas, nes nebereikėtų gaminti armokarkasų. Kadangi gamykliniu būdu sieniniai elementai formuojami horizontalioje padėtyje, panaudojus šiame darbe tyrinėjamus takius apdailinio betono mišinius, gaunami aukštos kokybės betono paviršiai.

Kita plati dispersiškai armuotų betonų panaudojimo sritis – liejimo arba purškimo būdu gaminami pakabinami sieniniai elementai ventiliuojamiems fasadams. Lyginant su paplitusiu Hitcheko metodu gaminamomis fibrocementinėmis plokštėmis, būtų galima neapsiriboti vien plokščios formos gaminiiais ir panaudojant specialius klojinius išgauti sudėtingas formas bei įvairius paviršiaus reljefus.

Tyrimų objektas

Tyrimų objektas – dispersiškai armuotas smulkiagrūdis apdailinis betonas su skirtingais užpildais ir cementinės matricos struktūrą modifikuojančiais priedais.

Darbo tikslas

Šio darbo tikslas yra sukurti dispersiškai armuotą apdailinį betoną surenkamųjų sieninių elementų gamybai naudojant skirtingus plaušus, užpildus bei aktyvius mineralinius priedus.

Darbo uždaviniai

Darbo tikslui pasiekti darbe reikia spręsti šiuos uždavinius:

1. Parinkti žaliavas ir jų proporcijas apdailinio betono kompozitui surenkamųjų sieninių elementų gamyboje, kurios užtikrintų gaminio atsparumą trapiam suirimui ir pleišėjimui.
2. Nustatyti stiklo, bazalto, anglies ir polivinilo alkoholio plaušų poveikį plonasienių gaminių apdailinio betono technologinėms bei mechaninėms savybėms kai betono mišiniai ruošiami intensyvaus maišymo būdu.
3. Nustatyti kvarcinio smėlio, granito atsijų bei įprastinio žvyro karjerų smėlio užpildų dalelių formos poveikį dispersiškai armuoto smulkiagrūdžio betono konsistencijai bei segregacijai.
4. Nustatyti SiO_2 mikrodulkių ir metakaolino mineralinių priedų poveikį dispersiškai armuoto betono atsparumui cikliškam užšaldymui ir atšildymui, vertinant betono apdailinio paviršiaus defektus – atskilusio cementinio akmens kiekį ir lenkimo deformacijų energijos pokyčius, kai numatoma gaminio eksploatavimo trukmė – ne mažiau 20 metų.
5. Ištirti plaušo paviršiaus struktūros pokyčius dėl užšaldymo ir atšildymo ciklų poveikio, kai cementinė matrica modifikuojama SiO_2 mikrodulkių ir metakaolino aktyviais mineraliniais priedais.

Tyrimų metodika

Užpildų poveikis betono konsistencijai ir segregacijai buvo tiriamas pagal šiame darbe sukurtą metodiką. Aktyvių mineralinių priedų poveikis betono ilgaamžiškumui buvo nustatytas atliekant paviršinio užšaldymo ir atšildymo bandymus pagal šiame darbe sukurtą metodiką, vertinant tiriamo kompozito lenkimo deformacijų energijos pokyčius ir apdailinio paviršiaus defektų plotą. Kitos dispersiškai armuotų betonų savybės buvo nustatytos remiantis standartais LST EN 1170-1, LST EN 1170-4, LST EN 196-1, LST EN 15191, LST EN 13198. Matricos ir plaušo kontakto zonos struktūros pokyčiams tyrinėti buvo naudojamas skenuojantis elektroninis mikroskopas (SEM).

Darbo mokslinis naujumas

Disertacinio darbo reikšmė apibūdinama dispersiškai armuotų smulkiagrūdžių apdailinių betonų technologinių savybių bei ilgaamžiškumo įvertinimo bandymo metodikų tobulinimu, taip pat naujų smulkiagrūdžių betono mišinių modifikavimu, panaudojant kompleksinius komponentus bei Baltijos regiono klimato sąlygomis eksploatuojamo betono ir jo sudedamųjų dalių (komponentų) parametrų ribinių verčių nustatymu. Rengiant disertaciją gauti šie medžiagų inžinerijos mokslui nauji rezultatai:

1. Paaiškintas trupintų uolienų užpildų poveikis betono mišinių technologinėms savybėms ir nustatyta užpildo dalelių formos įtaka stiklo plaušu armuoto smulkiagrūdžio betono mišinio konsistencijai ir segregacijai.
2. Paaiškintas SiO_2 mikrodulkių ir metakaolino mineralinių priedų poveikio mechanizmas smulkiagrūdžio stiklo plaušu armuoto betono kompozito lenkimo deformacijų energijai veikiant cikliškam užšaldymui ir atšildymui.
3. Nustatytas SiO_2 mikrodulkių ir metakaolino mineralinių priedų ir jų kiekio smulkiagrūdžio betono mišinyje poveikis apdailinio betono senėjimo procesams dėl užšaldymo ir atšildymo ciklų poveikio.

Darbo rezultatų praktinė reikšmė

Sukurtas dispersiškai armuoto betono kompozitas, kurį galima panaudoti trisluoksnių surenkamųjų sieninių elementų gamyboje suploninant apdailinį betono sluoksnį iki 15 mm.

Nustatytas granito atsijų bei įprastinio žvyro karjerų smėlio poveikis betono technologinėms ir mechaninėms savybėms, kai šiais užpildais pakeičiama iki 50 % kvarcinio smėlio betono mišinyje.

Sukurta stiklo plaušu armuoto betono apdailinio paviršiaus ilgaamžiškumo vertinimo metodika pagal atskilusio paviršiaus plotą ir ištirtas metakaolino bei SiO_2 mikrodulkių priedų poveikis paviršiaus destrukcijai.

Ginamieji teiginiai

1. Stiklo plaušu armuoto smulkiagrūdžio betono mišinio segregacija mažėja didinant apvalios formos užpildo dalelių kiekį, kurios užtikrina tolygų cementinės matricos ir plaušo pasklidimą.
2. Metakaolino ir SiO_2 mikrodulkių aktyvūs mineraliniai priedai padidina stiklo plaušu armuoto smulkiagrūdžio betono kompozito lenkimo deformacijų energiją po užšaldymo ir atšildymo ciklų poveikio.
3. Aktyvūs mineraliniai priedai skirtingai veikia smulkiagrūdžio betono cementinės matricos mikrostruktūrą, nuo kurios priklauso betono ilgiamžiškumas, apibūdinamas kaip apdailinio paviršiaus masės nuostoliai veikiant cikliškam užšaldymui ir atšildymui.

Darbo rezultatų aprobavimas

Disertacijos tema atspausdinti 7 moksliniai straipsniai: trys – recenzuojamuose mokslo žurnaluose (Mocekis et al. 2018a; Mocekis et al. 2018b; Mocekis et al. 2020), du – recenzuojamoje tarptautinių konferencijų medžiagoje, įtrauktoje į Clarivate Analytics Web of Science (Mocekis et al. 2017; Mocekis et al. 2018c) ir du kitų tarptautinių konferencijų duomenų bazių leidiniuose (Mocekis et al. 2019a; Mocekis et al. 2019b;).

Disertacijoje atliktų tyrimų rezultatai paskelbti septyniose mokslinėse konferencijose Lietuvoje ir užsienyje:

- Tarptautinėje 19-toje jaunųjų mokslininkų konferencijoje „*Juniorstav*“ 2017, Brno, Čekijoje;
- 20-toje Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijoje „*Mokslas – Lietuvos ateitis*“ 2017 m. Vilniuje;
- 3-oje tarptautinėje konferencijoje „*Innovative Materials, Structures and Technologies*“ 2017 m., Rygoje;
- 4-oje tarptautinėje konferencijoje „*World Multidisciplinary Civil Engineering – Architecture – Urban Planning Symposium*“ 2018 m., Prahoje;
- 13-oje tarptautinėje konferencijoje „*Modern Building Materials Structures And Techniques*“ 2019 m., Vilniuje;
- 4-oje tarptautinėje konferencijoje „*Innovative Materials, Structures and Technologies*“ 2019 m., Rygoje;
- 28-oje tarptautinėje konferencijoje „*XXVIII Scientific and Technological Conference of Latvian Concrete Association (LCA)*“ 2019 m., Rygoje.

Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai, bendrosios išvados, naudotų literatūros šaltinių bei autoriaus publikacijų sąrašai, santrauka anglų kalba.

Darbo apimtis yra 121 puslapis, tekste panaudotos 11 numeruotų formulių, 74 paveikslai ir 15 lentelių. Rašant disertaciją buvo panaudoti 128 literatūros šaltiniai.

Dispersiškai armuotų smulkiagrūdžių betonų technologinių ir eksploatacinių savybių tyrimų apžvalga

Skyriuje nagrinėjami dispersiškai armuoto smulkiagrūdžio apdailinio betono (DASAB) gamybos principai, pasaulinė praktika, panaudojimo problemos. Apžvelgiamos pritaikymo sritys, galiojantys standartai bei įvairių autorių optimizacijos sudėties tyrimų rezultatai. Analizuojamos betono savybių pastovumo problemos eksploatuojant gaminius natūraliomis lauko sąlygomis.

Skyriaus tematika paskelbti penki autoriaus straipsniai (Moceikis et al., 2018a, 2018b, 2018c, 2019a, 2019b).

1.1. Dispersiškai armuotų betonų gamybos raida

Dispersiškai armuotas betonas – tai kompozitinė medžiaga, sudaryta iš cementinės matricos, kurioje atsitiktine tvarka įvairiomis kryptimis yra pasiskirstęs plaušas (1.1 pav.). Šioje būsenoje tiek cementinė matrica tiek plaušas išlaiko savo

unikalias fizikines bei chemines charakteristikas, kurioms veikiant kartu gaunamas naujų savybių kompozitas, kurių neįmanoma pasiekti naudojant šias medžiagas atskirai (Bartos et al., 2017). Plaušas užtikrina kompozito atsparumą tempimui, o cementinė matrica veikia kaip tempimo įtempius perduodanti terpė.

1.1 pav. Dispersinio armavimo schema (sudaryta autoriaus)

Fig. 1.1. Scheme of fiber reinforcement (made by author)

Dispersinio armavimo plaušais poveikis mechaninėms cementinės matricos savybėms pasižymi tuo, kad padidėja matricos smūginis tūsumas bei lenkimo deformacijų energija ir atsparumas tempimo įtempiams. Kitaip sakant, trapi betono matrica tampa plastiška ir energijos kiekis, reikalingas suardyti medžiagai gerokai padidėja (1.2 pav.).

1.2 pav. Dispersinio armavimo įtaka betono lenkimo deformacijų kreivei (sudaryta autoriaus)

Fig. 1.2. Infulence of fiber reinforcement on concrete bending curve (made by author)

Nors armuojančių elementų (plaušų) atsparumas tempimui yra gerokai didesnis nei cementinės matricos (iki 2000 kartų), tačiau fiziškai sudėtinga užtikrinti

armavimo vientisumą per visą elemento ilgį, tempimo jėgų veikimo kryptimi (1.3 pav.). Todėl dispersinis armavimas vis dar nėra taikytinas didelės išorinės apkrovos perimantiems konstrukciniams elementams (sijoms, kolonoms, perdangų plokštėms) (Gopalaratnam et al., 1995; Akers et al., 2009).

1.3 pav. Cementinės matricos trūkis dėl dispersinio armavimo ne vientisumo (sudaryta autoriaus)

Fig. 1.3. Crack due to non-uniformity of fiber reinforcement (made by author)

Dispersinis armavimas plaušais dažniausiai naudojamas plonasieniams apdailiniams fasadų elementams, veikiamiems nedidelių išorinių apkrovų – savojo svorio bei vėjo. Įvairių plaušų panaudojimas gali padidinti apdailinio betono ilgaamžiškumą, lyginant su metaline armatūra (Biswas et al., 2020; Echevarria et al., 2018).

Pirmieji dispersinio armavimo panaudojimo pavyzdžiai aptinkami dar prieš kelis tūkstantmečius, kuomet statiniai iš molio buvo sutvirtinami šiaudais ar kitokiais natūraliais plaušais. Masinėje gamyboje plaušu armuoti kompozitai pasirodė devyniolikto amžiaus pabaigoje, atradus asbesto plaušą. Tai lėmė pirmojo industriniu būdu gaminamo didelio stiprumo fibrocementinio kompozito atsiradimą ir įsitvirtinimą statybos produktų pramonėje – beveik visą dvidešimtą amžių Hatcheko metodu buvo gaminami plonasieniai cementiniai stogų bei fasadų lakštai, armuoti asbesto plaušu, kol šis plaušas buvo pripažintas turintis kancerogeninį poveikį (Jamshidia et al., 2011). Po II-ojo pasaulinio karo buvo atrasta nemažai naujo tipo plaušų, tai sudarė sąlygas ir naujų statybinių kompozitų vystymuisi. 1950-aisiais tuometinėje Sovietų sąjungoje pirmą kartą panaudotas E – tipo stiklo plaušu armuotas betonas su mažo šarmingumo rišikliu (Biryukovich, 1964). Įprastas portlandcementis negalėjo būti naudojamas dėl E – tipo plaušo intensyvios cheminės reakcijos su šarmais, todėl pirminis šių naujų kompozitų panaudojimas buvo labai ribotas (Grimer, 1969). 1960-aisiais Jungtinėje Karalystėje sukuriama šarmams atsparus stiklo plaušas (AR – tipas), kuris pradedamas naudoti su Portlandcemenčio matrica. Tačiau dėl kokybės kontrolės stokos ir dėl nepakankamai geros plaušo kokybės pirmuose gaminiuose buvo pastebimas išankstinis trapumas, kai gaminiai eksploatuojami drėgnoje aplinkoje ir pseudo-plastinė matrica laikui bėgant praranda plastiškumą. 1980-aisiais buvo žengti nauji žingsniai ir pa-

tobulintas AR – tipo plaušas, taip pat pastebėta, kad akrilo polimero priedas padidina stiklo plaušu armuoto cementinio kompozito ilgaamžiškumą (Majumdar et al., 1977; Cohen et al., 1985; Bijen et al., 1982).

Nors XX amžiaus antroje pusėje inovatyvių statybos produktų sektoriuje dominavo stiklo plaušas, lygiagrečiai buvo tyrinėjamos ir kitos alternatyvos – anglies, bazalto ar polimerų plaušai. Anglies plaušo pramonė pagreitį įgavo 1959-aisiais, kuomet Dr. Shindo Japonijoje užpatentavo anglies plaušo gamybos metodą, panaudojant brangią naftos produktų antrinę žaliavą – poliakrilnitrilą. Tačiau prireikė kelių dešimtmečių kol anglies plaušo gamybos būdai ištobulėjo ir šią medžiagą pradėjo naudoti įvairios pramonės šakos. Iki šiol statybų sektoriuje šio plaušo panaudojimas yra labai ribotas dėl vis dar sąlyginai aukštos kainos (Tanaka et al., 2018; Bradley et al., 2016). Sovietų Sąjungoje po antrojo pasaulinio karo nemažas dėmesys buvo skiriamas brangaus anglies plaušo alternatyvai – bazalto plaušui. Šio plaušo gamybos būdas iš esmės panašus į stiklo plaušo, kuomet tam tikros uolienos išlydomos, homogenizuojamos su įvairiais priedais ir karštai masei laisvai tekant per platinos – 10 % rodžio lydinio matricą suformuojamos ke-liolikos mikronų skersmens gijos, kurios šaldomos staiga sukieta ir yra suvyniojamos į ištisinius stiklo (bazalto) plaušo verpalus (Fiore et al., 2015; Loewenstein et al., 1973; Frederick et al., 2009).

1951 metais JAV buvo susintetintas polipropilenas – vienas šiais laikais populiariausių kasdienio vartojimo plastikų. Betono savybių modifikavimas įmaišant įvairių polimerinių plaušų mokslininkų tyrinėjamas pastaruosius keturis dešimtmečius. Betonui dažniausiai yra naudojami tokie sintetiniai polimerai kaip polivinilo alkoholis (PVA), polipropilenas (PP), polietilenas bei poliamidai. Pir-mieji polimerinius plaušus betonui panaudojo JAV kariškiai 1965 m, siekdami padidinti statinių atsparumą prieš artilerijos smūgiams. Buvo pastebėta, kad polimerinis plaušas gerokai padidina betono smūginį tįsumą, t.y. trapi medžiaga tampa pseudo-plastiška (Sheldon et al., 1982; Ramaswamy et al., 1984). Kadangi polimerai natūraliomis lauko sąlygomis yra labai lėtai, kai kurie mokslininkai laiko tai pranašumu prieš plieninę armatūrą, kuriai būdinga žymiai intensyvesnė korozija. Visiems statybų pramonėje naudojamiems polimeriniams plaušams būdingas labai žemas atsparumas aukštoms temperatūroms – gaisro atveju betone esantys plaušai greitai išsilydo ir jų vietoje lieka tik tuščios ertmės. Taip pat, polimerų tamprumo modulis retais atvejais viršija 10 GPa, o tai yra 20 kartų mažiau už įprastinę plieno armatūrą. Dėl mažo tamprumo modulio betoninis elementas neturi reikiamo standumo, gali per daug įlinkti ir netenkinti vienos iš esminių projektavimo sąlygų – tinkamumo ribinių būvių (Sukontasukkul et al., 2004; Aulia et al., 2002). Tačiau polimeriniai plaušai dažniausiai naudojami betone kitu tikslu. Po daugelio mokslinių tyrimų bei praktinių pavyzdžių įrodyta, kad polipropileno mikropilaušas efektyviai sumažina betono plastinio susitraukimo deformacijas, kai

betonuojami dideli plotai, ar masyvios konstrukcijos. Tokiu būdu yra eliminuojami trūkiai betone dėl susitraukimo džiūstant kietėjimo proceso metu (Yousefieh et al., 2017; Afroughsabet et al., 2017).

Plaušais armuoti betonai yra naudojami gamykliniams betono gaminiams formuoti. Tai gali būti naujų pastatų sieniniai elementai, istorinių pastatų fasado detalės, kraštovarkos gaminiai, interjero detalės.

1.2. Dispersiškai armuotų betonų gamybos technologija

Smulkiagrūdžių betonų bazinei sudėčiai naudojamas įprastinis portlandcementis, smulkus smėlis ($D_{\max} = 2 \text{ mm}$), plastiklis, plaušas ir vanduo. Dažniausiai naudojamas užpildo – rišiklio santykis yra 1:1, stiklo plaušo kiekis 2–5 % nuo sausų medžiagų masės, vandens ir cemento santykis 0,3–0,4. Sukietėjusio betono tankis, priklausomai nuo betono sudėties svyruoja tarp 1800–2200 kg/m³. Šiems betono mišiniams yra naudojamas žemas vandens ir cemento santykis ($V/C < 0,4$) ir sudėtyje yra didelis kiekis smulkiųjų dalelių, todėl įprasti normaliojo betono maišymo būdai nėra tinkami, nes neužtenka energijos permaišyti didelį kiekį smulkiųjų dalelių ir gauti reikiamą mišinio konsistenciją (Peter et al., 2015). Šiems smulkiagrūdžiams mišiniams yra išskirtinai naudojamas intensyvaus maišymo metodas, kai betono maišyklėje yra viena dideliu greičiu (iki 1500 aps/min) besisukanti ašis su spiralės formos antgaliu (1.4 pav.).

1.4 pav. Intensyvaus maišymo metodo schema (sudaryta autoriaus)

Fig. 1.4. Scheme for intensive concrete mixing (made by author)

Tokių maišyklių talpa paprastai neviršija 150 l, dažniausiai medžiagų dozavimas nėra pilnai automatizuotas, o mišinio ruošimo laikas užtrunka iki 5–10 min. Tuo tarpu normaliajam betonui skirtų maišyklių tūris paprastai siekia 1,5 m³ ir visų žaliavų dozavimas yra pilnai automatizuotas.

Galutinio produkto geometrinės charakteristikos bei mechaninės savybės nulemia, koks formavimo metodas yra pasirenkamas dispersiškai armuotų gaminių formavimui. Gaminio mechaninės savybės labai priklauso nuo šviežio mišinio sutankinamumo bei plaušo koncentracijos ir orientacijos cementinėje matricoje. Tokie gamybos būdai, kaip vibro presavimas (ekstrūzija) ir takūs mišiniai, savaime užtikrina gerą betono sutankinimą. Tačiau dažnai naudojamas purškimo metodas reikalauja papildomo sutankinimo specialiu voleliu.

Takus mišinys dažniausiai naudojamas gaminant nesudėtingų formų, dažniausiai plokščius gaminius, arba uždaro tipo dėžinius elementus. Gaminio paviršiaus struktūrą galima keisti panaudojant poliuretano, gumos klojinius, ant kurių yra liejamas betono mišinys (1.5 pav.).

1.5 pav. Takus stiklo plaušu armuotas betonas (asm. arhyvo nuotraukos):

a) forma; b) gaminy (autorius fotografijos)

Fig. 1.5. Self compacting glass fiber reinforced concrete (photos of personal archives):

a) mould; b) casted element (photos made by author)

Purškimo metodas dažniausiai taikomas gaminant sudėtingų geometrinių formų gaminius. Naudojamas sudėtingos konstrukcijos ekscentrinis purkštuvai, į kurį dozuojamas standus betono mišinys ir plaušo verpalų viena ar kelios gijos, kurios yra karpomos iki nustatyto ilgio (paprastai 25–40 mm) (1.6 pav.).

1.6 pav. Ekscentrinis purkštuvas (sudaryta autoriaus)
Fig. 1.6. Excentric spray gun (made by author)

Suspausto oro pagalba plaušas išpučiamas kartu su betono mišiniu ant klojinio paviršiaus. Tokiu būdu 12–15 mm storio betono gaminyje yra suformuojamas purškiant betoną 3–4 sluoksniais. Pirmas 3–5 mm sluoksnis gali būti formuojamas kaip apdailinis, įmaišant į betoną įvairius pigmentus, ar netgi tokius priedus kaip nano titano dioksidas, su kuriuo betono paviršiai tampa savaime nusivalantys nuo purvo ir filtruojantys atmosferoje esantį diazoto oksidą N_2O . Išpurškus kiekvieną sluoksnį, visas paviršius yra voluojamas, tokiu būdu sutankinant šviežią mišinį ir užtikrinant, kad mišinys pilnai liestųsi su klojinu, sluoksniai sukibtų vienas su kitu ir būtų pašalintos tuštumos (poros) tarp plaušo ir matricos. Gaminant šiuo būdu, plaušas pasiskirsto tik horizontalioje plokštumoje – tempimo jėgų veikimo kryptimi, todėl gaunamas žymiai didesnis betono lenkimo stipris nei naudojant takų mišinį.

1.3. Dispersiškai armuotų smulkiagrūdžių betonų savybių apžvalga

Dispersiškai armuoto smulkiagrūdžio betono mechaninės savybės priklauso nuo tokių faktorių kaip gamybos būdas, plaušo tipas bei kiekis, kietėjimo sąlygos, cementinės matricos struktūra. Pasirinktas gamybos būdas nustato reikiamą betono mišinio konsistenciją, kuri priklauso nuo tokių pagrindinių faktorių kaip vandens ir cemento santykis, plaušo kiekis ir tipas bei pasirinkto užpildo dalelių forma.

1.3.1. Mišinių konsistencija

Betono paviršių kokybę įtakoja tokie pagrindiniai faktoriai kaip klojinių tipas ir jų paruošimas, mišinio sutankinamumas bei konsistencija. Esant netinkamos konsistencijos mišiniui, vien klojiniais ir intensyviai tankinant betoną pasiekti norimą rezultatą yra labai sudėtinga, o dažnai net neįmanoma. Todėl tyrinėjant smulkiagrūdžius apdailinius betonus labai svarbu atsižvelgti į mišinio konsistenciją įtakančius rodiklius.

Daugybė mokslinių tyrimų jau atlikta nagrinėjant betonų superplastiklių efektyvumą, vandens ir cemento (V/C) santykio poveikį mišinių konsistencijai, todėl tikslinga būtų tyrinėti tokius rodiklius, į kuriuos mažiau kreipiamas dėmesys, tačiau jie taip pat yra labai svarbūs – tai plaušo tipas ir užpildo dalelių forma.

Branston (2016) atlikti betono konsistencijos tyrimai parodė, kad dozuojuojant 12 kg/m^3 ir 40 kg/m^3 bazalto plaušo betono mišinio neįmanoma išmaišyti, nes mišinys pasidaro standus, o plaušas sulimpa. Tačiau dozuojuojant mažesniais kiekiais ($1\text{--}2 \text{ kg/m}^3$), bazalto plaušas buvo efektyviai panaudotas betono plastinio susitraukimo džiūstant deformacijoms sumažinti.

Yakhlaf (2013) nustatė, kad anglies plaušas stipriai pablogino susitankinčio normaliojo betono mišinio konsistenciją, kai plaušo buvo dozuojuojama 0,25 % nuo sausų medžiagų masės. Safiudin (2018) ištyrė, kad betono gniuždymo stipris sumažėjo iki 58 % dėl plaušo įtakos. Tačiau skėlimo stipris padidėjo atitinkamai iki 17 % lyginant su bandiniais be plaušo. Skenuojančiu elektroniniu mikroskopu darytos nuotraukos atskleidė, kad anglies plaušeliai betono matricoje išliko tiesios formos, nebuvo susikraipę ar susisukę į kamuolius.

Peter (2015) pavyko pagaminti takų cementinį skiedinį panaudojus 3 % plaušo nuo rišiklio masės. Rišikliu buvo pasirinktas CEM I 52,5R klasės portlandcementis, mišinio konsistencijai pagerinti – polikarboksilatų esterio superplastiklis, užpildas – smulkus kvarcinis smėlis ($D_{\max} = 2 \text{ mm}$), vandens ir cemento santykis $V/C = 0,36$. Superplastiklio kiekis tyrimo autorių nebuvo įvardintas. Pastebėta, kad standartinis konsistencijos vertinimo metodas pagal LST EN 1170-1 netinka, kadangi visais atvejais buvo gaunamas maksimalus mišinio pasklidimas. Todėl pasirinkta matuoti mišinio išteklėjimo laiką iš 3 l talpos indo per 19 mm skersmens vamzdelį. Keičiant superplastiklio kiekius, išteklėjimo laikas kito nuo 80 s iki 29 s.

Abe (2015) tyrinėjo takius skiedinius su stiklo plaušu ir skirtingais priedais (metilceliulioze, akrilo polimeru, SiO_2 mikrodulkėmis, orą įtraukiančiu bei orą išstumiančiu ir mišinio sluoksniavimąsi mažinančiomis įmaišomis). Visų mišinio komponentų kiekiai buvo vienodi, keičiami tik priedai. Vandens cemento santykis $V/C = 0,3$, o plaušo kiekis 3 % nuo cemento masės. Didžiausias mišinio pasklidimas gautas su mišinio sluoksniavimąsi mažinančiu priedu, o betono lenkimo stipris svyravo tarp 11–15 MPa.

Pastaraisiais dešimtmečiais sparčiai mažėjant natūralaus iškastinio smėlio resursams statybų pramonėje sunaudojama vis daugiau trupintų uolienų užpildų. Nors abiem atvejais dalelių dydis yra panašus, tačiau skiriasi šių dviejų, skirtingais būdais gaunamų, smėlių dalelių morfologija. Dėl gamtoje vykstančių ilgalaikių mechaninių poveikių, natūralaus smėlio dalelėms visada yra būdingas sferiškumas ir glotnus paviršius. Kadangi dirbtinis smėlis gaunamas skaldant ir trupinant uolienas, šioms dalelėms būdingas šiurkštus paviršius, aštrūs kampai ir pailga forma.

Kadangi betono mišinys yra sudarytas iš įvairių tarpusavyje sąveikaujančių dalelių, tų dalelių forma atlieka svarbų vaidmenį kalbant apie betono mišinio reologines savybes (pasklidimą bei mišinio stabilumą). Užpildo dalelės formą nusako trys pagrindiniai parametrai: sferiškumas, plokštumas bei pailgumas (Powers, 1953), (1.7 pav.). Tikrojo sferiškumo indeksas apibūdinamas kaip rutulio, tokio pat tūrio kaip dalelė, paviršiaus ploto ir dalelės paviršiaus ploto santykis (Wadell et al., 1933). Akivaizdu, kad į diską panašių kūnų sferiškumas gali atrodyti toks pat, kaip ir pailgos formos, nepaisant jų skirtumų.

1.7 pav. Dalelių formos klasifikavimas pagal Powers
Fig. 1.7. Roundness class according to Powers (Zheng J. 2015)

Dalelių formos apibrėžimas gali atrodyti painus kalbant apie teorinių skaičiųimų pritaikymą praktikoje. Todėl kai kurie tyrėjai pasiūlė naudoti diagramas dalelių vizualiam palyginimui ir jų formos apibūdinimui. Šios diagramos galėtų palengvinti dalelių apvalumo ir sferiškumo lygio įvertinimą, panaudojant įprastines vizualines priemones (Zheng et al., 2015). Zingg (1935) daleles suklasifikavo naudodamas pailgumo (IL) ir plokštumo koeficientus (SL). Krumbein (1941) pateikė apvalumo palyginimo diagramą. Powers (1953) pasiūlė apvalumo skalę, kad būtų galima vizualiai palyginti ir rankiniu būdu nustatyti apvalumo ir sferiškumo vertes. Be to, Krumbein ir Sloss (1963) pasiūlė dalelių sferiškumo ir apskritumo

kombinacijų diagramą, kad įvertinti dalelių formą. Tada Cho (2006) modifikavo šią diagramą apibrėždamas dalelės formą kaip apskritumo ir sferiškumo aritmetinį vidurkį bei pridėdamas punktyrinę liniją prie siūlomos formos. Lees (1964) pasiūlė diagramą vizualiam dvimačiui (2D) dalelių kampuoatumui įvertinti. Blott ir Pye (2007) apjungė kitų autorių atliktus tyrimus ir pateikė keletą grafikų, apibūdinančių dalelių formą.

1.3.2. Mechaninės savybės

Pastaruosius tris dešimtmečius mokslininkai deda daug pastangų kurdami ypač didelio stiprumo cementbetonius. Šie kompozitai susideda iš portlandcementinio, inertinių mikroužpildų (maltas kvarcas), aktyvių mikroužpildų (SiO_2 mikrodulkės, metakaolinas), superplastifikatoriaus bei plieninių mikroplaušų. Šių betonų gniuždymo stipris paprastai siekia 150–200 MPa (Shi C. 2015). Prie specialių kietėjimo sąlygų, pavyzdžiui temperatūrą pakėlus iki 400 °C ir veikiant 40 MPa slėgiui, betonas gali pasiekti 800 MPa gniuždymo stiprį (Richard et al., 1995).

Šiame darbe nagrinėjami smulkiagrūdžiai betonai su nemetaliniais plaušais, todėl jų mechaninės savybės skiriasi nuo prieš tai paminėtų smulkiagrūdžių betonų su plieno mikroplaušu. Tačiau cementinės matricos taip pat ir jų modifikavimo būdai abiem atvejais yra panašūs. Labiausiai ištirtas mokslininkų ir naudojamas praktikoje yra dispersinis armavimas stiklo plaušu. Pagrindinės šio kompozito mechaninės savybės pateiktos 1.1 lentelėje.

Mokslininkų atlikti tyrimai parodė, kad takaus stiklo plaušu armuoto smulkiagrūdžio betono lenkimo stipris siekia 10–15 MPa, priklausomai nuo plaušo kiekio ir cementinės matricos sudėties. Peter (2015) nagrinėjo lenkimo stiprio priklausomybę nuo stiklo plaušo kiekio, plaušo ilgio, vandens ir cemento santykio ir plastifikatoriaus kiekio. Portlandcementis CEM I 52R buvo naudojamas kaip rišiklis, polikarboksilatų pagrindo superplastiklis kaip konsistenciją gerinanti įmaiša ir kvarcinis smėlis kaip užpildas. Bandymai parodė, kad lenkimo stipris padidėjo nuo 8 MPa iki 12 MPa, kai vandens ir cemento santykis buvo sumažintas nuo 0,42 iki 0,32. Plaušo kiekis turėjo didesnę įtaką lenkimo stipriui negu plaušo ilgis, kai buvo naudojami 12,5 mm ir 25 mm plaušai. Gautas vidutinis lenkimo stipris su 12,5 mm – 9 MPa, o su 25 mm – 10 MPa, kai plaušų kiekis 3 % nuo sausų medžiagų masės. Lenkimo stipris padidėjo nuo 8 MPa iki 13 MPa, kai 13 mm ilgio plaušo kiekis buvo padidintas nuo 2 % iki 4 %. Abe (2011) nagrinėjo stiklo plaušu armuotus betono mišinius su įvairiomis įmaišomis (orą įtraukiančiomis, skirtingo tipo plastifikatoriais, stabilizatoriumi, akrilo polimeru, metilceliulioze bei silicio dioksido mikrodulkėmis). Visų mišinių vandens ir cemento santykis buvo 0,3, plaušo kiekis – 3 %, o rišiklio ir kvarcinio smėlio užpildo santykis 1:1. Geriausia mišinio konsistencija gauta su plastifikuojančiu stabilizatoriumi, o

visų bandinių lenkimo stiprumas svyravo tarp 11–15 MPa, be ryškios koreliacijos kuriam nors komponentui.

1.1 lentelė. Smulkiagrūdžio stiklo plaušu armuoto betono pagrindinės mechaninės savybės (Bartos, 2017)

Table 1.1. Main mechanical properties of glass fiber reinforced concrete (Bartos, 2017)

Mechaninės savybės (po 28 parų)	Purškiamas betonas	Takus betonas
Betono tankis, kg/m^3	1900–2100	1800–2000
Deformacijų modulis, GPa	10–20	
Lenkimo stipris, MPa	18–30	5–14
Gniuždymo stipris, MPa	40–60	50–80
Smūginis tūsumas, kJ/m^2	7–12	15–25

Apie alternatyvių plaušų (bazalto, anglies, PVA) panaudojimą smulkiagrūdžio betono matricos armavimui yra mažai duomenų, mokslininkų atlikti tyrimai apsiriboja ties šių plaušų panaudojimu normaliesiems (stambiagrūdžiams) betonams.

Jiang (2014) nustatė, kad bazalto plaušas betono gniuždymo bei lenkimo stiprius padidina efektyviau nei polipropilenas, atitinkamai 4,68 % ir 9,58 % iki 47,48 MPa ir 8,4 MPa. Plaušo ilgis (12 mm arba 24 mm) reikšmingos įtakos sripruminių savybių pokyčiams neturėjo. Urkhanova (2014) pagerino bazalto plaušu armuoto normaliojo betono mechanines savybes plaušą impregnuojant nano SiO_2 (silicio dioksido nano suspensijoje). Plaušą dozuojant iki 3 kg/m^3 , betono gniuždymo bei lenkimo stipris padidėjo atitinkamai 27 % ir 60 %.

Naujausių mokslinių tyrimų duomenimis, galima pagerinti bazalto plaušo su kibimą su cementine matrica, bazaltą impregnuojant anglies nano vamzdelių suspensijoje. Förster (2016) nustatė, kad anglies nano vamzdeliai chemiškai reaguoja su bazalto plaušo paviršiumi, taip prie jo prisitvirtindami ir veikia kaip papildomi struktūriniai elementai, pagerinantys plaušo kontakto zoną su cementine matrica. Yakovlev (2015) nustatė, kad anglies nano vamzdeliais modifikuotas bazalto plaušas padidino betono kompozito gniuždymo ir lenkimo stiprius atitinkamai 25 % ir 92 %.

Polivinilo alkoholio plaušas (PVA) turi didelę įtaką betone atsiveriančių mikro įtrūkimų ir didesnių plyšių suvaržymui. Mokslininkų nustatyta, kad PVA plaušas pagerina betono mechanines savybes sumažindamas dėl valksnumo efekto atsirandančius plyšius, dėl ko padidėja betono ilgaamžiškumas (Sprince et al., 2013; Sprince et al., 2016). Arisoy (2008) ir Toutanji (2010) nustatė, kad

PVA plaušas padidino normaliojo betono lenkimo plastiškumą (įlinkį prie maksimalios apkrovos) iki 50–150 kartų, o lenkimo stiprį iki 50–250 %.

1.4. Skirtingų betono komponentų charakteristikos ir panaudojimas

Pagrindinės plaušų fizikinės bei mechaninės savybės, kurios charakterizuoja jų panaudojimo galimybes smulkiagrūdžio betono gaminių armavimui yra šios:

- Plaušo tempimo stipris, MPa, kuris lemia betono tempimo bei lenkimo stiprius.
- Deformacijų modulis, GPa. Kuo didesnis plaušo deformacijų modulis, tuo didesnis gaminio atsparumas lenkimo, tempimo deformacijoms. Pavyzdžiui, įprasto betono deformacijų modulis gniuždant arba tempiant siekia 40 MPa. Todėl, siekiant užtikrinti, kad gaminiai nevirsytų ribinių deformacijų ir nepradėtų pleišėti, plaušo deformacijų modulis negali būti mažesnis nei betono (Ngab et al., 2020; Paeglea et al., 2016; Gribniak et al., 2013).
- Atsparumas šarmams. Cementinei matricai būdingas didelis šarminumas, kuris plieną saugo nuo korozijos, tačiau chemiškai ardo kai kuriuos plaušus, todėl jie turi būti tinkamai apsaugoti nuo šarmų poveikio.
- Lydymosi temperatūra ir terminis atsparumas. Gyvenamuose arba komercinės paskirties pastatuose reikalaujamas pakankamai aukštas visų statinio elementų atsparumas ugniai, kuris dažnai išreiškiamas kaip minimalus laikas per kurį žmonės gali saugiai pasišalinti iš pastato vykstant gaisrui. Dažniausiai yra reikalaujama 60–90 minučių.
- Plaušo struktūra ir geometriniai matmenys. Šie parametrai lemia tiek mišinio konsistenciją, tiek sukietėjusio betono mechanines savybes, kurios priklauso nuo tinkamo plaušo pasiskirstymo tūryje ir sukibimo su cementine matrica.

Komercinio stiklo gamyboje naudojamas kvarcas, kuris yra išlydomas ir modifikuojamas įvairiais metalų oksidais (SiO_2 69,9 %, Al_2O_3 2,6 %, CaO 5,4 %, MgO 3,6 %, Na_2O 16,8 %) (Paul, 1977). Dėl intensyvios cheminės korozijos šarminėje terpėje, įprastinio stiklo plaušo negalima naudoti sistemose su portlandcementinio rišikliu. 1960-aisiais sukurto šarmams atsparaus stiklo cheminė sudėtis buvo patobulinta įtraukiant cirkonio oksidą: SiO_2 71 %, ZrO_2 16 %, Na_2O 12 % and Li_2O 1 %. Majumdar (1977) tyrinėjo 10 μm diametro šarmams atsparaus stiklo plaušo reakciją su portlandcementiniu skirtingose temperatūrose nuo 20 °C iki 65 °C. Bandymai parodė, kad naujasis cirkoniu modifikuotas stiklas vis tiek

praranda dalį pirminio stiprumo veikiant šarmams. Reakcijos greitis didėja kartu su temperatūra ir esant 20 °C aplinkos temperatūrai, nustatytas ilgalaikis stiklo plaušo tempimo stipris šarminėje terpėje – 1200 MPa.

1.2 lentelė. Skirtingų plaušų maksimalios mechaninės charakteristikos ir terminis atsparumas.

Table 1.2. Maximum mechanical properties and thermal resistance of different fibers.

Pagrindinės charakteristikos	Skirtingų plaušų savybės			
	Stiklas	Bazaltas	Anglis	PVA
Tempimo stipris, MPa	1500	3200	7000	1500
Deformacijų modulis, GPa	74	90	440	40
Terminis atsparumas, °C	–50...+350	–260...+700	300	100
Lydymosi temperatūra, °C	1100	1200	1200	200

Orlovsky (2005) tyrinėjo šarmų poveikį šarmams atsparaus stiklo plaušo ilgiamžiškumui, kai plaušas buvo panardinamas 13,5 pH tirpale 50 °C, neveikiant išorinėms apkrovoms. Po 45 parų bandiniai prarado iki 60 % pradinio tempimo stiprio. Autoriai patikrino plaušelių skersmenį po bandymo ir nenustatė jokie sumažėjimo. Tyrinėdami plaušo paviršių skenuojančiu elektroniniu mikroskopu, autoriai aptiko pavienius 40 nm dydžio defektus. Šiuo tyrimu nustatyta, kad cirkonio dioksidu modifikuoto stiklo senėjimas šarminėje terpėje nėra vien tik cheminis procesas ir gali būti labiau susijęs su paviršinių defektų atsiradimu.

Bazalto plaušas gaminamas iš vulkaninės kilmės uolienu, kurių lydymosi temperatūra siekia 1500–1700 °C. Šias uolienas sudaro piroksenų grupės mineralai, kurių sudėtyje vyrauja ir kai kurie stiklo plaušui būdingi oksidai: SiO₂ (44–47 %), Al₂O₃ (11–13 %), CaO (10–12 %), MgO (8–11 %), K₂O, Na₂O, Fe₂O₃ (<5 %) (Fiore et al., 2015; Dhand et al., 2015; Khandel et al., 2020). Kadangi bazalto cheminė sudėtis artima komerciniam stiklui, tikėtina, kad šiam plaušui taip pat būdingos reakcijos su cemento šarmais. Lee (2014) nustatė, kad po 90 parų mirkymo šarmų tirpale bazalto plaušas prarado iki 40 % pradinės masės bei 80 % pradinio stiprumo. Robinovic (2001) ir Wu (2011) atliko bandymus panardinant bazalto plaušą Ca(OH)₂ prisotintame tirpale. Nustatyta, kad po 3 mėnesių plaušas praranda iki 60 % pradinio stiprumo, o po 12 mėn. – 100 %. Plaušo reakcijos su šarmais greitis taip pat didėja kylant aplinkos temperatūrai (Afroz et al., 2017). Įvairūs mokslininkai tyrinėja būdus, kaip pagerinti bazalto plaušo atsparumą šarmams. Tiek mokslininkų, tiek pramoninėje bazalto plaušo gamyboje yra bandoma apsaugoti plaušo paviršių įvairiomis dangomis. Myadaraboina

(2015) ištyrė, kad padengus plaušą silano polimerais pilnai išlaikomos pradinės charakteristikos, kai plaušas buvo mirkomas 62 paras NaOH tirpale. Taip pat teigiamų rezultatų davė ZrO_2 ir TiO_2 dangos (Rybin et al., 2013; Baklanova et al., 2013).

Daugiau kaip 90 % anglies plaušo pagaminama naudojant poliakrilnitrilo žaliavą. Iš pradžių atliekama karbonizacija 400–1500 °C temperatūrų intervale, pašalinant nereikalingus elementus, kurie sudaro įvairius junginius su anglies atomais (vandenilis, deguonis, azotas ir kt.). Taip suformuojamos pirminės turbostratinės struktūros grafito grandinės ir gaunamas didelio stiprumo pluoštas. Siekiant padidinti deformacijų modulį, temperatūra keliama iki 220 °C, kurioje grafito grandinės dar labiau orientuojamos išilgai plaušo (Frank et al., 2014; Lu et al., 2020).

Polivinilo alkoholio plaušas (PVA) – tai sintetinis plaušas, laikomas vienu tinkamiausiu polimerų cementinės matricos armavimui (Saida et al., 2020). PVA gaminamas hidrolizės būdu iš polivinilo acetato, naudojant etanolį, kaip katalizatorių. Dėl savo sudėtyje esančių hidroksilo grupės jonų ($-OH$), PVA plaušas pasižymi ypač tvirtu cheminiu ryšiu su cementine matrica bei atsparumu neigiamam cemento šarmų poveikiui (Yang et al., 2010; Zhou et al., 2017). PVA pasižymi dideliu tempimo stipriu bei deformacijų modulių, atitinkamai 1500 MPa ir 40 GPa (Ahmad et al., 2018). PVA lydymosi temperatūra – 200 °C, kai tuo tarpu polipropileno – 160 °C, polietileno – 115 °C. Atlikti eksperimentiniai tyrimai rodo, kad PVA plaušu armuotas betonas praranda iki 17 % pradinio lenkimo stiprio, kai temperatūra pasiekia 145 °C (Magalhães et al., 2013). Kiti tyrimai parodė, kad veikiant 400 °C temperatūrai, betoninių prizmių su PVA lenkimo stipris buvo 45 % didesnis negu kontrolinių bandinių be plaušo (Tanyildizi et al., 2016).

Dispersiškai armuotų betonų mechaninių savybių pastovumo užtikrinimas – tai labai svarbus uždavinys tobulinant esamus ir kuriant naujus cementinius kompozitus. Šių kompozitų korozijos (senėjimo) procesus galima nuslopinti trimis būdais, nagrinėjama mokslinėje literatūroje: modifikuojant plaušų cheminę sudėtį, keičiant plaušo paviršiaus struktūrą ir modifikuojant cementinę matricą.

Akrilo polimerai betono pramonėje buvo pradėti naudoti 1980-aisiais, kaip betono kietinimo agentas, padedantis sutrumpinti betono gaminių kietinimo laiką, kuris tuo metu siekdavo 7 paras. Tačiau betono gamyboje yra plačiai naudojami modernūs polikarboksilatų esterio pagrindu gaminami superplastikliai, kurie leidžia sumažinti vandens ir cemento santykį, gaunant reikiamą mišinio konsistenciją ir todėl 7 parų kietinimas drėgnoje aplinkoje nėra būtinas (Rickard et al., 2015).

Kai kurie mokslininkai teigia, kad akrilo polimerai gali padidinti siklo plaušu armuoto betono ilgaamžiškumą. Akrilo polimerų suspensija paprastai dozuojaama tarp 7–10 % nuo cemento masės. Ball H (1993) tyrinėjo bandinius paimtus iš Didžiosios Britanijos klimato sąlygomis 19 metų eksploatuojamo pastato stiklo

plaušu armuoto betono fasado, kur gamybos metu buvo panaudota akrilo polimero suspensija. Nustatyta, kad bandiniai kurie buvo gaminti be akrilo polimero po 19 metų prarado iki 40 % pradinės deformacijos (plastiškumo), o elementai su 7 % akrilo beveik pilnai išlaikė pradinės pseudo-plastines charakteristikas. Taip pat buvo pastebėta, kad džiovinimo – drėkinimo bandymo metodas geriau atspindi realius senėjimo procesus negu mirkymas karštame vandenyje. Qian X (2003) tyrinėjo polivinilo alkoholio (PVA) miltelių priedo įtaką stiklo plaušu armuoto kompozito ilgaamžiškumui. 6 mm storio bandiniai buvo laikomi 20 °C temperatūros vandenyje pagal Litherland metodiką. Plokštelių tempimo stiprumo bandymai parodė, kad PVA priedas turi teigiamą įtaką kompozito ilgaamžiškumui, padidindamas tempimo stiprį ir išlaikydamas pirmines plastines savybes. Šio priedo efektyvumas buvo išaiškintas apžiūrėjus plaušo – matricos kontakto zonas, kur buvo matomos plonos apsauginės plėvelės, galimai saugančios nuo žalingo portlandito kristalų poveikio.

Aktyvūs mineraliniai priedai dažnai naudojami kaip betono komponentai kuriems būdingos pucolaninės reakcijos su portlandito fazėmis. Dėka šių reakcijų sumažinama $\text{Ca}(\text{OH})_2$ kristalų koncentracija, kurie augdami pažeidžia plaušo paviršių ir blogina kompozito ilgalaikes mechanines savybes. Dėl ypatingo smulkumo šie priedai sutankina cementinį akmenį, gerina ryšį tarp cemento ir užpildo dalelių, taip pagerindami cementinės matricos mechanines savybes. Tai gali būti paaiškinama poveikiu tarpinės fazės storiui tarp užpildo dalelių ir cementinės teslos, taip pat CH fazės kristalų orientacijai.

Silicio dioksido mikrodulkės (SiO_2) yra silicio ir ferosilicio pramonės šalutinis produktas. Redukuojant gryną kvarcą iki silicio, esant temperatūrai iki 2000 °C, susidaro SiO_2 garai, kurie žemos temperatūros zonoje oksiduojasi ir kondensuojasi iki mažų dalelių, susidedančių iš nekristalinio silicio dioksido (Siddique et al., 2011). Dėl pucolaninių reakcijų tarp SiO_2 ir kalcio hidroksido susiformuoja papildomi kalcio hidro silikatai (CSH), kurie išauga į tuštumas aplink hidratuotas cemento daleles. Tarpinės fazės zonos tankio didinimas ir ryšio tarp cemento bei užpildo dalelių gerinimas panaudojant SiO_2 mikrodulkių priedą buvo ne kartą įrodytas mokslininkų atliktais tyrimais (Köksal et al., 2008; Tasdemir et al., 2002). Naudojant SiO_2 mikrodulkių priedą betone, reikšmingai sumažėja chlorido jonų difuzija. Tai gali būti siejama su tuo, kad vykstant pucolaninėms reakcijoms kartu su cemento hidratacija stambios poros suskaidomos į mažesnes. SiO_2 mikrodulkės pagerina ilgalaikį atsparumą betono šarminiai korozijai, tačiau padidina karbonizacijos gylį (Khana et al., 2011). Bartos (1996) atlikti stiklo plaušu armuoto kompozito tyrimai parodė, kad silicio dioksido mikrodulkių priedas pagerina šios medžiagos ilgalaikes mechanines savybes.

Metakaolinas (MK), arba $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7$ yra gaunamas kalcinuojant kaolinito molį 700–800 °C temperatūroje. Dehidroksilizacija vyksta paveikus kaolinitą aukšta

temperatūra nustatyta laiko tarpą. Metakaolino (MK) pocolaninis aktyvumas cementiniame akmenyje yra plačiai ištirtas ir apibūdinamas kaip naujų kalcio hidro silikato fazių susidarymas (C_2ASH_8 , C_4AH_{13} ir C_3AH_6). Mokslininkų atlikti tyrimai pakeičiant dalį cemento metakaolinu (nuo 10 % iki 25 %) parodė, kad šis priedas pagerino cementinio akmens mechanines savybes bei padidino ilgaamžiškumą (Poon et al., 2001; Brooks et al., 2001; Courard et al., 2003). Pagrindinė metakaolino panaudojimo problema cementinėje tešloje yra padidėjęs vandens poreikis, kurį lemia didelis dalelių specifinis paviršiaus plotas ($17 \text{ m}^2/\text{g}$) ir netaisyklinga morfologinė struktūra – metakaolino dalelės yra plokštelių pavidalo) (Bai et al., 2003; Li et al., 2003).

Atlikus tyrimus su stiklo plaušu armuotais kompozitais, Brandt (2003) nustatė, kad kontroliniai bandiniai, be priedo, prarado 85 % pradinio lenkimo stiprio po 84 parų mirkymo 50°C temperatūros vandenyje. Bandiniai, kuriuose 40 % cemento buvo pakeista metakaolino priedu, beveik neprarado pradinių mechaninių savybių laikant juos analogiškoms sąlygoms. SEM – EDX analizės pagalba nustatyta, kad tarp stiklo pluošto plaušelių neatsirado portlandito kristalų intarpų, kuo buvo paaiškinta teigiama metakaolino įtaka stiklo plaušu armuoto kompozito ilgaamžiškumui.

Plaušo paviršiaus struktūros modifikavimas įvairiais impregnantaais bei dangomis yra dažnai naudojamas metodas plaušų gamintojų, siekiant pagerinti jų ilgalaikes charakteristikas naudojant juos cementinėse sistemose ir padidinti plaušų atsparumą įvairiems mechaniniams poveikiams transportavimo bei mišinio maišymo metu. Naujausios kartos ZrO_2 sudėtyje turintys stiklo plaušai yra padengiami keletos nano metrų storio organinių silano polimerų dangomis. Įvairūs mokslininkai tyrinėjo šių dangų įtaką stiklo plaušo savybėms. Silano polimerai plaušo paviršiuje sudaro erdvinius tinklelius, kurių dėka padidėja sukibimas tarp plaušo ir matricos, plaušas apsaugomas nuo vandens poveikio ir pagerinamos plaušo mechaninės savybės. Pluoštų tiesioginio tempimo bandymais nustatyta, kad silano polimerai perdengia plaušo paviršiuje esančius pažeidimus ir padidina pluošto deformacijų energiją (Zinck et al., 1999; Mader et al., 2004; Rothe et al., 2015). Naujausių mokslinių tyrimų duomenimis, teigiamą įtaką plaušų savybėms taip pat turi anglies nano vamzdeliais modifikuotos dangos. Panaudojant šias dangas, stiklo pluošto atsparumas tempimui padidėjo iki 50 % net po 7 parų mirkymo 5 % koncentracijos NaOH šarminiame tirpale 20°C temperatūroje (Gao et al., 2007).

1.5. Plaušu armuoto smulkiagrūdžio betono ilgaamžiškumas

1.5.1. Mechaninių savybių pastovumo vertinimo principai

Kiekvienos statybinės medžiagos eksploatacinių savybių pastovumas privalo būti įvertintas ir apibrėžtas. Dėl daugybės sudėtingų fizikinių ir cheminių procesų, kurie vyksta eksploatuojant statybos produktus natūraliomis klimato sąlygomis, jų mechaninės ir vizualinės charakteristikos blogėja. Pagal JAV statybos inžinierių sąjungos (ASCE) atliktus skaičiavimus, naujus statinius galima eksploatuoti be techninio aptarnavimo vidutiniškai 18,5 metų (Abanilla 2006). Ironiška, tačiau kiekvienas moderniais laikais pastatytas statinys yra mažiau ilgaamžis negu tie, kurie buvo statyti pagal dviejų tūkstantmečių senumo statybos technologijas, pavyzdžiui Didžioji Sančio Stupa (Indija, 200 m. pr. kr.), romėnų Pont du Gard akvedukas (Romos imperija, 19 m. pr. kr.), Romos Panteonas (Romos imperija, 118 m. pr. kr.).

Dispersiškai armuoti betonai – ne išimtis, garantuojanti išskirtinį eksploatacinių savybių pastovumą. Žinių trūkumas apie plaušų korozijos mechanizmus cementinėje matricoje gali nuvesti prie rimtų problemų eksploatuojant statinį. Kądangi stiklo plaušas yra seniausiai ir daugiausiai naudojamas praktikoje, jo korozijos mechanizmai yra ištirtinėti plačiausiai, galima rasti net kai kurių šalių nacionalines projektavimo rekomendacijas. Mokslinėje literatūroje trūksta duomenų apie kitų šiame darbe nagrinėjamų plaušų savybių pastovumo tyrimus. Todėl būtų naudinga išanalizuoti mokslininkų bei inžinierių sukaupę patirtį apie stiklo dispersiškai armuotų cementinių kompozitų eksploatacinių savybių pastovumą bei tyrimo metodus ir šiuos duomenis pritaikyti toliau tyrinėjant stiklo plaušo pakaitalus.

Pirmosios rekomendacijos apie stiklo plaušu armuotų kompozitų savybių pastovumą buvo suformuluotos 1956 metais Didžiojoje Britanijoje, vienos iš seniausiai veikiančių statinių ekspertų kompanijų – Pilkington Bros (1956) (1.8 pav.). Įvertinant ilgalaikį stiprumo mažėjimą, pradinė 21 MPa lenkimo stiprumo reikšmė po 28 parų kietėjimo buvo sumažinta 50 %. Pritaikius šiai medžiagai 1,75 atsargos koeficientą gautas 6 MPa ilgalaikis lenkimo stiprumas, kuris buvo rekomenduojamas projektuotojams vertinant ilgalaikes apkrovas, pavyzdžiui vėjo. Trumpalaikės stipruminės savybės (po paros, po savaitės) svarbios tik gamybos, transportavimo bei statybos stadijose, todėl vertinant gaminių iškėlimą iš formų, sandėliavimą bei montavimą galima naudoti faktines bandymais gautas betono stiprumines charakteristikas.

1.8 pav. Ilgalaikis lenkimo stipris pagal Pilkington Bros rekomendacija (1956 metai)

Fig. 1.8. Long term flexural strength according to Pilkington Bros recommendations (year 1956)

Nuo 1975 metų plačiai taikomas ribinių būvių projektavimo metodas, kuris puikiai tinka tokioms statybinėms medžiagoms, kaip plienas ar gelžbetonis, kurios turi aiškias ribas tarp elastinių ir plastinių ribinių būvių. Tačiau tokioms medžiagoms kaip mediena, aliuminis ir stiklo plaušu armuotas betonas ribinių būvių metodiką taikyti sudėtinga, kadangi jos neturi aiškios ribos tarp tiesinių ir plastinių deformacijų, todėl kai kurie mokslininkai rekomenduoja naudoti ribinio įtempio projektavimo metodologiją (Guan et al., 2015).

Australijos gelžbetonio gamintojų asociacija skatina projektuotojus naudoti realių bandymų duomenis vertinant stiklo plaušu armuoto betono mechanines savybes, kadangi jos stipriai priklauso nuo mišinio sudėties ir gamybos būdo (1.9 pav.). Purškimo metodu gaminamo betono 28 parų lenkimo stiprio žinomos vertės kinta tarp 21–35 MPa. Eksploatuojant gaminius natūralaus klimato sąlygomis lenkimo stipris palaipsniui mažėja kol nusistovi iki pastovios reikšmės. Anot minėtų Australijos rekomendacijų didžiausias ilgalaikis stipris – 17 MPa pasiekiamas su naujo tipo cementinėmis matricomis, pavyzdžiui modifikuojant meta-

kaolino priedu. Tipinių gamyboje naudojamų betonų ilgalaikis stiprumas Australijos klimato sąlygomis – 13,5 MPa, o Didžiosios Britanijos – 15,0 MPa. Šį skirtumą galima būtų paaiškinti tuo, kad šioms šalims būdingas skirtingo intensyvumo džiovimo – drėkinimo ciklų poveikis. Prastos kokybės betono mišiniams ir kai trūksta duomenų apie gamybos procesų kokybės kontrolę, siūloma priimti 4,5 MPa ilgalaikį lenkimo stiprį.

Takūs mišiniai su stiklo plaušu pradėti tyrinėti pakankamai neseniai, todėl trūksta duomenų apie jų ilgalaikį stiprumą. Tačiau minėtose Australijos betono asociacijos rekomendacijose pateikiama pastaba, kad takaus betono ilgalaikis stiprumas paprastai išlieka artimas ankstyvajam 28 parų, arba kai kuriais atvejais gali šiek tiek padidėti.

1.9 pav. Ilgalaikis lenkimo stipris purškimo metodu gaminamam stiklo plaušu armuotam betonui pagal Australijos betono gamintojų asociacijos rekomendacijas (2006 metai)

Fig. 1.9. Long term flexural strength for sprayed GRC according to Australian GRC industry Association recommendations (year 2006)

1.5.2. Mechaninių savybių pastovumo tyrimo metodai

Pastaruosius 60 metų daugybė mokslininkų tyrinėjo stiklo plaušu armuoto betono korozijos procesus, tačiau vieningos nuomonės šiuo klausimu kol kas nėra. Skaitant įvairius straipsnius šia tematika, beveik kiekviename galima rasti nuorodą į Litherland (1981) atliktą tyrimą, kuris iki šiol yra dažnai naudojamas kaip metodas greituoju būdu nustatyti šio kompozito ilgalaikėms mechaninėms charakteristikoms. Surinkęs daugybę empirinių duomenų, Litherland (1981) pasiūlė metodą

pagrystą bandinių laikymu karštame vandenyje keletą mėnesių. Nepaisant to, kad mokslininkas nepasiūlė teorinio modelio, jam pavyko nustatyti stiprią koreliaciją tarp stiprio mažėjimo ir mirkymo karštame vandenyje laiko. Nustatant kompozito ilgalaikes stiprumines savybes, šis tyrimo metodas daugybę metų buvo laikomas pagrindiniu.

Pirmieji ilgaaamžiškumo bandymų duomenys buvo pateikti 1979 metais po 10 metų stebėjimo natūraliomis klimato sąlygomis (Building Research Establishment, 1979). Vėliau Litherland (1981) sukūrė unikalų metodą (1.10 pav.), pagal kurį buvo nustatytas įvairių pluoštų ilgaaamžiškumas cementinėje matricoje (S.I.C. – *Strand In Cement test*). Empirinių tyrimų duomenys buvo ekstrapoliuoti 100 metų Didžiosios Britanijos klimato sąlygoms, o bandymo metodas buvo nesunkiai pritaikomas praktikoje.

1.10 pav. Pluošto cementinėje matricoje bandymo metodas (SIC testas).

Fig. 1.10. Strand in cement (SIC) test (Litherland 1981)

Abu minėti bandymo metodai paremti bandinių mirkymu vandenyje, kurio temperatūra buvo tarp 4 °C ir 80 °C skirtingus laiko intervalus, kurie truko iki 3 metų. Gautus duomenis Litherland atspausdino logaritminei skalėje ir pastebėjo, kad lenkimo stipris didėjant laikui mažėja visoms temperatūroms lygiagrečiomis linijomis nuo pradinės 30 MPa reikšmės iki stabilios 12 MPa, kuri reiškė ilgalaikį kompozito stiprumą. Gauti pagreitinoto bandymo metodo duomenys buvo palyginti su 10 metų stebėjimo rezultatais (Building Research Establishment, 1979) ir padaryta išvada, kad viena para mirkymo 50 °C temperatūroje atitinka 90 parų eksploataavimo Didžiosios Britanijos natūraliomis klimato sąlygomis.

Tačiau po 1990-ųjų kai kurie mokslininkai pradėjo abejoti ar šis metodas tinka betonams, kurie turi įvairių matricos struktūrą modifikuojančių priemaišų. Tokie priedai kaip metakaolinas, silicio mikrodulkės, aukštakrosnių šlakas ar pelenai sužadina sudėtingas pucolanines reakcijas aukštose temperatūrose, kurios nėra būdingos eksploatuojant natūraliomis klimato sąlygomis. Purnell P. abejojo standartinių tyrimų tinkamumu modifikuotoms portlandcemenčio matricoms.

Trijų tipų bandiniai su tipine portlandcemenčio ir modifikuotomis sulfoaliuminais bei metakaolinu matricomis buvo laikomi 20 °C, 38 °C ir 65 °C temperatūrose iki vienerių metų. Bandymai parodė, kad lenkimo stiprumo reikšmės po vienerių metų beveik nepakito bandiniams, kurie buvo laikomi 20 °C ir 38 °C temperatūrose. Tačiau 65 °C temperatūroje laikomų bandinių lenkimo stipris sparčiai mažėjo. Tipinės portlandcemenčio matricos bandymų duomenys stipriai koreliavo su Litherland gautais rezultatais. Tačiau abi modifikuotos matricos demonstravo labai keistą elgseną, kuomet pirmas 28 paras lenkimo stipris didėjo, o po to ėmė staiga mažėti (Purnell et al., 1999). Kiti panašūs tyrimai taip pat parodė panašius neatitikimus su standartiniu Litherland bandymo metodu kai tyrinėjamos aktyviais mineraliniais priedais (SiO_2 mikrodulkėmis bei metakaolinu) modifikuotos cementinės matricos (Peled 2005; Purnell 2001).

Bartos ir Zhu (1997) pasiūlė naują tyrimų metodą dispersiškai armuotų cementinių kompozitų ilgaamžiškumo vertinimui. Šis metodas pagrįstas Vikerso mikro kietumo bandymu plaušo – matricos kontaktinėje zonoje ir išstumiant plaušo šerdyje esančias gijas. Naudojant 0,7 mN tikslumo prietaisą mikrokietumas buvo matuojamas trijose skirtingose vietose: kontakto zonoje, pačios matricos ir šerdyje esančių plaušelių. Bandymų rezultatai parodė, kad pagal Litherland sendintų bandinių trapumo padidėjimas koreliuoja su mikro kietumo reikšmių didėjimu tiek cementinėje matricoje tiek pačiame plauše. Standartinėms portlandcemenčio matricoms gautas mikro kietumo reikšmių padidėjimas: 60 % pačios matricos, 10 % kontakto zonoje ir 140 % plaušo šerdyje. Šių mokslininkų atlikti tyrimai parodė, kad trintis tarp pluošto viduje esančių gijų padidėja veikiant matricos senėjimo procesams.

Prabėgus daugybei metų nuo šių kompozitų mokslinių tyrimų pradžios, labai mažai dėmesio buvo skiriama atsparumo užšaldymo ir atšildymo ciklų poveikio tyrimams. Tai gali būti susiję su tuo, kad šie kompozitai yra daugiausiai naudojami šilto – drėgno klimato zonose, tokiose kaip Austalija, Didžioji Britanija, Kinija, Saudo Arabija. Europos standartas LST EN 15191, kuriame įvardijami reikalavimai stiklo plaušu armuoto betono eksploatacinėms charakteristikoms siūlo atsparumą šalčiui bandyti pagal paviršinio šaldymo metodą, detaliau aprašytą LST EN 13198. Bandymas atliekamas užliejus bandinių paviršių vandeniu arba 3 % NaCl tirpalu ir veikiant užšaldymo ir atšildymo ciklais temperatūrai svyruojant tarp –20 °C ir +20 °C, kai vieno pilno ciklo trukmė yra 24 valandos. Bandymo metu fiksuojami masės nuostoliai nuo bandinių paviršiaus ir bet kokie vizualinio pobūdžio pažeidimai (suaizėjimai, atpleišėjimai). Vienintelis mokslinis tyrimas apie šio kompozito atsparumą šalčiui atliktas Enfedaque (2012) pagal minėtą paviršinio šaldymo metodiką. Po 50 užšaldymo ir atšildymo ciklų klimatinėje kameroje standartinės portlandcemenčio matricos bandiniai prarado iki 40 % pradinio lenkimo stiprio ir iki 80 % pradinės deformacijos, kompozitui tampant trapesne medžiaga su mažesniu lenkimo stipriu.

Realiomis klimato sąlygomis eksploatuojami gaminiai yra labiau veikiami džiovinimo/drėkinimo negu pastovaus mirkymo vandenyje. Toks bandymo metodas yra aprašytas standarte LST EN 1170-8, pagal kurį nustatomas ilgalaikis 10–20 metų amžiaus stiklo plaušu armuoto kompozito lenkimo stipris kuomet nagrinėjama klimato zonai nėra būdingi užšaldymo ir atšildymo ciklai. Bandymas reikalauja klimatinės kameros su temperatūriniu režimu tarp 20 °C ir 70 °C, automatinio drėkinimo ir ventiliavimo. Vienas pilnas drėkinimo/džiovinimo ciklas tęsiasi 48 valandas ir jį sudaro dvi fazės: mirkymas 20 °C temperatūroje ir džiovinimas prie 70 °C. Nepaisant to, kad šis tyrimo metodas yra artimesnis realaus klimato poveikiui, labai mažai mokslininkų turi galimybę jį pritaikyti ir vietoje to naudoja klasikinį Litherland (1981) išlaikymo karštame vandenyje metodą.

Enfedaque (2012) palygino dviem skirtingais metodais (paviršiniu šaldymu/atšildymu ir drėkinimu/džiovinimu) gautus lenkimo stiprio duomenis. Nustatyta, kad tipinės matricos bandiniai po 50 užšaldymo ir atšildymo ciklų prarado tokį pat kiekį pradinio stiprumo, kaip po 200 drėkinimo/džiovinimo ciklų. Galima daryti prielaidą, kad stiklo plaušu armuoto cementinio kompozito ilgalaikį stiprumą galima nustatyti naudojant paviršinio užšaldymo ir atšildymo bandymo metodą vietoje mirkymo karštame vandenyje arba džiovinimo drėkinimo pagal LST EN 1170-8, kuris paprastai užtrunka žymiai daugiau laiko (iki 8 kartų), gaunant tuos pačius duomenis.

1.5.3. Stiklo plaušu armuoto betono korozijos procesai

Stiklo sudėtyje esantys oksidai yra nestabilūs šarminėje terpėje dėl sudėtingų hidratacijos procesų. SiO₂ migracija į šarminį tirpalą yra lėtas procesas, tačiau labai suintensyvėja, kai pH viršija 10. Cementinės matricos agresyvioje šarminėje terpėje, kur pH siekia 12 pirmieji nuo stiklo paviršiaus atskykla natrio jonai, paskui kuriuos seka ir Si–O–Si struktūros, kurios yra ardamos hidroksilo OH[–] jonų (Paul, 1977):

Ilgą laiką buvo manoma, kad pagrindinė stiprio mažėjimo priežastis yra cheminės reakcijos stiklo plaušo ir cementinės matricos kontaktinėje zonoje (1.11 pav.). Tačiau mokslininkų atlikti empiriniai tyrimai šią prielaidą paneigė, nes atlikus ilgaamžiškumo bandymus pagal Litherland (1981) ir imant mėginius iš eksploatuojamų pastatų reikšmingų cheminių reakcijų požymių kontakto zonoje ar plaušo skerspjuvio sumažėjimo nepastebėta (Bentur et al., 1985; Cohen et al., 1985; Diamond et al., 1985; Jaras et al., 1975). Remdamasis šių tyrimų duomenimis, Purnell (2001) metais pasiūlė stiklo plaušu armuoto betono korozijos teorinį

modelį, pagrįstą nano įtrūkimų atsiradimu plaušo paviršiuje. Šis reiškinys mokslinėje literatūroje yra vadinamas statiniu nuovargiu ir apibūdinamas kaip laipsniškas SiO_2 ryšių trūkinėjimas ties plyšio viršūne veikiant statinei apkrovai (1.12 pav.)

1.11 pav. Cheminiai procesai, vykstantys stiklo plaušo paviršiuje veikiant šarminiam tirpalui (Orlovsky et al., 2005)

Fig. 1.11. Chemical processes on the glass filament surface (Orlovsky et al., 2005)

1.12 pav. Plyšio stiklo plaušo paviršiuje didėjimas dėl matricoje susidarančių vidinių įtempių (Purnell, 2005)

Fig. 1.12. Fiber surface flaw growth due to inner stress (Purnell, 2005)

Statinio nuovargio procesas priklauso nuo tokių faktorių kaip, stiklo plaušo cheminė sudėtis, matricos pH, vidinių įtempių dydžio ir temperatūros. Dėl statinio nuovargio stiklui būdingas staigus suirimas veikiant įtempiams, kurie yra mažesni negu būdingi pradinių savybių medžiagai. Žinodamas, kad šio kompozito korozijos reakcijos greitis priklauso nuo temperatūros, Purnell (2005) prognozuoja ilgalaikį stiprį S priklausomai nuo laiko t pagal klasikinę Artenijaus priklausomybę ir remdamasis mokslininkų atliktais ilgaamžiškumo bandymais:

$$S = \frac{1}{\sqrt{1 + k_0 e^{\left(\frac{-\Delta G}{RT}\right)} \cdot t}}, \quad (1.1)$$

čia, t – kompozito amžius, paromis; T – aplinkos temperatūra, K; R – universalioji dujų konstanta, $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; ΔG – korozijos proceso aktyvacijos energija J/mol, k_0 – prie-eksponentinis koeficientas stiprumo sumažėjimui.

Būtina paminėti, kad k_0 yra unikalus dydis būdingas konkrečiai sudėčiai ir veikiančiai temperatūrai. Aktyvacijos energija tipinei portlandcemenčio matricai $\Delta G = 89\text{--}93 \text{ kJ/mol}^{-1}$. Tolimesni mokslininkų atlikti tyrimai su modifikuotomis portlandcemenčio matricomis parodė, kad sudėtims turinčioms metakaolino ar sulfoaliuminatų dėl ko sumažėja Ca(OH)_2 kiekis, būdinga korozijos reakcijos aktyvacijos energija $\Delta G = 57\text{--}59 \text{ kJ/mol}^{-1}$, kas yra žymiai mažiau nei tipinei portlandcemenčio matricai. Pagal 1.1 formulę, cementinė matrica su mažesne aktyvacijos energija turės didesnę ilgaamžiškumą (Purnell et al., 2008).

Plaušo ir cementinės matricos sukibimas gali būti nustatomas pluošto ištraukimo būdu, bandant tą patį pluoštą, iš kurio yra pagamintas stiklo plaušas. Turint omenyje, kad pluoštą ar plaušą sudaro daugybė pavienių gijų, tik išorinės, kurios turi tiesioginį kontaktą su matrica, perima didžiausią dalį tempimo įtempių. Giliau esančioms gijoms įtempiai perduodami tik trinties jėgų pagalba. Laws (1986) atliko stiklo pluošto ištraukimo bandymus su įvairiais pluošto inkaravimo ilgiais cementinėje matricoje, nuo 1,5 mm iki 10 mm. Pluoštas buvo sudarytas iš 200 pavienių gijų, kurių kiekvienos diametras 12,5 μm . Bandymų rezultatai parodė, kad ištraukimo jėga vienam plaušui lygi 0,4 kN, kai inkaravimo ilgis 10 mm. Taip pat ištraukimo jėga bėgant laikui padidėjo, kai bandiniai buvo laikomi 20 $^{\circ}\text{C}$ vandenyje. Butler (2009) skenuojančiu mikroskopu tyrinėjo iš cementinės matricos ištraukto stiklo plaušo paviršių. Tyrimai parodė, kad pagrindinė blogo sukibimo su cementine matrica priežastis yra trapios portlandito fazės, kurios dominuoja portlandcemenčio matricoje. Geresnis plaušo sukibimas buvo nustatytas betono sudėtyse su mažesniu cemento klinkerio kiekiu ir panaudojus pucolaninius priedus, kurie sumažina cementinės matricos šarmingumą.

Mokslininkai vieningai sutaria, kad plaušo kontakto zonoje augantys Ca(OH)_2 kristalai turi neigiamą įtaką kompozito ilgaamžiškumui. Mikroskopiniai tyrimai parodė, kad Ca(OH)_2 kristalams būdingos aštriabriaunės formos, todėl vykstant hidratacijos procesams ir didėjant vidiniams įtempiams matricoje dėl

kristalų augimo plaušo paviršiuje gali atsirasti pažeidimų ir toliau dėl prieš tai aptarto statinio nuovargio reiškinio kompozito ilgalaikis stiprumas sumažėja (Huijun et al., 2013; Purnell et al., 1999; Mills et al., 1981).

Smulkiagrūdžiuose cementiniuose kompozituose paprastai sunaudojama 3–4 kartus daugiau cemento, negu įprastiniuose betonuose. Taip suformuojama labai tanki kapiliarų sistema, per kurią gali migruoti drėgmė. Džiūvimas – brinkimas gali bet kurioje medžiagoje sukelti vidinių įtempių svyravimus, dėl kurių medžiaga gali supleišėti. Laboratorijos sąlygomis nustatyta, kad po 96 parų džiovinimo – brinkimo bandymų stiklo plaušu armuoto cementinio kompozito maksimalios susitraukimo – brinkimo deformacijos yra tarp 0,08–0,1 % (Theodorakopoulou, 1995). Turkijoje buvo atliktas tyrimas matuojant realių gabaritų elementų deformacijas, laikant juos natūraliomis klimato sąlygomis 5 metus, kuomet užfiksuoti temperatūrų svyravimai buvo tarp -7°C ir 37°C . Prie šių sąlygų nustatytos didžiausios susitraukimo deformacijos siekė 0,25 %, o brinkimo 0,18 %. Bandinių paviršiuje įtrūkimų nebuvo užfiksuota (Ispir, 2015). Correia (2005) ty-

rinėjo 20 metų senumo sutrūkinėjusį pastato fasadą. Nustatyta, kad trūkiai stiklo plaušu armuoto cementinio kompozito fasadinėse plokštėse atsirado dėl temperatūrinių deformacijų, kurios sukėlė vidinius tempimo įtempius, siekiančius 4–6 MPa dėl per daug standžiai įrengtų sieninių elementų tvirtinimo mazgų. Tuo tarpu pačio betono tempimo stipris siekė vos 2,5 MPa dėl to, kad gamintojas panaudojo šarmams neatsparų stiklo plaušą.

Cementinio akmens karbonizacija yra labai lėtas procesas kuomet $\text{Ca}(\text{OH})_2$ reaguoja su atmosferiniu CO_2 taip suformuodami naują mineralą CaCO_3 , vadinamą kalcitu, kuris yra stipresnis už $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ir sąlygoja betono gniuždymo stiprio padidėjimą. Vykstant šiai reakcijai, betono pH sumažėja ir pranyksta plieninę armatūrą nuo korozijos sauganti šarminė aplinka. Tačiau stiklo plaušu armuotiems cementiniams kompozitams karbonizacija yra teigiamas procesas, nes sumažėja $\text{Ca}(\text{OH})_2$ kristalų kiekis, kurie žalingai veikia plaušo paviršių. Augantys CaCO_3 kristalai užpildo poras, taip sutankindami cementinę matricą, kurios stiprumas padidėja iki 70 % lyginant su pirmine būseną. Purnell (2001) tyrinėjo ypač – kritinės karbonizacijos (scCO_2) poveikį stiklo plaušu armuoto betono mechaninėms savybėms. Bandiniai buvo veikiami 24 valandas didelės koncentracijos CO_2 dujomis esant 10 MPa slėgiui ir 59°C temperatūrai, po to mirkomi 56 paras karštame vandenyje pagal Litherland (1981) metodą. Karbonizacija padidino cementinės matricos stiprį iki 70 %, plaušo – matricos sukibimą 3 kartus ir bandiniai atlikus lenkimo bandymus nerodė jokių trapumo požymių (1.13 pav.).

1.13 pav. Skenuojančio elektroninio mikroskopo nuotrauka: 28 paras karbonizuotas bandinys (Purnell et al., 2001)

Fig. 1.13. Scanning electron micrograph: aged (28days) carbonated sample (Purnell et al., 2001)

1.5.4. Korozijos procesų vertinimas pagal betono lenkimo deformacijų energiją

Dėl betone vykstančių įvairių korozijos procesų keičiasi medžiagos stipruminės charakteristikos. Betoninių ir gelžbetoninių elementų stiprumui charakterizuoti dažniausiai naudojamas lenkimo, gniuždymo bei tempimo stipris. Tačiau tokioms pseudo-plastinėms medžiagoms kaip dispersiškai armuoti betonai šių charakteristikų neužtenka, kad galima būtų įvertinti medžiagos darbą iki visiško suardymo. Šiai medžiagai būdingos didelės plastinės deformacijos, todėl tikslinga naudoti lenkimo deformacijų energiją vertinant mechaninių savybių pakitimus dėl korozijos procesų poveikio.

Lenkimo metu dispersiškai armuoto betono paviršiuje mikroplyšiai auga tol, kol priešais plyšius atsiranda didesnio stiprumo sritis, galinti atlaikyti koncentruotus įtempius. Šioje srityje gali būti didesnis plaušelių kiekis, nei šalia esančių. Tokiu atveju, vieno plyšių augimas sustoja, o kitų esančių šalia plotis pradeda didėti. Atsirandant naujiems plyšiams ir didėjant jų pločiui, didėja apkrova, kurią atlaiko bandinys. Pasiekus bandinio stiprumą, lūžis įvyksta ties silpniausiu mikroplyšiu, ties kuriuo bandinys padalinamas į dvi dalis (Enfedaque et al., 2010).

Dėl nepakankamo lenkimo stiprio bandinyje gali atsirasti įtrūkimų, tačiau pagal irimo mechanikos teoriją, trapų suirimą dažniausiai lemia nepakankamas atsparumas suardymui. Mokslininkų nustatyta, kad stiklo plaušu armuoto betono atsparumas suardymui mažėja didėjant bandinio amžiui, tai yra lenkimo deformacijų

kreivė įgauna vis didesnę nuolydį. Šio betono suirimo pobūdis yra panašus į traupaus betono, išskyrus tai, kad papildomo atsparumo suardymui suteikia plaušelių ištraukimui iš cementinės matricos reikalingas darbas. Todėl iš principo dispersiškai armuoto betono suirimas nagrinėjamas atsižvelgiant į betono irimo mechanikos dėsnius (Cheng et al., 2019).

Hillerborg (1976) pasiūlytas virtualaus plyšio modelis (FCM) apibūdina trūkių betone atsiradimą ir plėtrą. 1985 m. Tarptautinė statybinių medžiagų, sistemų ir konstrukcijų laboratorijų ir ekspertų sąjunga (RILEM) priėmė Hillerborg pasiūlytą eksperimentinį metodą kaip standartinę betono suardymo energijos bandymų metodiką. Visais atvejais rekomenduojamas keturių taškų lenkimo bandymas. Ši keturių taškų apkrova sukelia vienodus maksimalius įtempius bandinio viduriniame trečdalyje, skirtingai nei trijų atramų schemeje, kai maksimalūs įtempiai gaunami tik jėgos pridėjimo taške. Bandiniui suardyti reikalingą darbą sudaro lenkimo mašinos atliktas darbas ir papildomas darbas nuo bandinio savojo svorio. Bendras suardymo energijos kiekis yra:

$$W = W_0 + W_1, \quad (1.2)$$

W_0 yra plotas po lenkimo deformacijų kreivės. W_1 yra papildomas darbas nuo bandinio svorio. Sunku tiksliai apskaičiuoti bandinio svorio atliktą darbą. Kadangi papildomas darbas (W_1) yra daug kartų mažesnis nei mašinos atliekamas darbas (W_0), papildomas darbas gali būti apytiksliai išreikštas bandinio svorio (mg) ir didžiausios deformacijos sandauga (v_{max}). Didžiausia deformacija užfiksuojama tuomet, kai bandinio liekamasis stiprumas pasiekia 20 % maksimalios lenkimo stiprio reikšmės. Taigi, suardymo energiją galima išreikšti:

$$W = W_0 + mgv_{max}. \quad (1.3)$$

RILEM metodas pagrįstas bandinio suardymo darbo principu. Daroma prielaida, kad išsklaidyta elastinė deformacijos energija nuteka į lūžio zoną, kai įvyksta galutinis suardymas, tai yra išorinės jėgos atliktas darbas yra pilnai panaudojamas plyšio ploiui didėti (Zhang et al., 2008). Išorinių jėgų atliktas darbas galiausiai transformuojamas į plaušu armuoto betono suardymo energiją. RILEM rekomenduoja lenkimo deformacijų energiją skaičiuoti pagal šią formulę:

$$G_f = \frac{W_0 + mgv_{max}}{A_{lig}}, \quad (1.4)$$

čia: G_f – lenkimo deformacijų (bandinio suardymo energija), Nm^{-1} ; W_0 – bandymų mašinos atliktas darbas, apskaičiuojamas kaip plotas po lenkimo deformacijų kreivės, Nm ; mg – bandinio svoris, N ; v_{max} – deformacija prie 20 % maksimalios lenkimo stiprio reikšmės; A_{lig} – bandinio plyšio plotas, m^2 .

1.6. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas

Atlikus literatūros analizę paaiškėjo, kad:

1. Dispersinis betono armavimas stiklo, bazalto, aglies bei polivinilo alkoholio plaušais padidina betono lenkimo stiprį ir standumą.
2. Kadangi smulkiagrūdžiams betono mišiniams yra naudojamas labai mažas vandens kiekis, o sudėtyje yra daug smulkiųjų dalelių, įprasti betono maišymo būdai nėra tinkami, nes neužtenka energijos permaišyti dideliame kiekiui smulkių dalelių ir gauti reikiamą mišinio konsistenciją. Todėl tokio betono gamyboje dažniausiai naudojamas intensyvaus maišymo metodas, kuomet maišyklės mentės sukasi iki 1500 aps./min greičiu.
3. Seniausiai naudojamas gaminių formavimo būdas panaudojant plaušu armuotą betoną yra purškimo metodas. Naudojant didelio efektyvumo plastifikuojančius priedus galima sukurti takius apdailinio betono mišinius su dispersiniu armavimu.
4. Apdailinių plonasienių betono elementų gamybai iki šiol dažniausiai buvo naudojamas šarmams atsparus stiklo plaušas, tačiau tobulėjant pluoštų gamybos technologijoms tikslinga būtų ieškoti galimybių stiklą pakeisti kitais plaušais.
5. Stiklo plaušą cementinėje matricoje veikia sudėtingi korozijos procesai, dėl kurių laikui bėgant betono kompozitas iš pseudo-plastiškos medžiagos tampa trapia ir mažėja jo lenkimo stiprumas bei lenkimo deformacijų energija.
6. Siekiant cementinėje matricoje sumažinti šarminių portlandito mineralų, sukeliančių žalingus korozijos procesus stiklo plaušo paviršiuje kiekį, galima panaudoti aktyvius mineralinius priedus, kurie modifikuoja cementinio akmens mikrostruktūrą.

Siekiant sukurti dispersiškai armuotą betoną, tinkamą surenkamųjų sieninių elementų gamybai, kai gaminiai eksploatuojami agresyviomis Baltijos regiono klimato sąlygomis, reikia spręsti šiuos uždavinius:

1. Parinkti žaliavas ir jų proporcijas apdailinio betono kompozitui surenkamųjų sieninių elementų gamyboje, kurios užtikrintų gaminio atsparumą trapiam suirimui ir pleišėjimui.
2. Nustatyti stiklo, bazalto, aglies ir polivinilo alkoholio plaušų poveikį plonasienių gaminių apdailinio betono technologinėms bei mechaninėms savybėms kai betono mišiniai ruošiami intensyvaus maišymo būdu.

3. Nustatyti kvarcinio smėlio, granito atsijų bei įprastinio žvyro karjerų smėlio užpildų dalelių formos poveikį dispersiškai armuoto smulkiagrūdžio betono konsistencijai bei segregacijai.
4. Nustatyti SiO_2 mikrodulkių ir metakaolino mineralinių priedų poveikį dispersiškai armuoto betono atsparumui cikliškam užšaldymui ir atšildymui, vertinant betono apdailinio paviršiaus defektus – atskilusio cementinio akmens kiekį ir lenkimo deformacijų energijos pokyčius, kai numatoma gaminio eksploatavimo trukmė – ne mažiau 20 metų.
5. Ištirti plaušo paviršiaus struktūros pokyčius dėl užšaldymo ir atšildymo ciklų poveikio, kai cementinė matrica modifikuojama SiO_2 mikrodulkių ir metakaolino aktyviais mineraliniais priedais.

Kompozitui sukurti naudotos medžiagos ir tyrimo metodai

Šiame skyriuje aprašomos moksliniame tiriamajame darbe naudotos medžiagos bei jų savybės. Pateiktos tyrinėtų betono mišinių sudėtys, aprašytas pasirinktas betono maišymo procesas ir bandinių formavimas. Aptariami tyrimo metodai bei naudota laboratorinė įranga.

Skyriaus tematika paskelbti septyni autoriaus straipsniai (Moceikis et al., 2017, 2018a, 2018b, 2018c, 2019a, 2019b, 2020).

2.1. Naudotos medžiagos

Šiame tiriamajame darbe pasirinktos medžiagos, užtikrinančios geras dispersiškai armuotų betono mišinių technologines charakteristikas ir kompozitų mechanines savybes. Technologinės charakteristikos apibūdinamos mišinio konsistencijos parametrais ir maža segregacija, o esminės mechaninės savybės – lenkimo stipriu ir lenkimo deformacijų energija.

Stiklo, bazalto, anglies ir polivinilo alkoholio plaušams būdingas žymiai didesnis tempimo stipris ir deformacijų modulis negu cementinės matricos. Remiantis literatūros analize, pasirinktas stiklo plaušo kiekis – 2,9 % nuo sausų medžiagų

masės, kuris užtikrina gerą mišinio konsistenciją ir suteikia kompozitui didelį lenkimo stiprį ($>10\text{MPa}$). Kitų plaušų proporcijos taip pat parinktos atsižvelgiant į šias savybes.

Kvarcinio smėlio užpildas užtikrina gerą mišinio konsistenciją dėl vyraujančių apvalios formos dalelių. Tačiau dėl šio užpildo ribotų išteklių šiame darbe taip pat buvo panaudotas Lietuvos žvyro karjerų įprastinis smėlis ir nerūdinių medžiagų gamybos atlieka – granito atsijos. Pasirinktas užpildo ir rišiklio santykis (1:1) užtikrina didelį cementinės matricos tankį ($> 2000\text{ kg/m}^3$), kuriam didėjant atitinkamai gerėja ir betono mechaninės savybės.

Šiuolaikiniai gamybos procesai reikalauja didelio ankstyvojo stiprio po 20 valandų išformuojant gaminį. Todėl pasirinktas greitai kietėjantis CEM I 52,5R klasės portlandcementis, kuris modifikuojamas aktyviais SiO_2 mikrodulkių ir metakolino mineraliniais priedais, kuriems būdingas didelis amorfinio SiO_2 kiekis. Didelis šių priedų kiekis ($> 10\%$) betono mišinyje gali neigiamai paveikti betono ankstyvąjį stiprį, todėl pasirinkta jų naudoti iki $7,5\%$ nuo cemento masės.

Atliekant tyrimus visoms betono mišinių sudėtims buvo panaudotas vienodų charakteristikų portlandcementis CEM I 52,5R, gaminamas pagal standarto LST EN 197-1: 2011 reikalavimus. Gamintojo deklaruojama cheminė ir mineraloginė sudėtis pateikta 2.1 ir 2.2 lentelėse.

2.1 lentelė. Portlandcemenčio CEM I 52,5R cheminė sudėtis, %

Table 2.1. Chemical composition of Portlandcement CEM I 52,5R, %

CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Na ₂ O _{eq}	Cr
63,99	19,84	5,24	2,99	1,55	3,05	0,78	0,25	0,76	0,062

2.2 lentelė. Portlandcemenčio CEM I 52,5R mineraloginė sudėtis, %

Table 2.2. Mineral composition of Portlandcement CEM I 52,5R, %

C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
53,56	17,23	1,43	10,4

Kadangi rišiklio dalelių dydis turi didelį poveikį mišinių konsistencijai ir stipruminėms savybėms, buvo nustatytas portlandcemenčio dalelių pasiskirstymas pagal dydį, naudojant lazerinį kietųjų dalelių analizatorių CILAS 1090 Liquid, kuris pateiktas 2.1 paveiksle.

2.1 pav. Portlandcemenčio CEM I 52,5R dalelių pasiskirstymas pagal dydį
Fig. 2.1. Particle size distribution of Portlandcement CEM I 52,5R

Tyrimuose buvo naudojami tik smulkūs užpildai, kurių didžiausios dalelės $d_{max} = 2$ mm. Pasirinkti keli skirtingos granulometrijos ir kilmės užpildai: natūralus kvarcinis smėlis ($d_{max} = 1,25$ mm), granito atsijos ($d_{max} = 2$ mm), natūralus žvirgždo karjerų smėlis ($d_{max} = 2$ mm). Granulimetrinės sudėtys nustatytos pagal standartą LST EN12620:2003+A1:2008 naudojant standartinę sietų rinkinį betono užpildams (63 μ m; 125 μ m; 250 μ m; 500 μ m; 1 mm; 2 mm; 4 mm). Užpildų granulimetrinės kreivės pateiktos 2.2 paveiksle.

2.2 pav. Užpildų granulimetrinės kreivės
Fig. 2.2. Particle size distribution of aggregates

Cementinės matricos struktūros modifikavimui parinkti priedai, kurie yra dažnai naudojami inžinerinėje praktikoje, siekiant pagerinti įvairias apdailinių betonų savybes. Panaudoti aktyvūs mineraliniai užpildai miltelių pavidale – SiO_2 mikrodulkės ir metakaolinas, kurių dalelių konglomeratų pasiskirstymas pagal dydį nustatytas lazeriniu analizatoriumi CILAS 1090 Liquid ir pateiktas 2.3 ir 2.4 paveiksluose. Dalelių forma bei pavienių dalelių dydis nustatyta skenuojančiu elektroniniu mikroskopu bei pateiktas 2.5 ir 2.6 paveiksluose.

2.3 pav. SiO_2 mikrodulkių dalelių konglomeratų pasiskirstymas pagal dydį

Fig. 2.3. Particle konglomerates size distribution of silica fume

2.4 pav. Metakaolino dalelių konglomeratų pasiskirstymas pagal dydį

Fig. 2.4. Particle konglomerates size distribution of metakaolin

2.5 pav. SiO₂ mikrodulkių SEM nuotrauka (didinimas 150 000 kartų)

Fig. 2.5. SEM micrograph of silica fume at 150 000x magnitude

2.6 pav. Metakaolino SEM nuotrauka (didinimas 150 000 kartų)

Fig. 2.6. SEM micrograph of metakaolin at 150 000x magnitude

Cementinės matricos plastifikavimui buvo naudojamas dideliu efektyvumu pasižymintis ir praktikoje plačiai naudojamas polikarboksilatų esterio pagrindu gaminamas superplastiklis, kurio sausų dalelių kiekis 30 %, rekomenduojamos dozavimo ribos normaliajam betonui 0,8–2 % nuo cemento masės.

Cementinės matricos armavimui pasirinkti keli skirtingi plaušai (fibros) – stiklo, bazalto, anglies bei polivinilo alkoholio (PVA), kurių pagrindinės charakteristikos pateiktos 2.3 lentelėje. PVA plaušas buvo pasirinktas dėl didelio deformacijų modulio (40 GPa), lyginant su dažnai naudojamais polipropileno ar poliolefino plaušais (< 10 GPa). Didžiausia dalis tyrimų atlikta su šarmams atspariu

stiklo plaušu, kiti buvo naudojami kaip alternatyva siekiant gauti panašias arba geresnes mišinių bei sukietėjusio betono savybes.

2.3 lentelė. Plaušų pagrindinės savybės

Table 2.3. Main physical characteristics of filaments

Pagrindinės charakteristikos	Skirtingų plaušų savybės			
	Stiklo	Bazalto	Anglies	PVA
Tempimo stipris, MPa	1400	3200	3000	800
Deformacijų modulis, GPa	74	90	350	40
Terminis atsparumas, °C	–50...+350	–260...+700	300	100
Lydymosi temperatūra, °C	1100	1200	1200	225
Savitasis tankis, kg/m ³	2500	2700	1570	1300
Fibros ilgis, mm	12	12	12	12
Plaušų kiekis fibreje, vnt.	200	1500	3000	1
Vieno plaušo skersmuo, μm	18	17	5	660

2.2. Mišinių sudėtys

Atlikus mokslinės literatūros apžvalgą ir įvertinus pirminių eksperimentinių tyrimų rezultatus, sukurta bazinė SPAB betono matricos sudėtis, kuri buvo modifikuojama panaudojant skirtingus užpildus, plaušus bei priedus. Bazinei sudėčiai panaudotas rišiklio ir užpildo santykis 1:1, superplastiklio kiekis – 1,1 % nuo rišiklio masės, maksimalus plaušo kiekis – 2,9 % nuo kietų medžiagų masės, vandens ir rišiklio santykis – $V/C = 0,36$.

Tyrimuose naudotų betono mišinių sudėčių ruošimo principinė schema yra pateikta 2.7 paveiksle, o maišymo procesas aprašytas 2.3.1 skyrelyje. Visos sudėty pateiktos E priede.

Tiriant skirtingų plaušų poveikį SPAB bazinės matricos savybėms, pasirinktas kontrolinis stiklo plaušo kiekis – 2,9 % nuo kietų medžiagų masės. Bazalto ir anglies plaušų kiekis sumažintas dėl jų didelio poveikio mišinio konsistencijai. PVA plaušo kiekis perskaiciuotas pagal savitąjį tankį ir atitinka stiklo plaušo kiekį tūrio vienetais, kai pagal masę – 1,5 % nuo kietų medžiagų masės.

2.7 pav. Smulkiagrūdžio betono mišinių ruošimo schema ir betono sudėčių komponentai
Fig. 2.7. Concrete mix preparation scheme and used components

Siekiant įvertinti skirtingų užpildų poveikį bazinės sudėties SPAB matricos konsistencijai bei mechaninėms savybėms, dalis kvarco buvo keičiama alternatyviais užpildais – granito atsijomis bei natūraliu smėliu, keičiant jų kiekį iki 50 %, intervalais kas 10 % (0 %, 10 %, 20 %, 30 %, 40 %, 50 %). Visoms šioms sudėtims buvo naudojamas stiklo plaušas.

Trečioji betono mišinių grupė skirta įvertinti mineralinių priedų poveikį SPAB betono šalčio atsparumui. Mineralinių priedų (metakaolino ir SiO_2 mikrodulkių) kiekiai buvo 0 %, 2,5 %, 5 % bei 7,5 % nuo rišiklio masės.

2.3. Tyrimo metodai

2.3.1. Mišinių ruošimas ir bandinių formavimas

Šiame tiriamajame darbe pasirinkta naudoti intensyvų maišytuvą (2.8 pav.), nes naudojant standartinę betono maišyklę, tolygiai permaišyti smulkių dalelių bei mažo vandens ir cemento santykio betono mišinį yra labai sudėtinga.

Atlikus seriją bandomųjų maišymų ir remiantis literatūroje pateiktomis rekomendacijomis, pasirinktas optimalus mišinių ruošimo režimas. Pirma supilamas vanduo, superplastiklis bei užpildas ir mišinys lėtai permaišomas 20–30 s, kad užpildo dalelės pilnai sudrėktų. Po to dozuojamas rišiklis bei priedai ir mišinys maišomas 2 min maksimaliu maišytuvo greičiu – 1000 aps./min, kol pasiekia pastovią konsistenciją. Galiausiai supilamas plaušas ir maišoma 1 min pusę maišytuvo maksimalaus greičio – 500 aps./min. Pažymėtina, kad toks režimas

tinkamas mišiniams su stiklo plaušu, kuomet stiklo plaušo fibros tolygiai pasiskirsto mišinio tūryje ir nesuyra į pavienius plaušelius, šitaip gaunant optimalios konsistencijos SPAB mišinį, kurio pasklidimas siekia 20 cm pagal 2.3.2 skyrelyje aprašytą metodiką.

2.8 pav. Tyrimuose naudotas 1000 aps./min intensyvaus maišymo skiedinių maišytuvas
Fig. 2.8. 1000 rev./min shear mixer for cementitious plasters

Bandinių gamybai buvo naudojami klojiniai iš laminuotos jūrinės faneros, kiekvienai betono sudėčiai formuojant plokštes, kurių matmenys: storis – 15 mm, plotis – 525 mm, aukštis – 525 mm (2.9a paveikslas). Plokštės išimamos iš klojinių po 24 h ir kietinamos 28 paras laboratorijos sąlygomis, 20 °C temperatūroje, 80 % santykinio drėgno aplinkoje.

2.9 pav. Bandyminių plokščių formavimas: a) forma užpildyta betono mišiniu;
b) plokštelių pjautymo schema lenkimo bandymams

Fig. 2.9. Casting of test plates: a) casted mould with concrete;
b) cutting scheme for flexural test plates

Atliekant lenkimo stiprio bandymus, $15 \times 525 \times 525$ plokštės supjaustomos betono pjovimo disku į 8 plokšteles, kurių plotis 50 mm, ilgis 325 mm. Siekiant geriau įvertinti plaušo pasiskirstymą gaminyje, plokštelės po 4 vnt. orientuojamos statmena kryptimi.

Atliekant atsparumo šalčiui bandymus, panaudotos tos pačios formos, iš kurių pjaunamos keturios plokštelės, kurių matmenys 262×150 mm (2.9b pav.). Dvi iš jų supjaustomos į 262×50 mm bandinius, kurie naudojami nustatyti lenkimo stipriui po 28 parų, o kitos dvi plokštelės paruošiamos užšaldymo ir atšildymo bandymams pagal 2.13 paveikslą pateiktą schemą.

Gniuždymo stiprio nustatymui buvo naudojamos metalinės cementinių skiedinių formelės $40 \times 40 \times 160$ mm³. Mišinys į formelės supilamas jo netankinant. Formose bandiniai laikomi 24 val. 20 ± 2 °C temperatūros aplinkoje, po to išformuojami ir 27 paras laikomi 20 ± 2 °C, 80 % santykinio drėgnio aplinkoje. Vienai betono sudėčiai suformuojamos trys prizmės $40 \times 40 \times 160$ mm³, kurios dalinamos į dvi dalis ir gaunami viso 6 bandiniai, kurie gniuždomi naudojant 40×40 mm² metalines plokšteles.

2.3.2. Mišinių konsistencijos nustatymas

Betono mišinių konsistencijos tyrimams pasirinktas cilindro pasklidimo metodas, tinkantis smulkiagrūdžiams cementiniams kompozitams su plaušais iki 20 mm ilgio. Bandymo metu naudojamas $\varnothing 65$, $h = 55$ mm metalinis cilindras, kuris padedamas ant glotnaus paviršiaus (stiklo arba jūrinės klojinių faneros) ir į jį supilamas betono mišinys. Po 15–20 s cilindras nukeliamas, leidžiama mišiniui pasklisti ir po 10–15 s išmatuojamas pasklidusio mišinio skersmuo, cm pagal 2.10 paveikslą.

2.10 pav. Papildomi SPAB mišinių konsistencijos vertinimo parametrai

Fig. 2.10. Additional parameters for evaluation of GRC mix workability

Remiantis 2.10 paveiksle pateikta schema, galime sukurti mišinio konsistenciją apibrėžiantį parametą – segregacijos rodiklį W , kuris tiesiogiai proporcingas D_1 ir D_2 , tačiau atvirkščiai proporcingas h ir išreiškiamas pagal formulę:

$$W = \frac{D_1 - D_2}{h}, \quad (2.1)$$

čia, D_1 – cementinės teslos pasklidimas, skaičiuojamas kaip vidurkis dviejų statmena kryptimi atliktų matavimų, cm; D_2 – cementinės matricos su plaušu pasklidimas, skaičiuojamas kaip vidurkis dviejų statmena kryptimi atliktų matavimų, cm; h – mišinio suslūgimas (Sutardo viskozimetro aukštis), cm.

Kad geriau suprasti užpildo dalelių formos įtaką SPAB betono mišinio konsistencijai, apskaičiuotas dalelių vidutinės formos parametras – pailgumo indeksas I :

$$I = \frac{d_1}{d_2}, \quad (2.2)$$

čia, d_1 – užpildo dalelės ilgesnioji kraštinė, mm; d_2 – užpildo dalelės trumpesnioji kraštinė, mm;

2.3.3. Betono mechaninių savybių nustatymas

SPAB kompozitų mechaninės savybės dažniausiai charakterizuojamos lenkimo stipriu bei įtempių – deformacijų kreivėmis. Visi bandiniai buvo išbandyti pagal 4 atramų lenkimo schemą, kuri pateikta 2.11 paveiksle. Ši bandymo schema pranašesnė už 3 atramų dėl žymiai didesnio ploto, kuriame veikia maksimalūs tempimo įtempiai (atstumas $L/3$), kuomet 3 atramų schemoje maksimalūs įtempiai susidaro tik viename taške – jėgos pridėjimo vietoje (LST EN 1170-4).

2.11 pav. Lenkimo bandymas pagal 4 atramų lenkimo schemą

Fig. 2.11. Testing according 4 – point bending scheme

Kai atstumai tarp jėgos pridėjimo taškų vienodi ($L/3$), lenkimo stipris apskaičiuojamas pagal formulę:

$$\sigma = \frac{FL}{bh^2}, \quad (2.3)$$

čia, σ – lenkimo stipris, MPa; F – maksimali jėga, N; L – atstumas tarp atramų centrų, mm; b – bandinio plotis, mm; h – bandinio aukštis, mm.

Siekiant bandinių deformacijų pobūdį apibrėžti skaitine išraiška, buvo panaudotas deformacijų energijos principas. Bendru atveju, deformacijas sukeliančios jėgos atliktas darbas yra lygus jėgos ir poslinkio sandaugai:

$$A = FS. \quad (2.4)$$

Priėmus prielaidą, kad visas išorinių jėgų atliekamas darbas yra sunaudojamas plyšio didėjimui, galima teigti, kad deformacijų energija G_f yra tiesiogiai proporcinga darbui ir skaičiuojama pagal 2.3 formulę, pasiūlytą RILEM asociacijos (Jaras A. C. ir Litherland, K. L. 1975). Šioje formulėje neįskaičiuotas savojo svorio jėgų atliekamas darbas, nes bandinių savasis svoris sukelia labai nežymias deformacijas.

$$G_f = \frac{A_0}{A_{lig}}, \quad (2.5)$$

čia, G_f – lenkimo deformacijų energija, N/m; A_0 – bandymų mašinos atliekamas darbas, kuris yra lygus plotui po jėgų – poslinkių kreive (2.12 pav. ir 2.6 formulė), Nm; A_{lig} – plyšio plotas (bandinio skerspjūvio plotas), mm²;

2.12 pav. Bandymų mašinos atliekamo darbo apskaičiavimas
Fig. 2.12. Calculation of work done by testing machine

$$A_0 = \sum \left(\frac{F_j - F_i}{2} \right) (s_j - s_i), \quad (2.6)$$

kur, $F_{j,i}$ – jėgos koordinatės, N; $s_{j,i}$ – poslinkio koordinatės, m.

2.3.4. Atsparumo šalčiui nustatymas

Betono atsparumas šalčiui buvo nustatomas paviršinio šaldymo metodu. Bandiniai buvo išlaikomi klimato kameroje iki 112 užšaldymo ir atšildymo ciklų, kai vieno ciklo trukmė – 24 valandos (2.13 pav.). Kiekvieno bandinio 150×262 mm bandomasis betono paviršius (39300 mm^2) buvo padengtas 5 mm storio 3 % koncentracijos NaCl tirpalu. Kas 7 paras bandiniai, ne ilgiau kaip 30 min, išimami iš šaldymo kameros, nupilamas NaCl tirpalas, bandinio paviršius šveičiamas metaliniu šepetiu ir plaunant vandens srove surenkami atskilę paviršiaus fragmentai, kurie išdžiovinami, pasveriami ir apskaičiuojami paviršiaus masės nuostoliai g/m^2 . Bandiniai, paruošti atsparumo šalčiui tyrimams atvaizduoti 2.14 paveiksle.

Įprastiniam betonui, pagal LST EN 13198 reikalaujama mažiausiai 28 užšaldymo ir atšildymo ciklų ir 7500 mm^2 minimalaus bandinio ploto, kai naudojamas druskos tirpalas, o 56 paviršinio užšaldymo ir atšildymo ciklai atitinka maksimalią atsparumo šalčiui klasę XF4. Taigi, šiame tiriamajame darbe atlikti bandymai 2 kartus viršija maksimalius norminius reikalavimus įprastiniam betonui.

2.13 pav. Laiko – temperatūros ciklas pagal LST EN 13198
Fig. 2.13. Time – temperature cycle according LST EN 13198

2.14 pav. Bandinių paruošimo schema
Fig. 2.14. Specimens for freeze/thaw tests

Atliekant atsparumo šalčiui tyrimus, taip pat buvo nustatomas lenkimo stipris, sudaromos lenkimo deformacijų kreivės, pagal kurias skaičiuojamos deformacijų energijos prieš ir po užšaldymo ir atšildymo ciklų poveikio. Tuo tikslu $150 \times 262 \text{ mm}^2$ bandiniai buvo supjaustomi į plokšteles $48 \times 262 \text{ mm}^2$, kurios naudojamos lenkimo stiprio bandymuose.

2.3.5. Technologinių ir kitų savybių nustatymas

Įtraukto oro kiekis betono mišinyje nustatytas naudojant slėginį metodą, vadovaujantis LST EN 12350-7 standarto reikalavimais. Sukietėjusio betono tankis nustatytas naudojant prizmes $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}$, o betono mišinio tankis – 1 l tūrio indą.

Bandinių mikrostruktūra buvo tiriama naudojant SEM JEOL JSM-7600F skenuojantį elektroninį mikroskopą. Tyrimo metu naudota 30 kV įtampa. Prieš atliekant tyrimą, skėlimo paviršius buvo padengtas plonu aukso sluoksniu, vakuume garinant aukso elektrodą „QUORUM Q150R ES“ prietaisu. Vaizdas buvo didinamas nuo 5000 iki 150 000 kartų.

Dalelių formai nustatyti, visi trys užpildai buvo suskaidyti į frakcijas sijojant per standartinius sietus: 2–4 mm, 1–2 mm, 0,5–1 mm, 0,25–0,5 mm, 0,125–0,25 mm, 0,063–0,125 mm, padarytos kiekvienos frakcijos mikroskopinės nuotraukos. Nuotraukas įkėlus į programą Autocad, matavimo įrankių pagalba buvo nustatomi

pailgumo indeksai (I) pasirenkant po 30 dalelių iš kiekvienos frakcijos ir išvedamas vidurkis. Kadangi pailgumo indeksas I skaičiuojamas kaip dalelių matmenų statmena kryptimi santykis, nuotraukų mastelis Autocad modelio erdvėje tam įtakos neturi.

2.4. Antrojo skyriaus išvados

1. Siekiant sukurti dispersiškai armuotą apdailinį betoną, kuris būtų atsparus agresyviai užšaldymo ir atšildymo ciklų poveikiui, buvo parinktos betono mišinių sudėtys su skirtingais užpildais (kvarcinis smėlis, granito atsijos, įprastinis žvyro karjerų smėlis), plaušais (stiklo, bazalto, anglies bei polivinilo alkoholio) ir cementinės matricos struktūrą modifikuojančiais priedais (SiO_2 mikrodulkės ir metakaolinas).
2. Smulkiagrūdžiams betono mišiniams būdingas didelis smulkiųjų dalelių (cemento ir užpildo) kiekis, kurias maišymo metu sudėtinga homogenizuoti, todėl pasirinktas intensyvaus maišymo metodas, kuris užtikrina visų mišinio komponentų homogeniškumą.
3. Dispersiškai armuoto apdailinio betono mišinio svarbiausios technologinės savybės – konsistencija ir segregacija, kurias galima vertinti pagal mišinio pasklidimo ir suslūgimo parametrus.
4. Lenkiamų plonasienių dispersiškai armuotų betono elementų mechaninių savybių pokyčius tikslinga vertinti pagal lenkimo deformacijų energiją, kuri tiesiogiai proporcinga bandymų mašinos atliekamam darbui.

Mineraliniais priedais modifikuoto apdailinio betono su dispersiniu armavimu technologinių ir eksploatacinių savybių tyrimai

Šio tyrimo tikslas yra sukurti dispersiškai armuotą smulkiagrūdį apdailinį betoną (DASAB), skirtą naudoti fasadų surenkamųjų sieninių elementų pramoninėje gamyboje. Tyrimo metu panaudoti skirtingi plaušai (stiklo, bazalto, anglies, PVA), užpildai (kvarcinis smėlis, granito atsijos, įprastinis Lietuvos karjerų smėlis) bei betono savybes modifikuojantys mineraliniai priedai (metakaolinas ir SiO_2 mikrodulkės). Nustatytas skirtingų komponentų poveikis betono konsistencijai, mechaninėms savybėms ir atsparumui šalčiui.

Skyriaus tematika paskelbti septyni autoriaus straipsniai (Moceikis et al., 2017, 2018a, 2018b, 2018c, 2019a, 2019b, 2020).

3.1. Smulkiagrūdžio apdailinio betono su skirtingais plaušais technologinių bei mechaninių savybių tyrimai

3.1.1. Betono mišinio konsistencija

Plonasieniams gaminiams iš DASAB svarbu, kad matricos struktūrą armuojantis plaušas būtų orientuotas kiek įmanoma labiau horizontalioje padėtyje, sutampančioje su išorinių tempimo jėgų veikimo kryptimi. Taip pat, liejamo formavimo būdu gaminamų gaminių betono mišinys turi būti technologiškas ir takaus, tai yra laisvai pasklisti ir užpildyti klojinius (formas).

Mokslininkai rekomenduoja tokio tipo mišiniams plaušo dozuoti neviršijant 3,0 % nuo sausų medžiagų masės (Abe et al., 2011). Šiuose tyrimuose geros konsistencijos mišiniai pagaminti naudojant 2,9 % stiklo plaušo.

Atliekant bandymus su skirtingais plaušais, pastebėta, kad panaudojus bazalto bei anglies plaušus mišinio konsistencija itin pablogėja ir priklauso nuo maišymo režimo parametrų, o mišiniams su stiklo ir polivinilo alkoholio (PVA) plaušais maišymo parametrai turi nedidelę įtaką. Konsistencijos pokyčiai susiję su tuo, kad maišymo metu fibros suyra į pavienius plaušelius, kurie plačiai pasiskirsto matricos tūryje ir padidėja plaušo – matricos kontaktinės zonos plotas, kas taip pat buvo nustatyta kitų mokslininkų tyrimuose (Branston et al., 2016; Yakhlaef et al., 2013; Safiudin et al., 2018). Įvertinus mokslininkų atliktus tyrimus, buvo pasirinkta atlikti bandymus su 2,9 %, 1,45 % bazalto plaušo kiekiais ir 0,72 %, 0,18 % anglies plaušo kiekiais. Pasirinktas PVA plaušo kiekis (1,5 %) atitinka plaušo kiekį pagal tūrį, nes šių medžiagų tankiai skiriasi beveik du kartus.

Mišinių su skirtingais plaušais pasklidimai pateikti 3.1 ir 3.2 paveiksluose. Kaip matome, panaudojus stiklo ir PVA plaušus, pasklidimas sumažėjo vos 1 cm (5 %) lyginant su tos pačios sudėties cementine matrica (skiediniu) be plaušo. Pasklidimo metu mišiniai išlieka stabilios struktūros, stiklo ir PVA plaušai tolygiai pasiskirsto visame tūryje, beveik nedarydami įtakos mišinio konsistencijai.

Panaudojus tokį pat kiekį bazalto plaušo kaip ir mišiniuose su stiklo plaušu, gaunamas standus mišinys. Sumažinus bazalto kiekį 50 % mišinio konsistencija pagerėja, gaunamas nedidelis – 12 cm pasklidimas.

Anglies plaušo panaudojimas tokio tipo betono mišiniuose yra problematiškas. Dozuojant vos 0,7 % plaušo nuo cemento masės, gaunamas standus ir netechnologiškas mišinys, kuriam reikalingas intensyvus tankinimas ir kuris nėra tinkamas daugumai betono gaminių formavimo technologinių procesų. Net itin sumažinus anglies plaušo kiekį – iki 0,18 %, gaunamas analogiškos konsistencijos, standus betono mišinys.

3.1 pav. Smulkiagrūdžio betono mišinių pasklidimo bandymai su skirtingais plaušais ir jų kiekiais

Fig. 3.1. Fine-grained Concrete mix spread test result with different fibres and their quantities

3.2 pav. Smulkiagrūdžio betono mišinių konsistencija su skirtingais plaušais:
a) mišinys be plaušų (REF0); b) 2,9 % stiklo plaušo (S1); c) 1,45 % bazalto plaušo (B1);
d) 0,7 % anglies plaušo

Fig. 3.2. Workability of fine-grained concrete mix with different fibers: a) without fiber (REF0); b) 2,9 % glass fiber (S1); c) 1,45 % basalt (B1); d) 0,7 % carbon fiber

Ruošiant betono mišinius, anglies ir bazalto plaušų aglomeratai suyra į pavienius plaušelius, kadangi tarp jų veikia labai silpnos tarpusavio traukos jėgos. Taip gaunamas standus bei netechnologiškas betono mišinys. Todėl šiuo požiūriu yra tinkamesnis stiklo plaušas, kurio plaušeliai net prie intensyvaus maišymo lieka sukibę į aglomeratus ir išlieka tiesios formos, taip užtikrindami reikiamą mišinio pasklidimą ir pakankamą cementinės matricos armavimą.

Standūs smulkiagrūdžiai mišiniai su bazalto bei anglies plaušu gali būti panaudoti gelžbetonio konstrukcijų jungiamųjų siūlių betonavimui. Šiuo tikslu dažnai naudojama kilpinė sienų jungtis yra veikiamą kirpimo jėgų, o anglies ir bazalto plaušai itin padidina betono stiprį kerpant/skeliant (Safiudin et al., 2018; Fiore et al., 2015; Khandel et al., 2020). Taip pat, naudojant injektuojamus standžius mišinius, padidėtų montavimo darbų našumas, nes siūlių užpildymui nereikalingi klijiniai.

3.1.2. DASAB betono mechaninės savybės ir plaušo parinkimas

Betono armavimui dažniausiai naudojamas armatūrinis plienas, kuris pasižymi geromis tempimo charakteristikomis ir itin padidina betono standumą bei stiprumą. Įprastinio armatūrinio plieno takumo riba tempiant – 500 MPa, o pasipriešinimas deformacijai (deformacijų modulis) – 200 GPa. Tačiau armatūrinis plienas yra labai lengvai paveikiamas atmosferinės korozijos, jam reikalingi dideli betono apsauginiai sluoksniai. Tačiau plieninė armatūra pasižymi dideliu atsparumu ugniai (kritinė plieno temperatūra konstrukcijoje – 500°C) ir gebėjimu plastiškai deformuotis. Šios dvi charakteristikos yra esminės projektuojant saugius statinius ir naudojant alternatyvias medžiagas plienui į jas būtina atsižvelgti. Vietoje armatūrinio plieno taip pat galima panaudoti ir įvairius plaušus, kurie savo mechaninėmis ir fizikinėmis savybėmis nenusileidžia o kai kuriais atvejais net lenkia plieną.

Šarmams atsparus stiklo plaušas pasižymi dideliu tempimo stipriu – 1400 MPa, aukštu deformacijų moduliu – 74 GPa ir geru terminiu atsparumu (–50...+350). Bazaltui būdingas ypatingai didelis tempimo stipris – iki 3200 MPa, deformacijų modulis artimas stiklui – 90 GPa, o terminis atsparumas – vienas didžiausių tarp žinomų medžiagų (–260...+700). Anglies plaušas sparčiai populiarėja įvairiose pramonės šakose dėl ypatingai didelio tempimo stiprio – 3000 MPa ir standumo, kuris net viršija plieno – 350 GPa, o terminis atsparumas artimas stiklui. Polivinilo alkoholio (PVA) plaušas priskiriamas polimerų grupei, todėl nepasiekia didelio terminio atsparumo (iki 100 °C), tačiau turi geras mechanines savybes (tempimo stipris – 800 MPa, deformacijų modulis – 40 GPa). Tai geriausi parametrai iš polimerų grupės plaušų, kuomet labiausiai paplitusio polipropileno deformacijų modulis nesiekia net 10 GPa.

Atliekant DASAB mechaninių savybių bandymus nustatyta, kad plaušai lenkimo stiprį padidino iki 62 %. Mažiausias lenkimo stipris užfiksuotas bandiniuose be plaušų – 6,5 MPa, kai įlinkis 0,25 mm. Didžiausią lenkimo stiprį pasiekė bandiniai su 2,9 % stiklo plaušo – 13,3 MPa (3.3 pav.). Didžiausias gniuždymo stipris – 92,7 MPa gautas panaudojus 0,72 % anglies plaušo, mažiausias – 64,3 MPa su 1,5 % PVA plaušo (3.4 pav.). Stiklo plaušas beveik nedarė įtakos cementinės matricos gniuždymo stipriui, ką taip pat patvirtina ir kitų mokslininkų atlikti tyrimai (Madhkhani et al., 2019).

3.3 pav. Smulkiagrūdžio betono su skirtingais plaušais ir jų kiekiais lenkimo stipris
Fig. 3.3. Fine-grained concrete flexural strength test result with different fibres and their quantities

3.4 pav. Smulkiagrūdžio betono su skirtingais plaušais ir jų kiekiais gniuždymo stipris
Fig. 3.4. Fine-grained concrete compressive strength test result with different fibres and their quantities

Remiantis medžiagų mechanikos teorija galima teigti, kad suardymo energija yra naudingas bei išsamus DASAB mechaninio atsparumo rodiklis, kadangi šiai medžiagai būdingas plastinio pobūdžio suirimas (Mills et al., 1981). DASAB irimo procesą geriausiai charakterizuoja lenkimo deformacijų energija, nes ji išreiškiama darbu, reikalingu pilnai suardyti bandinį. Patterson (1975) tyrinėjo suirimo energijos metodikas, kad įvertinti SPAB betono atsparumą suardymui, o darbas, sunaudotas statinio plyšio pločio didėjimo metu, buvo naudojamas kaip pagrindinė charakteristika medžiagos stiprumui nustatyti.

Atlikus lenkimo bandymus, pagal kiekvieno bandinio deformacijų kreivių skaitinius duomenis, Excel programos pagalba buvo suskaičiuoti plotai po kreivėmis bei lenkimo deformacijų energijos vidurkiai, būdingi tai sudėčiai. Atlikus skaičiavimus, mažiausia gauta deformacijų energija – 27 N/m, bandiniams be plaušų, o didžiausia – 3102 N/m, bandiniams su PVA plaušu (3.5 pav.).

3.6 paveiksle pateikti lenkimo deformacijų kreivių vidurkiai, būdingi kompozitams su skirtingais plaušais. Kuo didesnis plotas po kreive, tuo daugiau energijos reikia suardyti šiai medžiagai.

3.5 pav. Smulkiagrūdžio betono su skirtingais plaušais lenkimo deformacijų energija

Fig. 3.5. Flexural strain energies of fine-grained concrete with different fibers

3.6 pav. Smulkiagrūdžio betono skirtingais plaušais lenkimo deformacijų kreivės
Fig. 3.6. Stress-deflection curves of fine-grained concrete with different fiber

Apibendrinant DASAB betono su skirtingais plaušais mechanines savybes, galima teigti, kad stiklo plaušas cementinės matricos lenkimo deformacijų energiją padidino 38 kartus, o polivinilo alkoholio plaušas 114 kartų, taip suteikdami trapiai medžiagai plastiškumo savybių, kai plaušų dozuojaama atitinkamai 2,9 % ir 1,5 % nuo cementinės matricos sausų medžiagų masės. Nors didžiausias gniuždymo stipris gautas su anglies plaušu, tačiau lenkimo deformacijas sukeliančių jėgų veikiamiems elementams ši charakteristika nėra tokia svarbi.

Fenu (2016) ištyrė, kad stiklo plaušas pagerina betono mechanines charakteristikas tiek veikiant statinėms, tiek dinaminėms apkrovoms. Veikiant statinėms apkrovoms, gautas didesnis lenkimo stipris bandiniuose su stiklo plaušu, negu naudojant bazalto plaušą. Taip pat stiklo plaušas suteikė kompozitui didesnę smūginį tįsumą nei bazaltas, veikiant dinaminėms apkrovoms.

Dispersiškai armuoto smulkiagrūdžio apdailinio betono plaušo parinkimui būtina atsižvelgti atsižvelgiant į šiuos pagrindinius kriterijus: mišinio konsistenciją, segregaciją, betono lenkimo stiprį bei suirimo energiją. Tolimesniems atsparumo šalčiui tyrimams buvo pasirinkta naudoti šarmams atsparų stiklo plaušą, nes šis geriausiai atitinka šiuos kriterijus. Vertinant pagal betono mišinio konsistenciją ir mechanines charakteristikas (deformacijų energiją), geriausių rezultatų pasiekta naudojant PVA plaušą. Verta paminėti, kad šio polimero deformacijų modulis 10 kartų didesnis, nei polipropileno, kuris dažnai naudojamas betono mišinių gamyboje kaip plastinio traukumo deformacijas mažinantis priedas, bet nėra efektyvus betono armavimui. Tačiau kaip ir visiems polimerams, PVA plaušui

būdingas mažas terminis atsparumas ($<100\text{ }^{\circ}\text{C}$), todėl jo panaudojimas fasadų konstrukcijoms yra pakankamai ribotas, kur yra keliami griežti priešgaisriniai reikalavimai.

3.2. Stiklo plaušu armuotų betonų segregacijos ir konsistencijos tyrimai

3.2.1. Užpildų poveikis stiklo plaušu armuotų mišinių konsistencijai

Labiausiai ištirtas ir dažniausiai naudojamas užpildas smulkiagrūdžių betonų sistemose yra kvarcinis smėlis. Šis pasirinkimas pagrįstas ypatingai gera mišinių konsistencija naudojant šį užpildą (Abe et al., 2011; Bartos et al., 2017). Kadangi šiame darbe tyrinėjami takūs betono mišiniai, ypatingai svarbus mišinio gebėjimas greitai ir tolygiai pasklisti bei užpildyti formuojamo gaminio klojinį. Gaminant plonasienius gaminius, sudėtinga pritaikyti betono sutankinimo priemonės. Todėl svarbus reikalavimas, keliamas DASAB mišiniams yra mišinio pasklidimas, suslūgimas ir atsparumas segregacijai. Mišinio segregacija šiuo atveju apibūdinama, kaip plaušo ir cementinės matricos atsiskyrimas, pavaizduotas 3.7 paveiksle.

3.7 pav. Dispersiškai armuoto smulkiagrūdžio betono mišinio segregacija

Fig. 3.7. Segregation of dispersively reinforced fine-grained concrete mix

Naudojant kvarcinį smėlį, gauti tinkamos konsistencijos takų ir savaime išsilyginantį SPAB mišinį nėra sudėtinga. Siekiant nustatyti skirtingų užpildų kiekio poveikį betono konsistencijai, buvo gaminami mišiniai, kuriuose kvarco matrica buvo pakeista 10 %, 20 %, 30 %, 40 %, 50 % alternatyviais užpildais – granito atsijomis bei įprastiniu smėliu (sudėtys pagal 2.8 ir 2.9 lenteles). Panaudojus alternatyvius užpildus, itin pablogėjo mišinio konsistencija, kai kuriais atvejais gauta didelė plaušo – matricos segregacija. Norint išsamiai apibūdinti tokių mišinių konsistenciją, neužtenka vien įprastinio suslūgimo (h) nustatymo, pagal Sutarčio viskozimetrometru aukštį. Papildomai reikia išmatuoti mišinio pasklidimo skersmenis D_1 ir D_2 , kurie apibūdina segregacijos efektą.

Pagal kiekvienos frakcijos kiekį ant skirtingų sietų, buvo suskaičiuoti vidutinės formos pailgumo indeksai visam užpildui: $I_{kv} = 1,40$ (kvarciniam smėliui), $I_{sum} = 1,44$ (įprastiniam smėliui), $I_{gr} = 1,87$ (granito atsijoms) ir pateikti 3.1 lentelės apačioje. Kaip rodo atliktų bandymų rezultatai, didėjant dalelių pailgumo indeksui, betono mišinio konsistencija blogėja.

3.8 pav. Granito užpildo formos tyrimai optiniu mikroskopu: a) 250µm sietas, 25x didinimas; a) 500µm sietas, 12x didinimas; c) 1 mm sietas, 25x didinimas
Fig. 3.8. Optical microscope investigation of granite particle shape: a) 250µm sieve, 25x magnitude; a) 500µm sieve, 12x magnitude; c) 1 mm sieve, 25x magnitude

3.9 pav. Įprastinio smėlio užpildo formos tyrimai optiniu mikroskopu: a) 250µm sietas, 25x didinimas; a) 500µm sietas, 12x didinimas; c) 1 mm sietas, 25x didinimas
Fig. 3.9. Optical microscope investigation of regular sand particle shape: a) 250µm sieve, 25x magnitude; a) 500µm sieve, 12x magnitude; c) 1 mm sieve, 25x magnitude

3.10 pav. Kvarco užpildo formos tyrimai optiniu mikroskopu: a) 250 µm sietas, 25x didinimas; a) 500 µm sietas, 12x didinimas; c) 1 mm sietas, 25x didinimas
Fig. 3.10. Optical microscope investigation of quartz particle shape: a) 250 µm sieve, 25x magnitude; a) 500 µm sieve, 12x magnitude; c) 1 mm sieve, 25x magnitude

3.1 lentelė. Užpildų pailgumo indeksų skaičiavimo rezultatai

Table 3.1. Determination of particle shape index

Frakcija	Kvarcinis smėlis		Įprastinis smėlis		Granito atsijos	
	Kiekis, %	Pailgumo indeksas <i>I</i>	Kiekis, %	Pailgumo indeksas <i>I</i>	Kiekis, %	Pailgumo indeksas <i>I</i>
2–4	0,0	0	11,8	1,38	13,9	2,00
1–2	0,3	1,21	20,0	1,31	20,7	2,20
0,5–1	5,2	1,37	22,3	1,32	27,6	1,76
0,25–0,5	37,6	1,34	23,3	1,69	17,0	1,59
0,125–0,25	49,5	1,42	19,0	1,45	12,9	1,97
0,063–0,125	7,4	1,56	3,6	1,4	8,0	1,61
Viso užpildo	100	1,40	100	1,44	100	1,87

2.7 ir 2.8 lentelėse pateiktų mišinių segregacijos rodikliai pateikti 3.11 paveiksle. Bazinės sudėties SPAB betonui $D_1 - D_2 = 0$ cm, $h = 4,2$ cm ir šiuo atveju gaunamas segregacijos rodiklis $W = 0$, nusakantis geros konsistencijos mišinį.

Užpildų mišinių pailgumo indeksų priklausomybė nuo segregacijos rodiklių pateikta 3.12 paveiksle. Užpildų mišinio dalelių pailgumo indeksas gali būti apskaičiuojamas kaip suma atskirų frakcijų pailgumo indeksų, dauginant iš frakcijos kiekio:

$$I_{sum} = I_1 \cdot p_1 + I_2 \cdot p_2 \dots, \quad (3.3)$$

čia, $I_{1,2}$ – frakcijos dalelių pailgumo indeksas, $p_{1,2}$ – frakcijos procentinė dalis

3.13 paveiksle pateiktas mišinių suslūgimas h , o 3.14 ir 3.15 paveiksluose – cementinės tešlos ir matricos pasklidimai D_1 , D_2 . 3.16 ir 3.17 paveiksluose pateikiamos konsistencijos bandymų nuotraukos. Analizuodami rezultatus matome, kad didinant alternatyvių užpildų kiekį, segregacijos rodiklis didėja ir mišinio konsistencija blogėja. Visais atvejais geresnė konsistencija gauta naudojant įprastinio smėlio užpildą, negu granito atsijas.

3.11 pav. Segregacijos rodiklio W priklausomybė nuo užpildų kiekio bei tipo
Fig. 3.11. Workability indexes W for compositions with different aggregates quantities

3.12 pav. Segregacijos rodiklio W priklausomybė nuo užpildų mišinio dalelių pailgumo indekso I

Fig. 3.12. Dependence of the segregation index W on the particle elongation index I of the aggregate mixture

3.13 pav. Mišinių suslūgimas (Sutardo viskozimetro aukštis)

Fig. 3.13. Concrete mix slump (Sutard viscosimeter heith)

3.14 pav. Mišinio pasklidimas D_1 ir D_2 su įprastiniu smėliu

Fig. 3.14. Concrete mix spread D_1 and D_2 for compositions with regular sand

3.15 pav. Mišinio pasklidimas D_1 ir D_2 su granito atsijomis

Fig. 3.15. Concrete mix spread D_1 and D_2 for compositions with crushed granite

3.16 pav. Konsistencijos bandymų nuotraukos: a) mišinio pasklidimas (100 % kvarcinis smėlis); b) mišinio suslūgimas (100 % granito atsijos)

Fig. 3.16. Fotos of workability tests: a) referential quartz matrix (100 % quartz filler); b) 100 % granite filler

3.17 pav. Konsistencijos bandymų nuotraukos: a) 50 % kvarco pakeista granitu; b) 50 % kvarco pakeista įprastiniu smėliu

Fig. 3.17. Fotos of workability tests: a) 50 % quartz replaced with granite; b) 50 % quartz replaced with regular sand

Iš atliktų mokslinių tyrimų su įprastiniais betonais yra žinoma, kad užpildo dalelių forma ir užpildo paviršiaus charakteristikos yra svarbus veiksnys, lemiantis betono mišinio vandens ir cemento santykį – kuo didesnis dalelių paviršiaus plotas, tuo didesnio kiekio vandens reikia norint gauti reikiamos konsistencijos betono mišinį (Soni ir Shukla, 2021). Kampuotos dalelės gali padidinti betono gniuždymo stiprį, tačiau blogėja mišinio konsistencija (Cordeiro et al., 2016).

Šiuose tyrimuose naudoto kvarcinio smėlio dalelėms būdinga sferinė forma, glotniais paviršiais, dėl ko gaunama mažesnė trintis tarp cementinės matricos, užpildo bei plaušo (3.18a pav.). Granito atsijų dalelėms būdinga plokštelių forma su aštriomis briaunomis, dėl ko padidėja vidinė trintis matricoje, plaušas užstringa tarp stambesnių dalelių, o smulkios dalelės prateka pro tarpus kartu su cementiniu skiediniu (3.18b pav.). Įprastinio smėlio užpildo dalelės netaisyklingų erdvinių daugiakampių formos, todėl mišinių konsistencijos parametrai artimesni sudėtims su granito užpildu.

3.18 pav. Smulkiagrūdžio betono matricos schemas: a) su taisyklingų formų kvarco užpildu b) plaušo sąveika su užpildu, esant netaisyklingos formos užpildo dalelių (sudaryta autoriaus)

Fig. 3.18. Schemes of fine-grained concrete matrix: a) typical matrix with round shaped quartz filler b) crowding effect of fibers when sharp edged particles are introduced (made by author)

Kaip parodė mišinių konsistencijos ir segregacijos tyrimų rezultatai, SPAB betono mišinio konsistencija ir segregacija priklauso nuo užpildo dalelių formos. Mokslininkų sukurta nemažai dalelių formų apibūdinančių parametru, kurie naudojami skaitmeniniame dalelių mišinio tankio modeliavime (Blott et al., 2007). Tačiau kiti mokslininkai siūlo naudoti supaprastintus formos rodiklius (sferiškumas, plokštumas bei pailgumas), nagrinėjant betono mišinių konsistencijos problemas (Zheng et al., 2015), todėl šiame darbe tokiu parametru pasirinktas pailgumo indeksas, kurį galima nustatyti paprastomis vizualinėmis priemonėmis – mikroskopu darytomis nuotraukomis ir braižymo programomis. Užpildo dalelių pailgumo indeksui padidėjus vos 3 % mišinio pasklidimas sumažėja 10 %, kai vietoje kvarcinio smėlio naudojamas įprastinis smėlis. Kai naudojamas netaisyklingos formos užpildas (granito atsijos), dalelių pailgumo indeksas lyginant su kvarciniu smėliu padidėja 33 %, o mišinio pasklidimas atitinkamai sumažėja iki 50 %. Didinant įprastinio smėlio kiekį nuo 10 % iki 50 %, segregacijos rodiklis didėja nuo 1,9 iki 2,6, o naudojant granito atsijas atitinkamai nuo 2,6 iki 3,5.

Įvertinus šiuos parametrus, galima teigti, kad SPAB betonui labiau rinka užpildai, kuriuose vyrauja sferinės formos dalelės, užtikrinančios tolygų cementinės matricos ir plaušo pasklidimą.

3.2.2. Aktyvių mineralinių priedų poveikis stiklo plaušu armuotų mišinių konsistencijai

SiO_2 mikrodulkių ir metakaolino mineralinių priedų vidutinis dalelių dydis nevirsija portlandcemenčio CEM I 52,5R, todėl pagal struktūrą juos galima priskirti cementinei fazei. Didinant cementinės fazės kiekį mišinyje, bendra sistemos

klampa didėja ir norint išlaikyti pradinę mišinio konsistenciją, reikia didinti vandens arba plastیکlio kiekį.

Šiame tyrime panaudotų aktyvių mineralinių priedų kiekis buvo 2,5 %, 5 % ir 7,5 % nuo cemento masės, arba 23 kg/m^3 , 46 kg/m^3 , 69 kg/m^3 betono mišinio. Pradinis vandens ir plastیکlio kiekis nebuvo keičiamas, todėl 3.19 paveiksle pateikti rezultatai atspindi šių priedų poveikį mišinio konsistencijai. Kaip matome, panaudojus iki 7,5 % SiO_2 mikrodulkių, mišinio pasklidimas sumažėjo nuo 19 cm iki 13 cm (31 %), o su 7,5 % metakaolino iki 15 cm (21 %).

3.19 pav. Mineralinių priedų poveikis SPAB mišinių pasklidimui (D_1)

Fig. 3.19. Impact of mineral additives on GRC mix spread (D_1)

Flores (2017) ištyrė, kad naudojant už cementą smulkesnių dalelių mikroužpildus, sumažėja cemento skiedinių pasklidimas. Norint kompensuoti pasklidimo sumažėjimą, reikėtų didinti superplastiklio kiekį. Aktyvių mineralinių priedų poveikis konsistencijai labiausiai priklauso nuo priedo dalelių dydžio ir savitojo paviršiaus ploto (metakaolinui – $11\,000 \text{ m}^2/\text{g}$, SiO_2 mikrodulkėms – $18\,000 \text{ m}^2/\text{kg}$ (Aghabaglou et al., 2014). Kuo mažesnės dalelės, tuo didesnio kiekio vandens reikia jų surišimui. Tuo galima paaiškinti šiame tyrime pastebėtą SiO_2 mikrodulkių didesnę poveikį mišinių pasklidimui, kurių dalelių paviršiaus plotas yra didesnis nei metakaolino.

3.3. Stiklo plaušu armuoto betono fizikinių bei mechaninių savybių tyrimai

Atlikus betono mišinių su skirtingais užpildais tankio tyrimus nustatyta, kad mišinių tankis tolygiai didėjo didinant granito ir įprastinio smėlio užpildų kiekius

(3.20 pav.). Mažiausia gauta reikšmė – 2190 kg/m^3 (bazinės sudėties), didžiausios – su 50 % granito ir su 50 % įprastinio smėlio, atitinkamai 2221 kg/m^3 (+1,4 %) ir 2242 kg/m^3 (+2,4 %).

3.20 pav. Smulkiagrūdžio stiklo plaušu armuoto betono mišinio tankiai pakeičiant iki 50 % kvarco granito bei įprastinio smėlio užpildais

Fig. 3.20. Fine-grained glass fiber reinforced concrete mix densities replacing up to 50 % quartz filler with granite and regular sand

3.21 pav. Aktyvių mineralinių priedų poveikis smulkiagrūdžio stiklo plaušu armuoto betono mišinio tankiui

Fig. 3.21. Impact of active mineral additives to fine-grained glass fiber reinforced concrete mix densities

Mineralinių priedų poveikis SPAB betono mišinio tankiui buvo žymiai didesnis negu dalies kvarco pakeitimas granitu bei įprastiniu smėliu. Betono mišinio tankiai su mineraliniais priedais pateikti 3.21 paveiksle. Pradinis mišinio tankis – 2190 kg/m^3 tolygiai mažėjo panaudojus SiO_2 bei metakaolino priedus, atitinkamai iki 2108 kg/m^3 (–3,7 %) ir 2166 kg/m^3 (–1,1 %).

Stipruminių savybių tyrimų rezultatai parodė, kad bazinio SPAB kompozito su kvarciniu smėliu vidutinis lenkimo stipris – 13,3 MPa, o gniuždymo – 82,9 MPa, kai bandiniai – 40 mm storio prizmės. Pakeitus bandinius į 15 mm storio plokšteles, gautas lenkimo stiprio sumažėjimas iki 10,2 MPa, o kai bandiniai $100 \times 100 \times 100 \text{ mm}$ kubeliai, gniuždymo stipris sumažėja iki 74,2 MPa. Tai gali būti paaiškinama didesniu horizontalia kryptimi išsidėsčiusių plaušelių kiekiu storesniame bandinio skerspjūvyje.

Atlikus lenkimo stiprio tyrimus su skirtingais užpildais nustatyta, kad pakeitus iki 50 % kvarcinio smėlio granito atsijomis, vidutinis lenkimo stipris sumažėja 10,3 % (iki 11,92 MPa). Vietoje granito atsijų panaudojus įprastinį smėlį, lenkimo stipris sumažėja 3,4 % (iki 12,84 MPa) (3.22 pav. ir 3.23 pav.). Lenkimo stiprio nustatymui buvo naudojamos $40 \times 40 \times 140 \text{ mm}$ matmenų prizmės.

3.22 pav. Užpildų poveikis smulkiagrūdžio stiklo plaušu armuoto betono lenkimo stipriui, dalį kvarcinio smėlio pakeičiant įprastiniu smėliu

Fig. 3.22. Impact of aggregates on flexural strength of fine-grained glass fiber reinforced concrete. Part of quartz sand is substituted by regular sand

3.23 pav. Užpildų poveikis smulkiagrūdžio stiklo plaušu armuoto betono lenkimo stipriui dalį kvarcinio smėlio pakeičiant granito atsijomis

Fig. 3.23. Impact of aggregates on flexural strength of fine-grained glass fiber reinforced concrete. Part of quartz sand is substituted by granite

Atlikus gniuždymo stiprio tyrimus su skirtingais užpildais nustatyta, kad pakeitus iki 50 % kvarcinio smėlio granito atsijomis, gniuždymo stipris sumažėja 7 % (iki 76,8 MPa). Vietoje granito atsijų panaudojus įprastinį smėlį, gniuždymo stipris sumažėja 23 % (iki 63,5 MPa) (3.24 pav. ir 3.25 pav.). Gniuždymo stiprio nustatymui buvo naudojamos $40 \times 40 \times 140$ mm matmenų prizmės.

3.24 pav. Užpildų poveikis smulkiagrūdžio stiklo plaušu armuoto betono gniuždymo stipriui, dalį kvarcinio smėlio pakeičiant įprastiniu smėliu

Fig. 3.24. Impact of aggregates on compressive strength of fine-grained glass fiber reinforced concrete. Part of quartz sand is substituted by regular sand

3.25 pav. Užpildų poveikis smulkiagrūdžio stiklo plaušu armuoto betono gniūždymo stipriui dalį kvarcinio smėlio pakeičiant granito atsijomis

Fig. 3.25. Impact of aggregates on compressive strength of fine-grained glass fiber reinforced concrete. Part of quartz sand is substituted by granite

Taip pat buvo atlikti tyrimai su skirtingu aktyvių mineralinių priedų kiekiu – 2,5 %, 5 % ir 7,5 % metakaolino bei SiO_2 mikrodulkių. Dozuojant priedus iki 7,5 % nuo cemento masės, didelio poveikio lenkimo stipriui nenustatyta. Bandinių su SiO_2 mikrodulkėmis stiprumas svyravo tarp 9,1–10,6 MPa, kur mažiausia reikšmė buvo gauta su 5 % priedo. Metakaolinas turėjo dar mažesnę įtaką, gauti rezultatai svyravo tarp 10,3–10,7 MPa (3.26 pav. ir 3.27 pav.).

3.26 pav. SiO_2 mikrodulkių poveikis smulkiagrūdžio stiklo plaušu armuoto betono lenkimo stipriui

Fig. 3.26. Impact of silica fume on flexural capacity of fine-grained glass fiber reinforced concrete

3.27 pav. Metakaolino poveikis smulkiagrūdžio stiklo plaušu armuoto betono lenkimo stipriui

Fig. 3.27. Impact of metakaolin on flexural capacity of fine-grained glass fiber reinforced concrete

SPAB kompozito gniuždymo stipris padidėjo, kai SiO_2 mikrodulkių ir metakaolino naudojama ne mažiau nuo 7,5 % nuo cemento masės. Didžiausia gniuždymo stiprio reikšmė su 7,5 % priedo kiekiu, atitinkamai 78 MPa ir 77 MPa. Mažesnis šių priedų kiekis sumažina SPAB kompozito gniuždymo stiprį iki 67 MPa (3.28 pav. ir 3.29 pav.).

3.28 pav. SiO_2 mikrodulkių poveikis smulkiagrūdžio stiklo plaušu armuoto betono gniuždymo stipriui

Fig. 3.28. Impact of silica fume on compressive strength of fine-grained glass fiber reinforced concrete

3.29 pav. Metakaolino poveikis smulkiagrūdžio stiklo plaušu armuoto betono gniuždymo stipriui

Fig. 3.29. Impact of metakaolin on compressive strength of fine-grained glass fiber reinforced concrete

Pagal gautus duomenis, SPAB kompozitui būdingas didelis gniuždymo stipris (70–80 MPa), o plonasienių gaminių mechaninių savybių tyrimams rekomenduotina naudoti plonas plokšteles, artimo storio realiam gaminiui dėl didelės bandinio mastelio įtakos rezultatams (>30 %). Panaudojus įprastas skiedinių prizmeles $40 \times 40 \times 160$ mm, galimi dideli nukrypimai nuo realaus storio gaminio dėl skirtingo plaušelių išsidėstymo liejant betoną į formas.

3.30 pav. Stiklo plaušelių išsidėstymas cementinėje matricoje, didinimas 500x.

Fig. 3.30. Glass fiber positioning in cementitious matrix, magnification 500x.

3.31 pav. Stiklo plaušo kontaktinis paviršius, didinimas 5000x.

Fig. 3.31. Glass filament surface, magnification 5000x.

Išbandytų bandinių lūžio paviršiai buvo ištirti skenuojančiu elektroniniu mikroskopu. Visų bandinių amžius tyrimo metu buvo 9 mėnesiai po suformavimo. Stiklo pluoštas sudarytas iš pavienių plaušelių, kurie tarpusavyje nėra chemiškai sulipinti ir tempimo įtempius išoriniai sluoksniai vidiniams perduoda trintimi ar dėl elektrostatinės traukos jėgų (3.30 pav.), stiklo plaušelių paviršius – lygus, be defektų (3.31 pav.).

3.4. Stiklo plaušu armuoto betono atsparumas šalčiui

Atsparumo šalčiui tyrimuose panaudota sudėtis su stiklo plaušu, kurio pasirinkimas pagrįstas ankstesniame skyriuje (S1). Matricos struktūros modifikavimui panaudoti mineraliniai priedai – SiO_2 mikrodulkės ir metakaolinas, kurių kiekiai buvo 0 %, 2,5 %, 5 %, 7,5 % nuo cemento masės (sudėtys MS1, MS2, MS3, MK1, MK2, MK3).

Kai betonas yra veikiamas šalčio, vanduo esantis porose virsta ledo kristalais, taip padidindamas betono tūrį iki 9 %. Išsiplėtimas vyksta dėl didėjančio hidraulinio slėgio ir osmosinių reiškinių porose, kurie abu yra atsakingi už mikroplyšių susidarymą. Norint pasiekti geresnį atsparumą šalčiui, reikia optimizuoti cementinės matricos poringumą ir padidinti betono vandens nepralaidumą. Tuo tikslu dažnai yra naudojami aktyvūs mineraliniai priedai, kuriems būdingos pucolaninės reakcijos (Pigeon et al., 2010; Mehta et al., 2006).

Shon nustatė, kad jei mažesnės nei 300 μm oro poros yra tolygiai pasiskirsčiusios cementinio akmens tūryje, jos vaidina svarbų vaidmenį kaip rezervuarai, sugeriantys vidinius įtempius dėl augančių ledo kristalų (Shon et al., 2018). Kad betonas būtų atsparus šalčiui, taip pat yra labai svarbus atstumas nuo besiformuo-

jančio ledo kristalo iki erkmės kur jis galėtų augti. Pigeon (2010) pasiūlė tai charakterizuoti porų išsidėstymo rodikliu, nusakančiu minimalų atstumą tarp cementinės matricos porų. Apibendrinant, galima teigti, kad užšaldymo ir atšildymo ciklams atsparus betonas turi optimalų porų dydžio ir atstumo tarp jų santykį, kuris skirtingos sudėties ir mikrostruktūros betonams gali labai skirtis.

Mokslininkų nustatyta, naudojant ne daugiau kaip 20 % SiO_2 mikroduelių priedo nuo cemento masės, gaunamas pakankamai geras betono atsparumas šalčiui. Kadangi SiO_2 mikroduelių dalelių dydis yra iki 100 kartų mažesnis nei cemento, tokiu būdu jos išsidėsto tarp cemento dalelių ir padidina cementinio akmens tankį. Dėl pucolaninių reakcijų sumažėja cementinio akmens kapiliarinė absorbcija, pasikeičia matricos poringumas (Gruszczyński et al., 2020; Emamian et al., 2020). Metakaolino dalelės yra apie 10 kartų mažesnės nei cemento ir pagrindinė sudedamoji dalis yra SiO_2 . Šiam priedui būdingos panašios pucolaninės reakcijos su cementu kaip ir SiO_2 mikroduelkėms. Pucolaninių reakcijų metu naujai susiformavęs tankios struktūros CSH gelis užpildo tarpus tarp cemento dalelių, todėl cementinė matrica tampa tankesne, bendras betono porų tūris ir porų dydis sumažėja (Sharma et al., 2018; Nicolas et al., 2014).

3.4.1. Įtraukto oro kiekis betono mišinyje

Betono atsparumas šalčiui dažnai vertinamas pagal įtraukto oro kiekį mišinyje. Nustatyta, kad įtraukto oro kiekis SPAB mišinyje be mikroužpildų yra 2,5 % ir kad SiO_2 mikroduelkės bei metakaolinas šį rodiklį veikia skirtingai (3.32 pav.). Mišiniam su metakaolinu būdingas įtraukto oro kiekio sumažėjimas iki 2 %, o SiO_2 mikroduelkės oro kiekį padidino iki 4,7 %.

3.32 pav. Mineralinių priedų poveikis smulkiagrūdžio stiklo plaušu armuoto betono įtraukto oro kiekiui

Fig. 3.32. Impact of mineral additives on entrained air of fine-grained glass fiber reinforced concrete

Iprastinio betono praktikoje priimta, kad šalčiui atsparus betonas turėtų turėti ne mažiau kaip 4 % įtraukto oro (LST 1974). Tačiau tankios struktūros kompozitų atveju su dideliu rišiklio bei smulkių dalelių kiekiu ši tendencija nebūtinai teisinga.

3.4.2. Betono paviršiaus destrukcijos dėl užšaldymo ir atšildymo ciklų poveikio tyrimai

Kadangi SPAB kompozitai yra dažniausiai naudojami kaip fasadų apdailos elementai, užšaldymo ir atšildymo ciklų poveikio sukelti pokyčiai betono paviršiuje yra viena esminių charakteristikų vertinant šio kompozito ilgaamžiškumą.

Standarte LST EN 15191 „Surenkamieji betono gaminiai. Stiklo pluoštu armuoto betono eksploatacinių charakteristikų klasifikavimas“ nurodoma naudoti LST EN 13198 „Surenkamieji betono gaminiai. Gatvių ir parkų tvarkymo elementai“ B priede aprašytą metodiką SPAB betono šalčio atsparumo vertinimui.

Atsparumo šalčiui bandymai atlikti su 7 skirtingomis betono sudėtimis (S1, MS1, MS2, MS3, MK1, MK2, MK3) ir truko 112 parų, bandant pagal paviršinio šaldymo metodą, pateiktą LST EN13198 B priede, kur vieno pilno $\pm 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ciklo trukmė – 24 valandos. Suminiai atskilusios medžiagos nuo bandinių paviršiaus masės nuostoliai po 56 ir 112 ciklų pateikiami 3.33 ir 3.34 paveiksluose.

3.33 pav. SiO₂ mikrodulkių poveikis smulkiagrūdžio stiklo plaušu armuoto betono paviršiniams masės nuostoliams, veikiant cikliškam šaldymui/atšildymui

Fig. 3.33. Impact of silica fume on scaling at freezing/thawing of fine-grained glass fiber reinforced concrete

Pagal LST EN 13198, kai šalčio atsparumo bandymuose naudojamas 3 % koncentracijos NaCl tirpalas, masės nuostoliai nuo betono paviršiaus neturėtų viršyti 1500 g/m^2 po 28 užšaldymo ir šildymo ciklą. Visos tyrinėtoms sudėtys tenkino standarto reikalavimus, kadangi masės nuostoliai nei vienoje iš jų neviršijo 500 g/m^2 po 112 ciklų.

Atlikus atsparumo šalčiui tyrimus buvo nustatyta, kad SiO_2 mikrodulkių priedas turėjo nežymų poveikį paviršiniams masės nuostoliams, kuris galėtų būti paaiškinamas dideliu įtraukto oro kiekiu betono mišinyje. Didžiausia užfiksuota reikšmė – 67 g/m^2 , su 2,5 % SiO_2 priedo. Didinant SiO_2 priedo kiekį, įtraukto oro kiekis didėjo, o masės nuostoliai mažėjo, atitinkamai iki 45 g/m^2 ir 0 g/m^2 .

Metakaolino priedas turėjo didesnę poveikį betono paviršiaus pažeidimams. Kai šio priedo naudojama 2,5 % ir 5 %, masės nuostoliai po 112 ciklų buvo panašūs kaip ir sudėtyse su SiO_2 priedu ir neviršijo 50 g/m^2 . Tačiau 7,5 % metakaolino priedo padidino masės nuostolius nuo betono paviršiaus, atitinkamai iki 115 g/m^2 po 56 ciklų ir iki 465 g/m^2 po 112 ciklų. Tai gali būti paaiškinama dideliu matricos tankiu dėl padidinto smulkių dalelių kiekio ir sumažėjusio įtraukto oro kiekio betono mišinyje (2,5 %).

3.34 pav. Metakaolino poveikis smulkiagrūdžio stiklo plaušu armuoto betono paviršiniams masės nuostoliams, esant cikliškam šaldymui/atšildymui

Fig. 3.34. Impact of metakaolin on scaling at freezing/thawing of fine-grained glass fiber reinforced concrete

Šiame tyrime SPAB betono bandinių didžiausi paviršiaus masės nuostoliai buvo 3 kartus mažesni negu siūlo standartas, kai užšaldymo ir atšildymo ciklų skaičius net 4 kartus viršijo reikalavimus. Nepaisant to, betono paviršių pažeidimai buvo labai ryškūs vizualine prasme. Bandiniuose su 7,5 % metakaolino paviršiniai masės nuostoliai 465 g/m^2 sudarė 39 % bandinio paviršiaus ploto, o su 5 % SiO_2 mikrodulkių 45 g/m^2 atitinkamai 12 % bandinio paviršiaus ploto (3.35 pav.).

Atskilusio paviršiaus ploto duomenys buvo gauti Autocad programos pagalba, konvertuojant nuotraukas pagal bandinio mastelį ir apvedant defektus „Spline“ braižymo įrankiu bei komanda „Area“ apskaičiuojant kiekvieno objekto plotą mm^2 (3.36 pav.). Būtų tikslinga nustatyti priklausomybę tarp masės nuostolių ir defektuoto paviršiaus ploto, tačiau tai padaryti sudėtinga, kadangi priklausomai nuo cementinės matricos struktūros, defektų gylis gali skirtis. Šiuo atveju bandiniams su metakaolinu gauta $0,12\text{ g/cm}^2$, o su SiO_2 mikrodulkėmis – $0,037\text{ g/cm}^2$.

3.35 pav. Bandinių paviršiai po 112 užšaldymo ir atšildymo ciklų su 3 % NaCl tirpalu:
a) S1, be mikroužpildų; b) MS1 su 2,5 % SiO_2 mikrodulkių; c) MK3 su 7,5 % metakaolino

Fig. 3.35. Photos of specimens after 112 freeze/thaw cycles: a) S1, with no additives; b) MS1 with 2,5 % silica fume; c) MK3 with 7,5 % metakaolin

Remiantis šiais rezultatais, reikėtų pakeisti standarto LST EN 13198 siūlomus atsparumo šalčiui vertinimo kriterijus pagal masės nuostolius, keičiant į priimtina maksimalų defektų plotą gaminio paviršiuje – cm^2/m^2 . Siūlomos maksimalios leistinos reikšmės galėtų būti klasifikuojamos pagal tris skirtingas tolerancijos klases – A, B ir C (3.2 lentelė).

3.36 pav. Paviršinių masės nuostolių scheminis atvaizdavimas ploto vienetais (matmenys mm²): a) MS1 su 2,5 % SiO₂ mikrodulkių; b) MK3 su 7,5 % metakaolino

Fig. 3.36. Schematic representation of suface mass loss (dimmensions in mm²):

a) MS1 with 2,5 % silica fume; b) MK3 with 7,5 % metakaolin

3.2 lentelė. Apdailinio betono paviršiaus leistinų masės nuostolių vertės pagal skirtingas tolerancijos klases bandant pagal standarte LST EN 13198 pateiktą paviršinio užšaldymo ir atšildymo metodą po 112 ciklų druskos tirpale.

Table 3.2. Marginal values of surface mass loss according different tolerance classes, when freeze/thaw is tested by LST EN 13198 standart method.

Kokybės tolerancijos klasė (po 112 ciklų su 3 % NaCl)	SiO ₂ Mikrodulkės		Metakaolinas	
	Masės nuostoliai, g/m ²	Nuskilimų bendras plotas, cm ² /m ²	Pagal plotą, cm ² /m ²	nuskilimų bendras plotas, cm ² /m ²
A	≤2	≤50	≤6	≤50
B	≤5	≤150	≤18	≤150
C	≤18	≤500	≤60	≤500

3.37 paveiksle pavaizduoti paviršinių nutrupėjimų (nuskilimų) kiekiai pagal 3.4 lentelėje pateiktas tolerancijos klases.

3.37 pav. Paviršinių masės nuostolių scheminis atvaizdavimas pagal kokybės klases:
a) $50 \text{ cm}^2/\text{m}^2$ (A klasė); b) $150 \text{ cm}^2/\text{m}^2$ (B klasė); c) $500 \text{ cm}^2/\text{m}^2$ (C klasė)

Fig. 3.37. Schematic representation of surface mass loss according to tolerance classes:
a) $50 \text{ cm}^2/\text{m}^2$ (A class); b) $150 \text{ cm}^2/\text{m}^2$ (B class); c) $500 \text{ cm}^2/\text{m}^2$ (C class)

Aktyvūs mikro užpildai sukelia smulkigrūdžio stiklo plaušu armuoto betono paviršinius defektus, kaip betono paviršius yra veikiamas užšaldymo ir atšildymo ciklų. Didžiausias betono apdailinio paviršiaus atsparumas užšaldymo ir atšildymo ciklų poveikiui gautas su bazine sudėtimi be mikroužpildų – po 112 ciklų defektų nepastebėta.

3.4.3. Betono mechaninių savybių bei lenkimo deformacijų energijos pokyčių dėl cikliško užšaldymo ir atšildymo tyrimai

Užšaldymo ir atšildymo ciklų poveikis dažnai siejamas su ilgalaikiu betono stipruminių savybių blogėjimu – lenkimo bei gniuždymo stiprumo sumažėjimu. Tankioje cementinėje matricoje augantys ledo kristalai neturi kur laisvai plėstis, susidaro dideli vidiniai įtempimai ir betonas supleišėja, nuo paviršiaus palaipsniui atskyra cementinės plėvelės sluoksnis. Pastebėta, kad betone su stiklo plaušu, šio cementinės plėvelės sluoksnio storis yra iki 2 mm, po kuriuo išsidėstę pirmieji stiklo plaušo sluoksniai.

Su abiem mikroužpildais gautas mažesnis lenkimo stiprumas po 112 ciklų negu be jų. Su 2,5 % silicio mikrodulkių prieš šaldymą – 10,5 MPa, po šaldymo – 9,3 MPa. Su 5 % prieš šaldymą – 9,0 MPa, po šaldymo – 8,0 MPa. Su 7,5 % prieš šaldymą – 9,8 MPa, po šaldymo – 10,1 MPa (3.38 pav.).

Su 2,5 % metakaolino prieš šaldymą – 10,2 MPa, po šaldymo – 8,8 MPa. Su 5 % prieš šaldymą – 10,7 MPa, po šaldymo – 8,9 MPa. Su 7,5 % prieš šaldymą – 10,2 MPa, po šaldymo – 9,8 MPa (3.39 pav.).

Gauti duomenys rodo, kad bandiniuose su metakaolinu lenkimo stiprio pokyčiai buvo didesni dėl šalčio poveikio, negu bandiniuose su SiO_2 mikrodulkėmis.

3.38 pav. SiO_2 mikrodulkių poveikis smulkiagrūdžio stiklo plaušu armuoto betono lenkimo stipriui po 112 užšaldymo ir atšildymo ciklų

Fig. 3.38. Impact of silica fume on flexural strength of fine-grained glass fiber reinforced concrete after 112 freeze/thaw cycles

3.39 pav. Metakaolino poveikis smulkiagrūdžio stiklo plaušu armuoto betono lenkimo stipriui po 112 užšaldymo ir atšildymo ciklų

Fig. 3.39. Impact of metakaolin on flexural strength of fine-grained glass fiber reinforced concrete after 112 freeze/thaw cycles

Atlikti lenkimo stiprio bandymai su skirtingu kiekiu SiO_2 mikrodulkių bei metakaolino mineralinių priedų prieš užšaldymo ir atšildymo bandymą ir po 112 ciklų. Bandiniai buvo atremti lygia puse, kuri buvo šaldoma. Buvo nustatyta, kad kontrolinių bandinių (be mikroužpildų) lenkimo stiprumas padidėjo 24 % po 112 užšaldymo ir atšildymo ciklų, prieš šaldymą – 10,1 MPa, po šaldymo – 12,5 MPa. Tai gali būti siejama su tuo, kad bandiniai ilgą laiką buvo veikiami NaCl tirpalu, dėl ko susidarė palankios sąlygos formuotis portlandito fazėms, kurios galėjo sustiprinti matricą ir padidinti kompozito lenkimo stiprį.

Daryti išvadas apie aktyvių mineralinių priedų įtaką stiklo plaušu armuoto ir užšaldymo ir atšildymo ciklų paveikto kompozito ilgalaikes mechanines charakteristikas sudėtinga, kai nėra nagrinėjama visa lenkimo deformacijų kreivė. 3.40 ir 3.41 paveiksluose pateikti bandinių įlinkiai prie 3 MPa liekamojo stiprumo parodė, kad visų bandinių įlinkiai sumažėjo 1,5–2 kartus po 112 užšaldymo ir atšildymo ciklų. Tai reiškia, kad stiklo plaušu armuotas kompozitas tapo trapesne medžiaga. Mineraliniai priedai padidino liekamąjį įlinkį iki 2 kartų, taip paveikdami kompozito ilgalaikes mechanines savybes.

Siekiant išsamiau įvertinti stiklo plaušu armuoto betono mechaninių savybių pokyčius veikiant užšaldymo ir atšildymo ciklams, buvo apskaičiuotos bandinių lenkimo deformacijų energijos. Pagal tai galima palyginti kokią įtaką turi įvairių betono sudėčių pokyčiai išorinių jėgų atliekamam darbui nuo jėgos pridėjimo iki pilno bandinio suardymo.

3.40 pav. SiO_2 mikrodulkių poveikis smulkiagrūdžio stiklo plaušu armuoto betono maksimalioms deformacijoms (įlinkiui), kai liekamasis stipris – 3 MPa

Fig. 3.40. Impact of silica fume on maximum deformation of fine-grained glass fiber reinforced concrete when residual strength is 3 MPa

3.41 pav. Metakaolino poveikis smulkiagrūdžio stiklo plaušu armuoto betono maksimalioms deformacijoms (ilinkiui), kai liekamasis stipris – 3 MPa
Fig. 3.41. Impact of metakaolin on maximum deformation of fine-grained glass fiber reinforced concrete when residual strength is 3 MPa

3.42 pav. SiO₂ mikrodulkių poveikis smulkiagrūdžio stiklo plaušu armuoto betono lenkimo deformacijų energijai

Fig. 3.42. Impact of silica fume on flexural stain energy of fine-grained glass fiber reinforced concrete

3.43 pav. Metakaolino poveikis smulkiagrūdžio stiklo plaušu armuoto betono lenkimo deformacijų energijai

Fig. 3.43. Impact of metakaolin on flexural stain energy of fine-grained glass fiber reinforced concrete

Nustatyta, kad silicio dioksido mikrodulkių priedas lenkimo deformacijų energiją padidino 92 % neveikiant šalčiui ir 85 % po 112 ciklų, o metakaolinas – 90 % neveikiant šalčiui ir 108 % paveikus 112 užšaldymo ir atšildymo ciklų (3.42 pav. ir 3.43 pav.). Tai reiškia, kad padidėjo kompozito plastiškumas ir jo suardymui reikia daugiau energijos, medžiaga įgavo didesnę atsparumą dinaminių jėgų poveikiui (vėjo apkrovos, smūginės-impulsinės apkrovos), kas yra labai svarbu plonasieneis fasadų konstrukcijoms.

Skenuojančiu elektroniniu mikroskopu darytos nuotraukos parodė, kad SPAB betono be mikroužpildų (S1) plaušelių paviršius po šaldymo bandymų tapo šiurkštus (3.44 pav.), kas galėjo įtakoti lenkimo stiprio padidėjimą, kadangi šiurkštus paviršius geriau sukimba su cementine matrica. Paviršiaus šiurkštumą galėjo įtakoti stiklo cheminė korozija šarminėje terpėje, kadangi cementinėje matricoje be aktyvių mikroužpildų yra didelis kiekis OH⁻ jonų.

Plaušo – matricos kontakto zonoje kai kur buvo pastebimi plyšiai (3.45 pav.), dėl kurių galėjo sumažėti kompozito lenkimo deformacijų energija, o suirimo pobūdis pasidarė trapus.

3.44 pav. S1 sudėtis po 112 užšaldymo ir atšildymo ciklų: stiklo plaušo paviršius, didinimas 10 000x

Fig. 3.44. S1 composition after 112 freeze/thaw cycles: glass filament surface, magnification 10 000x

3.45 pav. S1 sudėtis po 112 užšaldymo ir atšildymo ciklų: cementinės matricos struktūra bei plyšys tarp plaušo ir matricos, didinimas 20 000x

Fig. 3.45. S1 composition after 112 freeze/thaw cycles: crack between filament and matrix, magnification 20 000x

Bandiniuose su mikroužpildais (MS3 ir MK3) stiklo plaušelių paviršius po šaldymo bandymų neturėjo paviršinių defektų, kurie buvo būdingi S1 bandiniams (3.44 pav. ir 3.47 pav.).

3.46 pav. MS3 sudėtis po 112 užšaldymo ir atšildymo ciklų: stiklo plaušo paviršius, didinimas 5 000x.

Fig. 3.46. MS3 composition after 112 freeze/thaw cycles: glass filament surface, magnification 5 000x

3.47 pav. MK3 sudėtis po 112 užšaldymo ir atšildymo ciklų: stiklo plaušo paviršius, didinimas 5 000x.

Fig. 3.47. MK3 composition after 112 freeze/thaw cycles: glass filament surface, magnification 5 000x

Remiantis šių eksperimentų rezultatais bei mokslininkų atliktais tyrimais, galima teigti, kad SPAB mechaninių savybių blogėjimo laipsnis, didėjant kompozito eksploataavimo trukmei, pirmiausia priklauso nuo matricos porų tirpalo šarminumo. Dėl vykstančios hidratacijos kontaktinėje zonoje, plaušelių paviršius vis dažniau būna padengtas hidratacijos produktais, kurių morfologija ir cheminė sudėtis priklauso nuo rišiklio (Mills et al., 1981; Laws et al., 1986; Zhu et al., 1997).

Plonų CSH fazių sluoksnis, dėl kurio susidaro geros rišimosi savybės, domiuoja tais atvejais, kai cemento klinkerio kiekis rišiklyje yra mažas ir (arba) naudojami pucolanines reakcijas sukeliantys priedai (mažas porų tirpalo šarminumas). Cementinėse matricose kuriose rišikliu naudojamas tik portlandcementis vyrauja šiurkščios, trapios portlandito fazės (didelis porų tirpalo šarminumas). Didėjant cementinės matricos šarminumui didėja ir portlandito fazių kiekis, kurios suformuoja tam tikrus trapius apvaskalus stiklo plaušo paviršiuje. Taip pat gali būti pastebimas $\text{Ca}(\text{OH})_2$ kristalų įsiterpimas tarp plaušelių aglomeratų. Augantys portlandito kristalai veikdami kaip pleištai sukraipo stiklo plaušelius ir pažeidžia išorinį sukibimą su matrica užtikrinantį apvaskalą (Huijun et al., 2013; Enfedaque et al., 2010; Madhkhani et al., 2019).

Cementinėse matricose, kuriose panaudojami aktyvūs mineraliniai priedai, dėl pucolaninių reakcijų sumažėja porų tirpalo pH vertės. Sąlygos portlandito susidarymui tokiu atveju yra apribojamos, todėl susidaro palanki plaušo ir matricos kontakto zonos mikrostruktūra. Susiformavusios naujos plonos plėvelės ant išorinių plaušelių paviršiaus užtikrina geresnį plaušo sukibimą su matrica. Mokslinių atliktų tyrimai su metakaolininiu priedu veikiant stiklo plaušu armuotą betoną drėkinimo ir džiovinimo ciklais taip pat parodė, kad šis priedas sumažina kompozito trapumą dėl vykstančių senėjimo procesų, kaip ir šiame darbe atliktų užšaldymo ir atšildymo bandymų atveju (Purnell et al., 1999; Cheng et al., 2019; Bartos et al., 1996; Peled et al., 2005).

3.5. Tyrimo rezultatų praktinis taikymas

Pagal gelžbetonio konstrukcijų gamybos pramonėje vyraujančias gamybos technologijas, trisluoksnių sieninių elementų apdailiniam (išoriniam) 80 mm storio sluoksniui dažniausiai naudojamas vienas B500B klasės armatūros tinklas, suformuojant 35 mm betono apsauginį sluoksnį. Šis armuotas 80 mm storio betono sluoksnis atlieka tik apdailinę fasado funkciją ir eksploatuojant pastatą papildomų apkrovų be savojo svorio neperima. Gamybos technologinio proceso metu, taip pat transportuojant ir montuojant gaminį veikia įvairios apkrovos ir poveikiai, kuriuos būtina įvertinti. Šie poveikiai dažniausiai yra dinaminiai – smūginiai, todėl

išorinio sluoksnio betonui reikalingas dažniausiai tik konstrukcinis armavimas užtikrinant gaminio standumą, stiprumą vientisumą keliant iš klojinio, padedant į sandėliavimo vietą ar tvirtinant ant transportavimo piramidžių.

Dispersinis armavimas šiame darbe aprašytais plaušais iš esmės tenkina betonui keliamus reikalavimus prieš tai paminėtų technologinių procesų metu, todėl gali būti panaudotas suploninant įprastinį 80 mm betono apdailinį sluoksnį iki 15 mm. Dėl gamyboje reikalaujamo didelio ankstyvojo stiprumo, rekomenduojama naudoti CEM I 52,5R klasės portlandcementį su polikarboksilatų esterio superplastikliu, dozuojant 1,1 % nuo cemento masės. Siekiant užtikrinti geriausią mišinio konsistenciją, rekomenduojama naudoti kvarcinį smėlį, kurio kiekis lygus cemento kiekiui, t. y. 853 kg/m³. Parinktas stiklo plaušo kiekis – 49,5 kg/m³ užtikrina didelį lenkimo stiprį – 13,3 MPa ir suteikia trapią medžiagą (betonui) plastinių savybių, kurias galima charakterizuoti lenkimo deformacijų energija – 1183 N/m, kuri po 112 užšaldymo ir atšildymo ciklų 3 % NaCl tirpale sumažėja iki 620 N/m ir dėl sudėtingų senėjimo procesų stiklo plaušu armuotas betonas pereina į trapią būseną. Siekiant užtikrinti šio kompozito atsparumą šalčiui, rekomenduojama naudoti SiO₂ mikrodulkių priedą, dozuojant 5–7,5 % nuo cemento masės.

3.6. Trečiojo skyriaus išvados

1. Dispersinis armavimas plaušais skirtingai veikia smulkiagrūdžio betono mišinio konsistenciją. Didžiausias mišinio pasklidimas gaunamas su stiklo ir PVA plaušais – 20 cm, kai plaušų dozuojama atitinkamai 2,9 % ir 1,5 % nuo cementinės matricos masės. Net su mažiausiu anglies plaušo kiekiu (0,18 %) mišinys tampa standus. Bazalto plaušas taip daro didelį poveikį mišinio konsistencijai, nes dozuojant 1,4 % plaušo gautas pasklidimas siekia vos 12 cm.
2. Dispersinis armavimas plaušais pagerina smulkiagrūdžio betono kompozito mechanines savybes. Stiklo plaušas cementinės matricos deformacijų energiją padidina iki 38 kartų, o lenkimo stiprį 1,6–2 kartus, suteikdamas trapią medžiagą plastiškumo savybių. Mechaninių savybių požįuriu geriausia alternatyva įprastiniam stiklo plaušui yra polivinilo alkoholio plaušas (PVA), kuris lenkimo deformacijų energiją padidino 3 kartus, kai plaušų kiekis buvo vienodas. Anglies bei bazalto plaušai nežymiai padidino betono lenkimo stiprį ir deformacijų energiją.
3. Pasirinktos žaliavos (stiklo plaušas, kvarcinis smėlis ir SiO₂ mikrodulkių priedas) padidino kompozito atsparumą trapiam suirimui ir pleišėjimui, todėl šią medžiagą galima panaudoti surenkamųjų sieninių elementų gamyboje, kaip apdailinį betono sluoksnį.

4. Stiklo plaušu dispersiškai armuotam betonui būdingas mišinio sluoksniavimasis, kuomet stiklo plaušas atsiskiria nuo cementinės matricos. Sluoksniavimasis priklauso nuo užpildo dalelių formos ir, kintant užpildo dalelių pailgumo indeksui nuo 1,4 iki 1,64, betono mišinio segregacijos rodiklis kinta nuo 1,9 iki 3,5.
5. Didžiausias mišinio pasklidimas gaunamas naudojant kvarcinio smėlio užpildą, kurio pailgumo rodiklis lygus 1,4. Tačiau iki 50 % kvarcinio smėlio galima pakeisti granito atsijomis arba įprastiniu žvyro karjerų smėliu vertinant betono mišinio technologines savybes pagal segregacijos rodiklį.
6. Granito atsijos ir įprastinis smėlis neturi didelės įtakos stiklo plaušu armuoto betono lenkimo stipriui, kai šiais užpildais pakeičiama iki 50 % kvarcinio smėlio.
7. Aktyvūs mikroužpildai veikia smulkiagrūdžio betono mišinio su stiklo plaušu konsistenciją. SiO_2 mikrodulkės bei metakaolinas padidina mišinio pasklidimą, kai šių priedų dozuojaama 2,5 % nuo cemento masės, nekeičiant kitų mišinio komponentų kiekio. Toliau didinant šių mikroužpildų kiekius, mišinio konsistencija blogėja net jei išlaikomas vienodas vandens ir cemento santykis.
8. Aktyvūs mikroužpildai skirtingai veikia smulkiagrūdžio betono mišinio su stiklo plaušu poringumą (įtraukto oro kiekį). Mišinių be mikroužpildų įtraukto oro kiekis svyruoja tarp 2–3 %. SiO_2 mikrodulkės didina įtraukto oro kiekį, o metakaolinas jo beveik neįtakoja, kai šių priedų kiekiai tarp 2,5–7,5 % nuo cemento kiekio.
9. SiO_2 mikrodulkių priedas turėjo nežymų poveikį paviršiniams masės nuostoliams, kuris galėtų būti paaiškinamas didesniu įtraukto oro kiekiu betono mišinyje. Didžiausia užfiksuota reikšmė – 67 g/m^2 , su 2,5 % SiO_2 priedo. Metakaolino priedas turėjo didesnę poveikį betono paviršiaus pažeidimams. Kai šio priedo naudojama 2,5 % ir 5 %, masės nuostoliai po 112 ciklų buvo panašūs kaip ir sudėtyse su SiO_2 priedu ir neviršijo 50 g/m^2 . Tačiau 7,5 % metakaolino priedo padidino masės nuostolius nuo betono paviršiaus, atitinkamai iki 115 g/m^2 po 56 ciklų ir iki 465 g/m^2 po 112 ciklų. Tai gali būti paaiškinama dideliu matricos tankiu dėl padidinto smulkių dalelių kiekio ir sumažėjusio įtraukto oro kiekio betono mišinyje (2,5 %).
10. Nustatyta, kad silicio dioksido mikrodulkių priedas lenkimo deformacijų energiją padidino iki 92 % neveikiant šaldymu/atšildymu ir 85 % po 112 ciklų, o metakaolinas – 90 % neveikiant šaldymu/atšildymu ir 108 % paveikus 112 užšaldymo ir atšildymo ciklų. Tai reiškia, kad padidėjo kompozito plastiškumas ir jo suardymui reikia daugiau energijos,

medžiaga įgavo didesnę atsparumą dinaminių jėgų poveikiui (vėjo apkrovos, smūginės-impulsinės apkrovos), kas yra labai svarbu plonasienėms fasadų konstrukcijoms.

11. Tyrimai skenuojančiu elektroniniu mikroskopu parodė, kad stiklo pluoštas sudarytas iš pavienių plaušelių ir tempimo įtempius perima išoriniai plaušelių sluoksniai.
12. Po 112 užšaldymo ir atšildymo ciklų stiklo plaušelių paviršius kontakto zonoje su cemento matrica po šaldymo bandymų tapo šiurkštus. Tai gali būti paaiškinama stiklo chemine korozija šarminėje terpėje.
13. Plaušo ir matricos kontakto zonoje kai kur buvo pastebimi plyšiai, kurie galėjo atsirasti dėl augančių portlandito kristalų, pažeidžiančių išorinį sukibimą su matrica užtikrinantį CSH fazių apvaskalą ir dėl ko galėjo sumažėti kompozito lenkimo deformacijų energija, o suirimo pobūdis pasidarė trapus.
14. Bandiniuose su SiO_2 mikrodulkių ir metakaolino priedais stiklo plaušelių paviršius po cikliško užšaldymo ir atšildymo bandymų nepastebėta paviršinių defektų, kurie buvo būdingi bandiniams be šių priedų. Dėl pucolanių reakcijų susiformavusios naujos plonos CSH fazių plėvelės ant išorinių plaušelių paviršiaus užtikrina geresnį plaušo sukibimą su matrica.

Bendrosios išvados

1. Smulkiagrūdžio stiklo plaušu armuoto betono mišinio konsistencija ir segregacija priklauso nuo užpildo dalelių formos, kurią galima apibūdinti pailgumo indeksu, kuris išreiškiamas kaip dalelės ilgesnės kraštinės santykis su trumpesniąja. Didėjant pailgumo indeksui, konsistencija blogėja ir segregacija didėja. Užpildo dalelių pailgumo indeksui padidėjus 3 % mišinio pasklidimas sumažėja 10 %, kai vietoje kvarcinio smėlio naudojamas įprastinis smėlis. Kai naudojamas netaisyklingos formos užpildas (granito atsijos), dalelių pailgumo indeksas lyginant su kvarciniu smėliu padidėja 33 %, o mišinio pasklidimas atitinkamai sumažėja iki 50 %. Didinant įprastinio smėlio kiekį nuo 10 % iki 50 %, segregacijos rodiklis didėja nuo 1,9 iki 2,6, o naudojant granito atsijas atitinkamai nuo 2,6 iki 3,5.
2. Stiklo plaušu armuotam smulkiagrūdžiam betonui užtikrinamas tolygus cementinės matricos ir plaušo sklidimas, kai naudojami užpildai, kuriuose vyrauja sferinės formos dalelės, kurių pailgumo indeksas neviršija 1,4. Taip pat šiems mišiniams svarbus segregacijos rodiklis, kurį reikia vertinti technologinių operacijų metu ir galima apskaičiuoti pagal šiame darbe sukurtą metodiką.

3. Ruošiant betono mišinius intensyvaus maišymo būdu, anglies ir bazalto plaušų aglomeratai suyra į pavienius plaušelius ir mišinys tampa standus bei netechnologiškas. Šiuo požiūriu yra tinkamesnis stiklo plaušas, kurio plaušeliai net intensyvaus maišymo metu lieka sukibę į aglomeratus ir išlieka tiesios formos, taip užtikrindami reikiamą mišinio pasklidimą ir pakankamą cementinės matricos armavimą.
4. Naudojant dispersinį armavimą plaušais, galima pagerinti betono kompozito mechanines charakteristikas. Nustatyta, kad stiklo plaušas betono kompozito lenkimo deformacijų energiją padidina nuo 28 N/m iki 1039 N/m (38 kartus), o polivinilo alkoholio plaušas nuo 28 N/m iki 3102 N/m (114 kartų), taip suteikdamas trapiai medžiagai plastiškumo savybių, kai stiklo plaušo dozuojaama 2,9 %, o polivinilo alkoholio – 1,5 % nuo sausų medžiagų masės.
5. SiO_2 mikrodulkių bei metakaolino priedai gali sukelti cementinio akmens atskilinėjimus nuo betono apdailinio paviršiaus, veikiant užšaldymo ir atšildymo ciklams, kai šių priedų dozuojaama iki 7,5 % nuo cemento masės. Todėl vertinant gaminių išvaizdą pasiūlyta taikyti skirtingas kokybės klases (A, B, C) ribojant atskilusio betono paviršiaus plotą nuo $50 \text{ cm}^2/\text{m}^2$ iki $500 \text{ cm}^2/\text{m}^2$.
6. Po 112 šaldymo ir atšildymo ciklų 3 % NaCl tirpale SiO_2 mikrodulkių priedas stiklo plaušu dispersiškai armuoto betono kompozito lenkimo deformacijų energiją padidina nuo 620 N/m iki 1149 N/m (85 %), o metakaolinas – nuo 620 N/m iki 1149 N/m (108 %). Tokiu būdu šie priedai dėl didesnių plastinių deformacijų ir liekamojo stiprio padeda nagrinėjamiems kompozitams išlikti atspariems suardymui, veikiant agresyvioms klimato sąlygoms eksploatacijos metu.
7. Vykstant senėjimo procesams dėl užšaldymo ir atšildymo ciklų poveikio stiklo plaušu armuotas kompozitas pereina į trapią būseną galimai dėl atsirandančių plyšių tarp plaušo ir matricos kontakto zonos, bei defektų plaušo paviršiuje. Šiuos senėjimo procesus gali sulėtinti aktyvių mineralinių priedų (SiO_2 mikrodulkių ir metakolino) panaudojimas.
8. Sukurtas betono kompozitas surenkamųjų sieninių elementų gamybai su kvarcinio smėlio užpildu ir stiklo plaušu, kurio lenkimo stipris – 10,1 MPa, lenkimo deformacijų energija – 1149 N/m ir kuris gali būti panaudotas fasadų konstrukcijoms, eksploatuojamoms ne mažiau kaip 20 metų agresyviomis Baltijos regiono klimato sąlygomis, kurioms būdingas užšaldymo ir atšildymo ciklų poveikis.

Literatūra ir šaltiniai

Abe J.; Takeuchi Y.; Ogata Y.; Imai K. 2011. Development of Self-compacting Premix GRC, *GRCA symposium*, Istanbul.

Afroughsabet V.; Biolzia L.; Monteiro P. J. M. 2017. The effect of steel and polypropylene fibers on the chloride diffusivity and drying shrinkage of high-strength concrete. *Composites Part B: Engineering* 139: 84–96.

Afroz M.; Patnaikuni I.; Venkatesan S. 2017. Chemical durability and performance of modified basalt fiber in concrete medium. *Constr. Build. Mater.* 154: 191–203.

Aghabaglou A. M.; Sezer G. I.; Ramyar K. 2014. Comparison of fly ash, silica fume and metakaolin from mechanical properties and durability performance of mortar mixtures view point. *Construction and Building Materials* 70: 17–25.

Ahmad S.; Umarb A. 2018. Rheological and mechanical properties of self-compacting concrete with glass and polyvinyl alcohol fibers. *Journal of Building Engineering* 17: 65–74.

Akers S. A. S. 2009. Cracking in fiber cement products. *AC Consulting, Vorderdorfstrasse 31, 8753 Mollis, Switzerland*.

Arısoy B.; Wu H. C. 2008. Material characteristics of high-performance lightweight concrete reinforced with PVA. *Construction and building materials* 22: 635–645.

Aulia T. B. 2002. Effects of Polypropylene Fibers on the Properties of High-Strength Concretes. *LACER* 7: 43–59.

Baklanova N. I.; Utkin A. V. 2013. Alkali resistance, improved alkali resistance of basalt fibers with zirconia and titania coatings. *Cem. Concr. Res.* 53: 1–8.

Ball H. 1993. Durability of naturally aged, GFRC mixes containing Forton Polymer and SEM analysis of the fracture interface. *Recommended Practice for Glass Fiber Reinforced Concrete Panels, Fourth Edition*, MNL–128–01. PCI, Chicago, IL.

Bartos P. J. M. 2017. Glassfiber reinforced concrete: principles, production, properties and applications. *Whittles Publishing*. 183p.

Bartos M. J.; Zhu W. 1996. Effect of microsilica and acrylic polymer treatment on the ageing of GRC. *Cement and Concrete Composites* 18: 31–39.

Bai J., Wild S., Ware J.A., Sabir B.B. 2003. Using neural networks to predict workability of concrete incorporating metakaolin and fly ash, *Advanced Engineering Software* 34: 663–669.

Bentur A. 1985. *Proceedings in PCI symposium: Durability of Glass Fiber Reinforced Concrete*, Illinois, USA, 108.

Bijen J.; Jacobs M. 1982. Properties of glass fiber-reinforced polymer-modified cement. *Matériaux et Construction* 15: 445–452.

Biryukovich K. L.; Biryukovich Yu. L.; 1964. *Steklocement*, Budivelnik, Kiev.

Biswas R. K.; Iwanami M.; Chijiwa N.; Uno K. 2020. Effect of non-uniform rebar corrosion on structural performance of RC structures: A numerical and experimental investigation. *Construction and Building Materials*, 230.

Blott S. J.; Pye K. 2007. Particle shape: a review and new methods of characterization and classification. *Sedimentology* 55: 31–63.

Bradley A. 2016. Processing, structure, and properties of carbon fibers. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 91: 262–282.

Brandt A. M.; Glinicki M. A. 2003. Effects of pozzolanic additives on long-term flexural toughness of HPGRC. Fourth international workshop on high performance fiber reinforced cement composites, University of Michigan and the University of Stuttgart.

Branston J.; Das S.; Kenno S. Y.; Taylor C. 2016. Mechanical behaviour of basalt fiber reinforced concrete. *Constr. Build. Mat.* 124: 878–886.

Branston J.; Das S.; Kenno S. Y.; Taylor C. 2016. Influence of basalt fibers on free and restrained plastic shrinkage. *Cem. Concr. Comp.* 74: 182–190.

Brooks J. J., Megat Johari M. A. 2001. Effect of metakaolin on creep and shrinkage of concrete, *Cement Concrete Composites* 23(6): 495–502.

Butler M.; Mechtcherine V.; Hempel S. 2009. Experimental investigations on the durability of fiber–matrix interfaces in textile-reinforced concrete. *Cement and Concrete Composites* 31: 221–231.

Building Research Establishment Information Paper CP38/79, Properties of GRC: ten year results, 1979.

Cho G. C.; Dodds J.; Santamarina J.C. 2006. Particle shape effects on packing density, stiffness, and strength: natural and crushed sands. *J Geotech Geoenviron Eng* 132(5): 591–602.

Cheng C.; He J.; Zhang J.; Yang Y. 2019. Study on the time-dependent mechanical properties of glass fiber reinforced cement (GRC) with fly ash or slag, *Construction and Building Materials* 217: 128–136.

Cohen M. D.; Constantiner D. 1985. Proceedings in PCI symposium: Durability of Glass Fiber Reinforced Concrete, Illinois, USA, 158

Cordeiro C. G., Soares L. M., Rocha C. A. A. 2016. Rheological and mechanical properties of concrete containing crushed granite fine aggregate, *Construction and Building Materials* 111: 766–773.

Correia R.; Ferreira J.; Branco A. 2006. A rehabilitation study of sandwich GRC façade panels. *Construction and Building Materials* 20: 554–561

Courard L., Darimont A., Schouterden M., Ferauche F., Willem X., Degeimbre R. 2003 Durability of mortar modified with metakaolin, *Cement Concrete Research* 33(9): 1473–1479.

Dhand V.; Mittal G., Rhee K. Y.; Park S.; Hui D. 2015. A short review on basalt fiber reinforced polymer composites. *Composites Part B* 73: 166–180.

Diamond S. 1985. *Proceedings in PCI symposium: Durability of Glass Fiber Reinforced Concrete*, Illinois, USA, 199.

Echevarria M. J.; Alonso M. J.; Romero D.C.; Montero, R. 2018. Influence of the previous state of corrosion of rebars in predicting the service life of reinforced concrete structures. *Construction and Building Materials* 188: 915–923.

Emamian S. A, Eskandari-Naddaf H. 2020. Genetic programming based formulation for compressive and flexural strength of cement mortar containing nano and micro silica after freeze and thaw cycles, *Construction and Building Materials* 241: 118027.

Enfedaque A.; Cendón D.; Gálvez F.; Sánchez-Gálvez V. 2010. Analysis of glass fiber reinforced cement (GRC) fracture surfaces, *Construction and Building Materials* 24: 1302–1308.

Enfedaque A.; Paradela L.S.; Galvez V.S. 2012. An alternative methodology to predict aging effects on the mechanical properties of glass fiber reinforced cements (GRC).

EN 15191:2009. Precast concrete products. Classification of glassfiber reinforced concrete performance

EN 13198:2003. Precast concrete products. Street furniture and garden products

Fenu L., Forni D., Cadoni E. 2016. Dynamic behavior of cement mortars reinforced with glass and basalt fibers, *Composites Part B* 92: 142–150.

Fiore V.; Scalici T.; Bella G.; Valenza A. 2015, A review on basalt fiber and its composites. *Composites: Part B* 74: 74–94.

- Flores Y. C., Cordeiro G. C., Filho R.D.T., Tavares L. M. 2017. Performance of Portland cement pastes containing nano-silica and different types of silica, *Construction Building Materials* 146: 526–530.
- Frank E.; Steudle L. M.; Ingildeev D.; Sporn J. M.; Buchmeiser M. R. 2014. Carbon fibers: precursor systems, processing, structure, and properties. *Angewandte Chemie International Edition* 53: 5262–5298.
- Förster T.; Hao B.; Mäder E.; Simon F.; Wölfel E. 2016. CVD-Grown CNTs on Basalt Fiber Surfaces for Multifunctional Composite Interphases. *Fibers* 4.4: 28.
- Frederick T.; Paul A. 2009. Fiberglass and Glass Technology: Energy-Friendly Compositions and Applications. *Springer*: 211.
- Gao, S.L.; Mader, E.; Plonka, R. 2007. Nanocomposite coatings for healing surface defects of glass fibers and improving interfacial adhesion. *Composites Science and Technology* 68: 2892–2901.
- Gopalaratnam V.S. 1995. On the Characterization of Flexural Toughness in Fiber Reinforced Concretes. *Cement & Concrete Composites* 17: 239–254.
- Gribniak V.; Kaklauskas G.; Torres L.; Daniunas A.; Timinskas E.; Gudonis E. 2013. Comparative analysis of deformations and tension-stiffening in concrete beams reinforced with GFRP or steel bars and fibers. *Composites Part B: Engineering* 50: 158–170.
- Grimer F.J.; Ali M.A. 1969. The strength of cements reinforced with glass fibers. *Magazine of concrete research* 21–16: 23–30.
- Gruszczyński M., Lenart M. 2020. Durability of mortars modified with the addition of amorphous aluminum silicate and silica fume, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics* 107: 102526.
- Guan X.; Liu X.; Jis X.; Yuan Y.; Cui J.; Mang H. A. 2015. A stochastic multiscale model for predicting mechanical properties of fiber reinforced concrete. *International Journal of Solids and Structures* 56: 280–289.
- Hillerborg A.; Modéer M.; Petersson P. E. 1976. Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements, *Cement and Concrete Research* 6: 773–782.
- Hillerborg A. 1985. The theoretical basis of a method to determine the fracture energy GF of concrete. *Mater. Struct.* 18: 291–296.
- Huijun W.; Jing Z.; Zhonghang W.; Ting, S.; 2013. Damage action of Alkali-resistant Glass Fiber in Cement-based Material. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater Sci.* Ed.:761–765.
- Ispir M.; Dalgic K. D.; Hajihosseini S.; Ilki A. 2015. Long term deformation monitoring of GRC façade panels under ambient conditions. *GRCA congress 2015 proceedings*
- Jamshidia M.; Ramezani-pourb A. A. 2011. Laboratory and industrial investigations on hybrid of acrylic and glass short fibers as an alternative for substituting asbestos in Hatschek process. *Construction and Building Materials* 25–1: 298–302.

- Jaras A. C.; Litherland, K. L. 1975. *Proceedings in RILEM symposium: Fiber Reinforced Cement and Concrete*, 327.
- Jiang C.; Fan K.; Wu F.; Chen D. 2014. Experimental study on the mechanical properties and microstructure of chopped basalt fiber reinforced concrete. *Mat. Design* 58: 187–193.
- Khandel S.; Rhee K. Y. 2020. Recent advances in basalt–fiber–reinforced composites: Tailoring the fiber–matrix interface. *Composites Part B: Engineering* 192: 108011.
- Khana M. I., Siddiqueb R. 2011. Utilization of silica fume in concrete: Review of durability properties.
- Köksal F., Altun F., Yigit I., Sahin Y. 2008. Combined effect of silica fume and steel fiber on the mechanical properties of high strength concretes, *Construction Building Materials* 22 (8): 1874–1880.
- Krumbein W. C. 1941. Measurement and geological significance of shape and roundness of sedimentary particles. *J Sediment Res* 11: 64–72.
- Krumbein W. C.; Sloss L. L. 1963. *Stratigraphy and sedimentation. 2nd ed. San Francisco: W.H. Freeman and Company.*
- Laws V.; Langley A.A.; West J.M. 1986. The glass fiber/cement bond. *Journal of Materials science* 21: 289–296
- Lee, J. J.; Song J.; Kim H. 2014. Chemical stability of basalt fiber in alkaline solution. *Fibers Polym.* 15: 2329–2334.
- Lees G. 1964. A new method for determining the angularity of particles. *Sedimentology* 3: 2–21.
- Li Z., Ding Z. 2003. Property improvement of Portland cement by incorporating with metakaolin and slag, *Cement Concrete Research* 33: 579–584.
- Litherland K. L.; Oakley D. R.; Proctor B. A. 1981. The use of accelerated ageing procedures to predict the long term strength of GRC composites. *Cement and Concrete Research* 11: 455–466.
- Loewenstein K. L. 1973. *The Manufacturing Technology of Continuous Glass Fibers. New York Elsevier Scientific: 2–94.*
- Lu J.; Li W.; Kang H.; Feng L.; Xu J.; Liu R. 2020. Microstructure and properties of polyacrylonitrile based carbon fibers. *Polymer Testing* 81: 106267.
- Mader, E.; Plonka, R. 2004. Coatings on alkali-resistant glass fibers for the improvement of concrete. *Journal of Industrial Textiles* 33: 191–208.
- Madhkhani M., Katirai R. 2019 Effect of pozzolanic materials on mechanical properties and aging of glass fiber reinforced concrete, *Construction and Building Materials* 225: 146–158.
- Magalhães M. S.; Toledo Filho R. D.; Fairbairn E. M. R. 2013. Durability under thermal loads of polyvinyl alcohol fibers. *Matéria (Rio J.)* 18: 1587–1595.

- Majumdar A. J.; West J. M.; Larnar, L. J. 1977. Properties of glass fibers in cement environment. *Journal of Materials Science* 12: 927–936.
- Mehta P. K., Monteiro P. J. 2006. Concrete: Microstructure, Properties, and Materials, McGraw-Hill, New York.
- Mills R. H. 1981. Preferential precipitation of calcium hydroxide on alkali-resistant glass fibers. *Cement and Concrete Research* 11: 689–697.
- Mills R. H. 1981. Age-embrittlement of glass-reinforced concrete containing blast furnace slag, *Cem. Concr. Res.* 11: 421–428.
- Moussard, M.; Garibaldi, P.; Curbach, M. 2017. The Invention of Reinforced Concrete (1848–1906), *High Tech Concrete: Where Technology and Engineering Meet*, 2785–2794.
- Myadaraboina H., Atmaja E.S. 2015. Stability of basalt fibers in concrete medium. *2nd R.N. Raikar Memorial International Conference*. 19 December, Mumbai, India.
- National Precast Concrete Association of Australia. 2006. Design, Manufacture and Installation of Glass Reinforced Concrete (GRC), Suite 2, 13 Brighton Road, Glenelg, SA 5045, Australia.
- Ngab P. L.; Barrosc J. A. O.; Kaklauskas G.; Lame J. Y. K. 2020. Deformation analysis of fiber-reinforced polymer reinforced concrete beams by tension-stiffening approach. *Composite Structures* 234.
- Nicolas R., Cyr M., Escadeillas G. 2014. Performance-based approach to durability of concrete containing flash-calcined metakaolin as cement replacement. *Construction and Building Materials* 55: 313–322.
- Orlowsky, J.; Raupach, M.; Cuypers, H.; Wastiels, J. 2005. Durability modeling of glass fiber reinforcement in cementitious environment. *Materials and Structures* 38: 155–162
- Paegle I.; Minelli F.; Fischera G. 2016. Cracking and load-deformation behavior of fiber reinforced concrete: Influence of testing method. *Cement and Concrete Composites* 73: 147–163.
- Palmer, R. 2011. The Masdar Institute's GRC Residential Facade. GRCA international conference, Istanbul.
- Patterson W. A., Chan H. C. 1975. Fracture toughness of glass fibre-reinforced cement, *Composites* 6: 102–104.
- Paul, A. 1977. Chemical durability of glasses: a thermodynamic approach. *Journal of Materials Science* 12: 2246–2268.
- Peled A.; Jones J.; Shah S.P. 2005. Effect of matrix modification on durability of glass fiber reinforced cement composites. *Materials and Structures* 38: 163–171.
- Peter I. D.; Crocker I. 2015 Further Investigations into Premix GRC, *GRCA symposium*, Dubai.
- Pigeon M., Pleau R. 2010. Durability of Concrete in Cold Climates, *CRC Press*, 2010.

- Powers M. C. 1953 A new roundness scale for sedimentary particles. *SEPM J Sediment Res.* 23:117–9.
- Poon C.S., Lam I., Kou S.C., Wong Y.L., Wong R. 2001. Rate of pozzolanic reaction of metakaolin in high-performance cement pastes, *Cement Concrete Research* 31: 1301–1306.
- Purnell P.; Beddows J. 2005. Durability and simulated ageing of new matrix glass fiber reinforced concrete. *Cement and Concrete Composites* 27: 875–884.
- Purnell P.; Cain J.; Itterbeck P.; Lesko J. 2008. Service life modeling of fiber composites: A unified approach. *Composites Science and technology* 68: 3330–3336.
- Purnell P., Short N. R.; Page C. L.; Majumdar A. J. 1999. Accelerated ageing characteristics of glass-fiber reinforced cement made with new cementitious matrices. *Composites: Part A* 30: 1073–1080.
- Purnell P.; Short N.R.; Page C.L. 2001. Super-critical carbonation of glass-fiber reinforced cement. *Composites Part A: Applied science and manufacturing* 32: 1777–1787
- Purnell P., Short N. R.; Page C. L.; Majumdar A.J. 1999. Accelerated ageing characteristics of glass-fiber reinforced cement made with new cementitious matrices. *Composites: Part A* 30: 1073–1080.
- Ramaswamy H. S.; Ahuja B. M.; Krishnamoorthy S. 1984. J. Mex. Inst. Cement Concrete 22–161
- Rickard C. 2015. GRC developments in Australia, *GRCA symposium*, Dubai.
- Richard P.; Cheyrezy M. 1995. Composition of reactive powder concretes. *Cement and concrete research* 25: 1501–1511.
- Robinovic F. N.; Zenza, V. N.; Makeeva L. V. 2001. Stability of basalt fibers in a medium of hydrating cement. *Glass Ceram.* 58: 11–12.
- Rothe, C.; Gao, L.S.; Plonka, R.; Mader, E. 2015. Nano surface structuring of alkali-resistant glass fibers for multifunctional effects. 1st International Conference Textile Reinforced Concrete. Leibniz Institute of Polymer Research Dresden, Germany
- Rybin V. A.; Utkin A. V.; Baklanova N. I. 2013. Alkali-resistant coating for basalt fibers *Prot. Met. Phys. Chem* 49: 689–692.
- Saida M.; Azimb Mahmoud A.; Ali M.; El-Ghazaly H.; Shaabanc I. 2020. Effect of elevated temperature on axially and eccentrically loaded columns containing Polyvinyl Alcohol (PVA) fibers. *Engineering Structures* 204: 110065.
- Safiudin M.; Yakhlaif M.; Soudki K. A. 2018. Key mechanical properties and microstructure of carbon fiber reinforced self-consolidating concrete. *Construction and building materials* 164: 477–488.
- Sheldon R. R. 1982. Composite Polymer Materials. London: Applied Science Publishers.
- Sharma R., Khan R. A. 2018. Influence of copper slag and metakaolin on the durability of self compacting concrete, *Journal of Cleaner Production* 171: 1171–1186.

- Shi C.; Wu Z. 2015. A review on ultra high performance concrete. *Construction and building materials* 101: 741–751.
- Shon C. S., Lee D., Kim J. H., Chung C.W. 2018. Freezing and thawing resistance of cellular concrete containing binary and ternary cementitious mixtures. *Construction and Building Materials* 168: 73–81.
- Siddique R. 2011. Utilization of silica fume in concrete: Review of hardened properties. *Resources, Conservation and Recycling* 55: 923–932.
- Soni N., Shukla D. K. 2021. Analytical study on mechanical properties of concrete containing crushed recycled coarse aggregate as an alternative of natural sand, *Construction and Building Materials* 266: 120595.
- Sprince A.; Korjakins A.; Pakrastinsh L. 2013. Time-dependent Behavior of High Performance Fiber–reinforced Concrete. *Advanced Materials Research* 05PP:75–80.
- Sprince A.; Pakrastinsh L.; Vatin N. 2016. Crack formation in cement-based composites. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 123, Issue 1.
- Stein C. 2011. GRC for the Restoration of Historic Buildings. GRCA international conference, Istanbul.
- Sukontasukkul P. 2004. Toughness Valuation of Steel and Polypropylene Fiber Reinforced Concrete Beams under Bending. *Tha mmasat Int. J. Sc. Tech.* 9– 3: 35–41.
- Tanyildizi H.; Yonar Y. 2016. Mechanical properties of geopolymer concrete containing polyvinyl alcohol fiber exposed to high temperature. *Construction and Building Materials* 126: 381–387
- Tanaka F.; Okabe T. 2018. Historical Review of Processing, Microstructures, and Mechanical Properties of PAN–Based Carbon Fibers. *Comprehensive Composite Materials* 1: 66–85.
- Tasdemir M. A., Bayramov F. 2002. Mechanical behavior of cement based composite materials, *ITU J/d Eng.* 1 125–144.
- Theodorakopoulos D.D. 1995. Shrinkage behaviour of GRC Thin Sheets. *Cement and Concrete Composites* 17: 229–238.
- Toutanji H.; Xu B.; Gilbert J.; Lavin T. 2010. Properties of poly(vinyl alcohol) fiber reinforced high–performance organic aggregate cementitious material: Converting brittle to plastic. *Construction and building materials* 24: 1–10.
- Urkanova L. A.; Lkhasaranov S. A.; Rozina V. Y.; Buyantuev S. L.; Bardakhanov S. P. 2014. Increased corrosion resistance of basalt reinforced cement compositions with nano-silica. *Nanotechn. Constr.* 6: 15–29.
- Wadell H. 1933. Sphericity and roundness of rock particles. *J Geol* 41:310.
- Wu J. Y.; Xian G. J.; Hui L. I. 2011. Durability study of basalt fiber and its frp bars. *Fiber Reinforced Plast./Compos.* 32: 58–61

- Yakhlaif M.; Safiudin M.; Soudki K. A. 2013. Properties of freshly mixed carbon fiber reinforced self-consolidating concrete. *Construction and building materials* 46: 224–231.
- Yakovlev G. I.; Politaeva A. I.; Galinovsky A. L.; Golubev V.A.; Saraykina K. A.; Zykova E. S. 2015. Nanostructuring as a method of adhesion properties increase of the "cement stone – basalt fiber reinforcement". *Izv. KGASU–2* 32: 281–288.
- Yang E.H.; Li V.C. 2010. Strain-hardening fiber cement optimization and component tailoring by means of a micromechanical model. *Construction Building Materials* 24: 130–139.
- Zhang X.F.; Xu S.L. 2008. Determination of fracture energy of three-point bending concrete beam using relationship between load and crack-mouth opening displacement, *J. Hydraul. Eng.* 39: 714–719.
- Zheng J.; Hryciw R. D. 2015. Traditional soil particle sphericity, roundness and surface roughness by computational geometry. *Géotechnique* 65: 494–506.
- Zhou Y.; Hou D.; Manzano H.; Orozco C. A.; Geng G.; Monteiro P. J.; Liu J. 2017. Interfacial connection mechanisms in calcium-silicate-hydrates/polymer nanocomposites: a molecular dynamics study. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 9 (46): 41014–41025.
- Zhu W.; Bartos, M.J. 1997. Assessment of interfacial microstructure and bond properties in aged GRC using a novel microindentation method. *Cement and Concrete Research* 27: 1701–1711.
- Zinck, P.; Pays, M. F.; Rezakhanlou, R; Gerard, J.F. 1999. Mechanical characterisation of glass fibers as an indirect analysis of the effect of surface treatment. *Journal of Materials Science* 34: 2121–2123.
- Zingg T. 1935. Beitrag zur Schotteranalyse. *Schweiz Miner Petrogr Mitt* 15:39–140.

Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema sąrašas

Straipsniai recenzuojamuose mokslo žurnaluose

Moceikis, R.; Kičaitė, A.; Skripkiūnas, G.; Korjakins, A. 2018. Ageing models and accel rated ageing tests of glass fiber reinforced concrete, *Engineering structures and technologies*. Vol 10(1): 10–17. eISSN 2029-8838.

Moceikis, R.; Kičaitė, A.; Skripkiūnas, G.; Yakovlev, G. 2018. Mechanical characteristics and ductility of glass fiber reinforced concrete with modified matrix, *Construction materials*. Vol 12: 27–33. eISSN 2029-8838. ISSN 0585-430X.

Moceikis, R.; Kičaitė, A.; Sahmenko, G.; Selskienė, A. 2020. Durability characterisation of glass fiber reinforced concrete by resistance to freezing and thawing, *Journal of sustainable architecture and civil engineering*. Vol 26(1): 10–17. ISSN 2029-9990.

Straipsniai kituose leidiniuose

Moceikis, R.; Kičaitė, A.; Keturakis, E. 2017. Workability of glass reinforced concrete (GRC) with granite and silica sand aggregates, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 3rd International conference Innovative Materials, Structures and Technologies. Vol 251: 1–8. ISSN 1757-8981.

Moceikis, R.; Karpova, E.; Kičaitė, A.; Skripkiūnas, G. 2019. Effect of aggregates on the technological and mechanical properties of glass and basalt fibers reinforced concrete, *3rd World Multidisciplinary Civil Engineering, Architecture, Urban Planning Symposium (WMCAUS 2018)*. Vol 471: 1–8. ISSN 1757-8981.

Moceikis, R.; Kičaitė, A.; Skripkiūnas, G. 2019. Effect of aggregate particle shape and granulometry on the workability and mechanical properties of glass reinforced concrete, *The 13th international conference "Modern building materials, structures and techniques"*. 102–108. eISSN 2029-9915

Moceikis, R.; Kičaitė, A.; Sahmenko, G.; Korjaks, A. 2019. Properties of thin wall cement composites reinforced with AR glass, Carbon and PVA fibers, *IOP Conference series: Materials science and engineering* Vol 660(1): 1–7. ISSN 1757-8981

Summary in English

Introduction

Formulation of the problem

After incorporating fibers with a high tensile strength and deformation modulus into the cementitious matrix, the brittle material (concrete) is transformed into a new type of composite resistant to the above-mentioned effects. In the scientific literature, the study of the mechanical properties of these composites is often limited to the bending strength, which does not specify the plastic properties inherent in these products. Therefore, to describe the mechanical strength of dispersive reinforced concrete composites, it would be expedient to use the flexural strain energy, which determines the ability of a material to plastically deform to failure (when the specimen reaches a certain deflection limit).

The workability of concrete mix influences the qualitative parameters of the surface of the formed product (structure, texture and number of pores) as well as the integrity of the cement matrix and the distribution of fibers in it. Therefore, it is necessary to investigate the effect of crushed rock aggregates on the workability and segregation of mixtures, to determine the dependences of these parameters on the particle shape of the aggregate. To improve technological parameters and performance characteristics of concrete composite with disperse reinforcement, active micro fillers can be used. The effect of these additives on the resistance of glass fiber-reinforced composites on the effects of freezing and thawing cycles and on the flexural strain energy has so far been very little studied.

Relevance of the thesis

In the construction sector, the natural concrete facades have been rapidly gaining popularity recently. Although this trend is mainly related to the influence of architecture as an art form in the search for a new subtle materiality, it also touches on very important issues of the sustainability of building materials. Facades with a decorative concrete function have gained a great advantage in recent decades when the walls are designed from prefabricated three-layer or individual single-layer decorative wall elements. This method of construction allows significant savings in labor, automation of various technological processes that are easier to control and ensure significantly better product quality.

The use of dispersive reinforced concrete in the industrial production of three-layer wall elements is a promising innovation that would significantly facilitate constructions and reduce wall thickness. As a result, transportation costs would be reduced, loads on load-bearing walls, foundations, and the area of indoor premises would increase. It also shortens the product formation time, as it is no longer necessary to produce reinforcement frames. Since the wall elements are formed in a horizontal position in the factory, the use of such decorative concrete mixtures investigated in this work results in high-quality concrete surfaces.

Another wide range of applications for dispersive reinforced concrete is the use of casting or spraying suspended wall elements for ventilated facades. Compared to the popular Hitchek method of fibrous cement boards, it would be possible to go beyond flat-shaped products and use special formwork to obtain complex shapes and various surface reliefs.

The object of research

The object of research is dispersive reinforced fine-grained decorative concrete with different aggregates and additives that modify the structure of the cement matrix.

The aim of the thesis

The aim of this work is to develop dispersive reinforced concrete for the production of prefabricated wall elements with different fibres, aggregates and mineral additives.

The tasks of the thesis

To achieve the goal of the work, the following tasks need to be solved:

1. To select raw materials and their proportions for the finishing concrete composite in the production of prefabricated wall elements, which would ensure the resistance of the product to brittle fracture and cracking.
2. To determine the effect of glass, basalt, carbon and polyvinyl alcohol fibers on the technological and mechanical properties of thin-walled finishing concrete when concrete mixtures are prepared by intensive mixing.
3. To determine the effect of particle shape of quartz sand, crushed granite and conventional gravel quarry sand aggregates on the workability and segregation of dispersive reinforced fine-grained concrete.

4. To determine the effect of SiO₂ micro fume and metakaolin mineral additives on the resistance of dispersive reinforced concrete to cyclic freezing and thawing, evaluating the defects of the concrete finishing surface - the amount of surface scaling and changes in flexural strain energy, when the product life expectancy is not less than 20 years.
5. To investigate the changes of fiber surface structure because of freezing and thawing cycles when the cement matrix is modified with SiO₂ micro fume and metakaolin active mineral additives.

Research methodology

The effect of aggregates on the workability and segregation of concrete was investigated according to the methodology developed in this work. The effect of active mineral additives on the durability of concrete was determined by surface freezing and thawing tests, introducing a new criterion in the methodology of building materials testing, describing the work of the material up to full fracture – flexural strain energy. Other properties of dispersive reinforced concrete were determined according to the standards LST EN 1170-1, LST EN 1170-4, LST EN 196-1, LST EN 15191, LST EN 13198. A scanning electron microscope was used to study the changes in the structure of the matrix and fiber contact zone (SEM).

Scientific novelty of the thesis

The scientific novelty of the dissertation is described by the improvement of test methods for the assessment of durability of dispersive reinforced decorative concrete, as well as the modification of new cementitious mixtures using complex components and setting limit values for concrete and its components (components) operating in Baltic region climatic conditions. The following new results for materials engineering were obtained during the preparation of the dissertation:

1. The effect of crushed rock aggregates on the technological properties of concrete mixtures is explained and the influence of the aggregate particle shape on the workability and segregation of glass fiber reinforced fine-grained concrete mixture is determined.
2. The impact mechanism of SiO₂ micro fume and metakaolin mineral additives under the action of flexural strain energy of fine-grained glass fiber reinforced concrete composite under cyclic freezing and thawing is explained.
3. Active mineral additives have different effects on the microstructure of fine-grained concrete-cement matrix, on which the durability of concrete depends, described as the loss of mass of the finishing surface under cyclic freezing and thawing

Practical value of the research findings

A dispersive reinforced concrete composite has been developed, which can be used in the production of three-layer prefabricated wall elements by thinning the finishing concrete layer to 15 mm.

The effect of aggregate production waste – crushed granite and conventional gravel quarry sand aggregates on the technological and mechanical properties of concrete, when these aggregates are replaced by up to 50 quartz sand in the concrete mixture, was determined.

A methodology for assessing the durability of glass fiber reinforced concrete finishing surface according to the area of the detached surface was developed and the effect of metakaolin and SiO₂ micro fume additives on surface destruction was investigated.

Defended statements

1. Segregation of the glass fiber reinforced fine-grained concrete mixture decreases by increasing the amount of round filler particles that ensure even distribution of the cement matrix and fiber.
2. Active mineral additives of metakaolin and SiO₂ micro fume increase the flexural strain energy of glass fiber reinforced fine-grained concrete composite after the action of freezing and thawing cycles.
3. Active mineral additives have a different effect on the microstructure of a fine-grained concrete-cement matrix, on which the durability of the concrete depends, described as the loss of mass of the finishing surface under cyclic freezing and thawing.

Approval of the research findings

7 scientific articles have been published on the topic of the dissertation: three – in the peer-reviewed scientific journals (Moceikis et al. 2018a; Moceikis et al. 2018b; Moceikis et al. 2020), two in the publications of the Clarivate Analytics Web of Science database in Conference Proceedings (Moceikis et al. 2017; Moceikis et al. 2018c) and two in the other conference proceedings (Moceikis et al. 2019a; Moceikis et al. 2019b;).

Results of the research were published in seven scientific conferences in Lithuania and abroad:

- International 19th Young Scientists Conference „*Juniorstav*“, 2017, Brno, Czech Republic;
- 20th Lithuanian Young Scientists Conference „*Science–Lithuania's Future*“, 2017, Vilnius;
- 3rd International Conference “*Innovative Materials, Structures and Technologies*” 2017, Riga;
- 4th International Conference “*World Multidisciplinary Civil Engineering – Architecture – Urban Planning Symposium*” 2018, Prague;
- 13th International Conference „*Modern Building Materials Structure and Techniques*“, 2019, Vilnius;
- 4th International Conference „*Innovative Materials, Structures and Technologies*“, 2019, Riga;
- 28th International Conference on XXVIII Scientific and Technological Conference of the Latvian Concrete Association (LCA), 2019, Riga.

Structure of the thesis

The dissertation consists of an introduction, three chapters, general conclusions, lists of used literature sources and the author's publications, summary in English. The volume of the dissertation is 121 pages, excluding appendices, 11 numbered formulas, 74 figures and 15 tables are used in the text. 128 literature sources were used in writing the dissertation.

1. Research analysis of technological and performance characteristics of decorative concrete with disperse reinforcement

The effect of fiber reinforcement on the mechanical properties of cement matrix is characterized by an increase in the impact strength of the matrix as well as flexural strain energy and resistance to tensile stresses. Fiber reinforced fine graded decorative concrete is used to form precast concrete products. These can be wall elements of new buildings, facade details of historic buildings, landscaping products, interior details.

Conventional Portland cement, fine sand ($D_{\max} = 2 \text{ mm}$), superplasticizer, glass fibers and water are used for the basic glass fiber reinforced concrete composition. Commonly used filler to binder ratio is 1:1, glass fiber content by weight 2–5% of dry materials, water/cement ratio is between 0.3–0.4. The density of hardened concrete varies between 1800 and 2200 kg/m^3 , depending on the composition of the concrete.

The shear mixing method is used for these fine-grained mixtures when the concrete mixer has high-speed (up to 1500 rpm) rotating shaft with a spring-shaped nozzle.

The properties of hardened concrete depend on such factors as the method of production, type and amount of fibers, hardening conditions, structure of the cement matrix. In the case of flowable concrete, workability of the fresh mix is also a very important parameter. Research has shown that fine grained glass fiber-reinforced concrete has a flexural strength of 10–15 MPa, depending on the fiber content and cement matrix composition (Peter 2015).

Studies on the workability of concrete have shown that at a dosage of 12 kg/m^3 and 40 kg/m^3 of basalt fiber to normal concrete mixture cannot be mixed because the mixture becomes stiff and fiber balling occurs (Branston et al., 2016).

Yakhla (2013) found that carbon fibers severely deteriorated the workability of self-compacting normal concrete when the fiber was dosed 0.25% from dry weight of the materials. Arisoy (2008) and Toutanji (2010) found that PVA fibers increased the plasticity (deflection at maximum load) of normal concrete by 50 to 150 times, and flexural strength by 50–250%.

Due to intense chemical corrosion in alkaline media, conventional fiberglass cannot be used in systems with a Portland cement binder. The chemical composition of alkali-resistant glass, developed in the 1960s, was improved by the inclusion of zirconium oxide: SiO_2 71%, ZrO_2 16%, Na_2O 12% and Li_2O 1%.

According to the Australian Association of Reinforced Concrete Manufacturers, known values for the 28-day flexural strength of spray-produced concrete range from 21 to 35 MPa. When the products are used under natural climatic conditions, the bending strength gradually decreases until it reaches a constant value. According to the above-mentioned Australian recommendations, the maximum long-term strength of 17 MPa is

achieved with a new type of cementitious matrices, for example by modifying the metakaolin additive. The long-term strength of typical sprayed glass fiber reinforced concrete used in production is 13.5 MPa in Australian climates and 15 MPa in Great Britain.

For a long time, the main cause of the decrease in strength has been thought to be chemical reactions in the contact zone of the glass fiber and cement matrix. However, empirical studies by scientists have refuted this assumption, as long term tests by Litherland and sampling of existing buildings showed no signs of significant chemical reactions in the fiber-matrix contact zone or a reduction in the cross-sectional area (Bentur et al., 1985; Cohen et al., 1985; Diamond et al., 1985; Jaras et al., 1975). Based on the results of these studies, scientist Purnell (2001) proposed a theoretical model of corrosion of glass fiber reinforced concrete based on the occurrence of nano-cracks on the fiber surface. This phenomenon in the glass scientific literature is called static fatigue and is described as the gradual cracking of SiO_2 bonds at the tips of the cracks under static loading.

Enfedaque (2009) compared the flexural strength data obtained by two different methods (freezing/thawing and wetting/drying). Typical matrix specimens were found to lose the same amount of initial strength after 50 freeze/thaw cycles as after 200 wetting/drying cycles. It can be assumed that the long-term strength of glass fiber reinforced cement composite can be determined using the freezing/thawing test method instead of soaking in hot water or drying wetting according to EN 1170-8, which usually takes significantly longer (up to 8 times) to obtain the same data.

2. Materials used for the composite and research methods

Portland cement CEM I 52.5R with the same characteristics, manufactured in accordance with the requirements of the standard LST EN 197-1: 2011, was used in the tests for all concrete mix compositions. Portland cement particle size distribution was determined using a laser particle analyzer CILAS 1090 Liquid.

Fine aggregates with the largest particles $d_{\max} = 2$ mm were used in the studies. Several aggregates of different granulometry and origin were selected: natural quartz quarry ($d_{\max} = 1.25$ mm), crushed granite ($d_{\max} = 2$ mm), natural gravel quarry sand ($d_{\max} = 2$ mm). Granulometric compositions were determined according to the standard LST EN12620: 2003 A1: 2008 using a standard set of sieves for concrete aggregates.

SiO_2 micro fume and metakaolin were used as micro fillers for modifying the structure of a cementitious matrix that are often used in engineering practice to improve various properties of finishing concrete. Particle size distribution of these additives were determined by a laser analyzer CILAS 1090 Liquid.

A high-efficiency and widely used polycarboxylate ether-based superplasticizer was used to plasticize the cement matrix.

Several different fibers have been selected for cement matrix reinforcement – glass, basalt, carbon and polyvinyl alcohol (PVA).

Binder/filler ratio used was 1:1 for the base composition, the amount of superplasticizer was 1.1 % by weight of the binder, the amount of glass fiber was 2.9% by weight of the filler-binder matrix and the water/binder ratio $V/C = 0.36$.

To evaluate the effect of different fillers on the consistency and mechanical properties of the basic SPAB matrix, part of the quartz was replaced with alternative fillers –

crushed granite and natural sand, changing their amount up to 50, at intervals of 10% (0%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%).

Effect of different fibers on the properties of the GRC base matrix was determined according to the second group of test mixtures. The selected control glass fiber content was 2.9% from the matrix weight. The content of basalt and carbon fibers was reduced to 1.45% and 0.7%, respectively, due to their significant effect on the consistency of the mixture. The amount of PVA fiber is converted to specific gravity and corresponds to the amount of glass fiber in units of volume at 1.5% by weight of the matrix.

For the workability testing of concrete mixtures, the cylinder slump method, suitable for fine-grained cementitious composites with fibers up to 20 mm in length, was chosen. Inner diameter of the cylinder is 57 mm, and height of 55 mm. Microscopic pictures of aggregates were used to determine particle shape influence on the mix workability.

Flexural strength was determined in accordance with LST EN 1170-4 when tested according to the four-point test scheme. Flexural strain energy was calculated based on RILEM recommendations. Compressive strength of concrete was determined in accordance with the LST EN 12390-3.

Density of the samples was determined according to LST EN 12390-7: 2009.

The frost resistance of concrete was determined by the surface freezing method. The samples were kept in a climate chamber for up to 112 freezing and thawing cycles with a duration of 24 hours per cycle. The tested surface of each sample (150 × 262 mm) was coated with a 5 mm thick solution of 3% NaCl. Every 7 days, the samples are removed from the freezer for a maximum of 30 minutes, the NaCl solution is poured off, the surface of the sample is scrubbed with a metal brush and the surface fragments are collected by washing with a water jet, dried, weighed and the surface weight loss is calculated in g/m².

3. Research of technological and performance characteristics of decorative concrete with disperse reinforcement modified by mineral additives

For thin-walled decorative concrete elements, it is important that the fiber reinforcing the matrix structure is oriented as horizontally as possible in the direction of the external tensile forces. Also, the concrete mix of cast products must be technological and flowable and fill the formwork.

In tests with different fibers, it has been observed that the workability of the mixture deteriorates significantly with the use of basalt and carbon fibers (Fig. S.3.1). Changes in workability are related to the fact that during mixing, the fibers break down into single filaments, which are widely distributed in the matrix volume and increase the area of the fiber-matrix contact zone, which has also been found in other researchers (Branston et al., 2016; Yakhlaif et al., 2013; Safiudin et al., 2018). After evaluating the research carried out by the researchers, it was chosen to perform experiments with 2.9%, 1.45% basalt fiber contents and 0.72%, 0.18% carbon fiber contents. The amount of PVA fiber chosen (1.5%) corresponds to the fiber content by volume, as the densities of these materials differ almost twice.

Fig. S3.1. Effect of fiber type on the slump of concrete mix (test cylinder 57×55 mm)

Summarizing the mechanical properties of fine-grain concrete with different fibers, it can be stated that glass fibers increased the flexural strain energy of cementitious matrix by 38 times and polyvinyl alcohol fibers by 114 times, thus giving the brittle material plastic properties when the fibers were dosed at 2.9% and 1.5% from the dry weight of the cement matrix. Although the highest compressive strength 93 MPa was obtained with carbon fiber, this characteristic is not so important for the elements subjected to bending deformation forces.

As flowable concrete mixtures are studied in this work, the ability of the mixture to spread quickly and evenly and to fill the formwork of the formed product is especially important. In the production of thin-walled products, it is difficult to apply concrete compaction means. Therefore, an important requirement for concrete mixtures is spreading, shrinkage and segregation resistance of the mixture.

The use of alternative fillers for quartz sand significantly deteriorated the workability of the concrete mix, in some cases resulting in high fiber-matrix segregation. Therefore, it was proposed to introduce a new parameter for the workability of the mixture, the segregation index W :

$$W = \frac{D_1 - D_2}{h}, \quad (S1)$$

where, D_1 is the maximum diameter of the dispersed mixture, calculated as the average of the two perpendicular measurements, cm; D_2 is the inside diameter of the scattered mixture, calculated as the average of the two perpendicular measurements, cm; h - slump of the concrete mixture, cm.

Fig. S3.2. Segregation parameters for compositions with different aggregates quantities

Influence of aggregates on the workability of the concrete mix can be explained by the shape of the aggregate particles. Quartz particles have a spherical shape with smooth surfaces, which results in less friction between the cement matrix, the filler and the fiber. Crushed granite particles have a plate-like shape with sharp edges, which particularly increases the internal friction of the matrix, the fiber gets stuck between the larger particles, and the smaller ones flow through the gaps together with the cement mortar (Figure S3.3). The particles of conventional sand aggregate have irregular spatial polygonal shapes, so the consistency parameters of the mixtures are close to the compositions with granite aggregate.

Fig. S3.3. Crowding effect of fibers when sharp edged particles are introduced

Using up to 7.5% SiO_2 micro fume the spread of the concrete decreased from 19 cm to 13 cm (31%) and with 7.5 % metakaolin to 15cm (21%). This difference in effect on workability can be explained by the fact that the surface area of silica fume particles is significantly larger than that of metakaolin.

Density measurements of concrete mix with different aggregates showed that the density of basic fiber–reinforced concrete mix with quartz aggregate was 2190 kg/m^3 , and

the granite aggregate increased the density of fresh concrete by up to 2221 kg/m³ while sand up to 2242 kg/m³.

The results of the research showed that the maximum flexural strength of the basic glass fiber reinforced composite with quartz sand is 13.3 MPa, and the compressive strength is 82.9 MPa, when the samples are 40 mm thick prisms. Changing the specimens to 15 mm thick plates resulted in a reduction of flexural strength to 10.2 MPa, and when specimens in 100x100 cubes, the compressive strength decreased to 74.2 MPa.

Studies with different aggregates have shown that replacing 10%, 20%, 30%, 40%, 50% quartz with granite or regular sand reduces the flexural strength of the composite and ranges between 11.34–12.68 MPa when using granite and between 12.22–13.27 MPa when using regular sand.

No significant effect on flexural strength was observed when dosing micro-fillers up to 7.5% from the cement mass. The strength of the samples with silica fume ranged from 9.1 to 10.6 MPa, where the lowest value was obtained with 5% additive. Metakaolin had an even smaller effect, the results ranged from 10.3 to 10.7 MPa.

The highest value of compressive strength was obtained with 7.5% SiO₂ micro fume (4 MPa). Lowest with 2.5% metakaolin (–7 MPa). It has been observed that increasing the amount of additives results in an increase in strength, which could be explained by a deterioration in consistency and an overall decrease in the ratio of water to cement with mineral additives in the system.

It was found that the amount of entrained air in the GRC mix without micro-fillers is 2.5% and that silica fume and metakaolin affect this parameter differently. Mixtures with metakaolin were characterized by a decrease in the amount of entrained air to 2%, and an increase up to 4.7% for compositions with silica fume.

Freeze/thaw resistance tests were performed with 7 different concrete compositions (S1, MS1, MS2, MS3, MK1, MK2, MK3) and lasted for 112 days, tested according to the surface cooling method given in Annex B of LST EN13198, where the duration of one full / –20 °C cycle – 24 hours. Every 7 freezing/thawing cycles, the surfaces of the samples were cleaned, the material separated from the surfaces was dried and weighed, and the surfaces were refilled with 3% NaCl solution. The total loss of mass of the scaled material from the surface of the samples after cycles 56 and 112 is given in Figures S3.4 and S3.5.

The addition of silica fume had a negligible effect on surface mass loss (Figure S3.4), which could be explained by the large amount of air introduced in the concrete mix. The highest recorded value is 67 g/m², with 2.5% silica fume. As the amount of silica fume increased, the amount of entrained air increased and the weight loss decreased to 45 g/m² and 0 g/m², respectively.

Fig. S3.4. Impact of silica fume on scaling at freezing and thawing

The addition of metakaolin had a greater negative effect on concrete surface damage (Figure S3.5). When 2.5% and 5% were used for this additive, the weight loss after 112 cycles was similar to that with the silica fume and did not exceed 50 g/m². However, the 7.5% metakaolin addition significantly increased the weight loss from the concrete surface to 115 g/m² after 56 cycles and to 465 g/m² after 112 cycles, respectively. This can be explained by the high density of the matrix due to the increased amount of fine particles and the decreased amount of entrained air in the concrete mix (2.5%).

Fig. S3.5 Impact of metakaolin on scaling at freezing and thawing

In this study, the maximum surface weight loss of concrete specimens was 3 times lower than required by the standard when the number of freezing/thawing cycles exceeded the requirements by 4 times. Nevertheless, the damage to the concrete surfaces was very pronounced visually and occupied 465 g/m² which is up to 50 % of the sample surface area and 67g/m² (10%), respectively (Figure S3.6). The highest resistance of the concrete finishing surface to the effect of freezing/thawing was obtained with the base composition without micro additives – 0 g/m² after 112 cycles.

Fig. S3.6. Photos of specimens after 112 freeze/thaw cycles: a) S1, with no additives; b) MS2 with 5 % silica fume; c) MK3 with 7,5 % metakaolin

It was found that the addition of silica fume increased the flexural strain energy up to 92% before freezing and 85% after 112 freeze/thaw cycles and metakaolin – 90% before and 108% after 112 freezing/thawing cycles (Figures S3.7, S3.8). This means that the plasticity of the composite was increased, and more energy is needed to break it down, the material has become more resistant to dynamic forces, which is very important for thin-walled facade structures.

Fig. S3.7. Impact of silica fume on flexural strain energy

Fig. S3.8. Impact of metakaolin on flexural stain energy

In the samples with micro fillers the surface of the glass fiber filaments after freezing tests did not have the surface defects that were noticed in specimens without active micro fillers. Also, no cracks were observed in the fiber-matrix contact zone in specimens with metakaolin and silica fume.

Based on the results of these experiments and the research carried out by scientists, it can be stated that the degree of deterioration of the mechanical properties of glass fiber reinforced concrete with increasing service life of the composite depends primarily on the alkalinity of the matrix pore solution. Due to the ongoing hydration in the contact zone, the surface of fibers is increasingly covered with hydration products, the morphology and chemical composition of which depend on the binder composition.

A thin layer of C-S-H phases, which results in good bonding properties, predominates in cases where the content of cement clinker in the binder is low and additives that cause pozzolanic reactions (low alkalinity of the pore solution) are used. In cementitious matrices in which only Portland cement is used as a binder, the coarse, brittle phases of Portlandite (high alkalinity of the pore solution) predominate. As the alkalinity of the cement matrix increases, so does the amount of portlandite phases that form certain brittle coatings on the glass fiber surface. Interference of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ crystals between fiber agglomerates can also be observed. Growing Portlandite crystals act as wedges to distort the protective outer shell of glass filaments.

In cementitious matrices using active mineral additives, the pH values of the pore solution decrease due to pozzolanic reactions. The conditions for the formation of portlandite in this case are limited, which results in a favorable microstructure of the fiber-matrix contact zone. The formation of new thin films on the surface of the outer fibers ensures better adhesion of the fiber to the matrix. Studies by scientists on the addition of metakaolin to glass fiber reinforced concrete during wetting and drying cycles have also shown that this additive reduces the brittleness of the composite due to ongoing aging processes, as in the freeze-thaw tests performed in this work.

General conclusions

1. Workability and segregation of fine-grained glass fiber-reinforced concrete mixture depend on the particle shape of the aggregate, which can be described by an elongation index, which is expressed as the ratio of the longer side of the particle to the shortest. As the elongation rate increases, consistency deteriorates and segregation increases. As the elongation index of the aggregate increases by 3%, the spread of the mixture decreases by 10% when conventional sand is used instead of quartz sand. When an irregularly shaped aggregate (crushed granite) is used, the elongation index of the particles increases by 33% compared to quartz sand, and the spread of the mixture decreases accordingly by 50%. Increasing the amount of regular sand from 10% to 50% increases the segregation index from 1.9 to 2.6, and using crushed granite from 2.6 to 3.5, respectively.
2. For glass fiber-reinforced fine-grained concrete aggregates may be used in which spherical particles predominate and elongation index does not exceed 1.4, ensuring even distribution of cement matrix and fibers. Also, for this type of mixtures the segregation index is important, which needs to be assessed during technological operations and can be calculated according to the methodology proposed in this work.
3. When preparing concrete mixtures by intensive mixing, the agglomerates of carbon and basalt fibers decompose into individual fibers and the mixture becomes stiff and non-technological. In this respect, a glass fiber is more suitable, the fibers of which, even during intensive mixing, remain adhered to the agglomerates and remain in a straight shape, thus ensuring the required spreading of the mixture and sufficient reinforcement of the cement matrix.
4. Disperse reinforcement can increase concrete mechanical characteristics. Glass fiber was found to increase the flexural strain energy of the cement matrix from 28 N/m to 1039 N/m (38 times), and polyvinyl alcohol fiber from 28 N/m to 3102 N/m (114 times), thus giving the brittle material plasticity properties when the fibers are dosed at 2.9% and 1.5% by weight of dry matter, respectively.
5. After 112 surface freezing and thawing cycles in 3% NaCl solution, it has been found that active silica fume and metakaolin additives can negatively affect the appearance of glass fiber reinforced decorative concrete products, as they cause surface scaling and cracking of concrete when dosed up to 7.5% from the cement mass. When evaluating the appearance of decorative products, it is proposed to apply different quality classes (A, B, C) by limiting the surface area of detached concrete from 50 cm²/m² to 500 cm²/m².
6. After 112 freezing and thawing cycles in 3 % NaCl solution, the addition of silica fume increases the flexural strain energy of glass fiber reinforced concrete from 620 N/m to 1149 N/m (85%) and metakaolin from 620 N/m to 1149 N/m (108%). In this way, due to the higher plastic deformations and the residual strength, these additives help the composites in question to remain

resistant to mechanical degradation under aggressive climatic conditions during natural weathering.

7. During the aging processes due to the freezing and thawing cycles, the post-exposure glass fiber reinforced composite enters a brittle state, possibly due to the resulting cracks between the fiber and the matrix contact zone, as well as defects in the fiber surface. These aging processes can be slowed down using active mineral additives (silica fume and metakaolin).
8. The concrete composite was developed for production of prefabricated wall elements with quartz sand filler and fiberglass, with a bending strength of 10.1 MPa, flexural strain energy of 1149 N/m and which can be used for facade structures operating at least 20 years of aggressive climatic conditions in the Baltic region, characterized by the effects of freezing and thawing cycles.

Priedai³

- A priedas.** Portlandcemenčio CEM I 52,5R fizikinės ir mechaninės savybės
- B priedas.** Užpildų pagrindinės fizikinės ir cheminės charakteristikos
- C priedas.** Aktyvių mineralinių priedų fizikinės charakteristikos
- D priedas.** Superplastiklio charakteristikos
- E priedas.** Betono mišinių sudėtys
- F priedas.** Autoriaus sąžiningumo deklaracija
- G priedas.** Bendraautorių sutikimai teikti publikacijoje skelbtą medžiagą mokslo daktaro disertacijoje
- H priedas.** Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema kopijos

³ Priedai pateikiami pridėtoje kompaktinėje plokštelėje.

Rimvydas MOCEIKIS

DISPERSIŠKAI ARMUOTO APDAILINIO BETONO
TECHNOLOGINIŲ IR EKSPLOATACINIŲ SAVYBIŲ TYRIMAI

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai,
Medžiagų inžinerija (T 008)

INVESTIGATION OF TECHNOLOGICAL AND
PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF DECORATIVE
CONCRETE WITH DISPERSE REINFORCEMENT

Doctoral Dissertation

Technological Sciences,
Materials Engineering (T 008)

2021 06 07. 12,0 sp. I. Tiražas 20 egz.
Leidinio el. versija <https://doi.org/10.20334/2021-032-M>
Vilniaus Gedimino technikos universitetas,
Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius
Spausdino BĮ UAB „Baltijos kopija“
Kareivių g. 13b, 09109 Vilnius