



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

**Savaiminį betono atsinaujinimą skatinančių
priedų įtaka betono mikrostruktūrai**

Baigiamasis magistro projektas

Tadas Kavoliūnas

Projekto autorius

doc. dr. Algirdas Augonis

Vadovas

Kaunas, 2020



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Savaiminį betono atsinaujinimą skatinančių priedų įtaka betono mikrostruktūrai

Baigiamasis magistro projektas

Statybinių konstrukcijų ir gaminių inžinerija (6211EX008)

Tadas Kavoliūnas

Projekto autorius

doc. dr. Algirdas Augonis

Vadovas

doc. dr. Audrius Grinys

Recenzentas

Kaunas, 2020



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Tadas Kavoliūnas

Savaiminį betono atsinaujinimą skatinančių priedų įtaka betono mikrostruktūrai

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, Tado Kavoliūno, baigiamasis projektas tema „Savaiminį betono atsinaujinimą skatinančių priedų įtaka betono mikrostruktūrai“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

Tadas Kavoliūnas. Savaiminį betono atsinaujinimą skatinančių priedų įtaka betono mikrostruktūrai. Magistro baigiamasis projektas / Vadovas Dr. Algirdas Augonis; Kauno technologijos universitetas, Statybos ir architektūros fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): inžinerija, statybos inžinerija (E05).

Reikšminiai žodžiai: *Savaime atsinaujinantis betonas, kristaliniai priedai, mikrostruktūra, plyšiai, atsparumas šalčiui.*

Kaunas, 2020. 40 p.

Santrauka

Baigiamojo darbo tikslas buvo įvertinti kristalinių priedų įtaką betonui ir betono gaminiams. Nustatyta, jog kristalinių priedų naudojimas neturi įtakos betono mišinio temperatūros, tankio ir įtraukto oro kiekiui, tačiau nuo priedų sudėties ir koncentracijos gali pasikeisti mišinio slankumas. Taip pat kristaliniai priedai turi neigiamą įtaką ankstyvam betono stiprumui, kuris praėjus vienai dienai po bandinių suformavimo vidutiniškai pasiekia 85% stiprio lyginant su kontroliniais bandiniais. Tačiau, po 7 ir 28 parų kietėjimo, bandiniai su kristaliniais priedais pasiekia didesnę stiprį nei kontroliniai.

Tiriant šalčio poveikį betoniniams gaminiams pirmiausia buvo atliktas įgėrio kinetikos bandymas, kurio metu nustatyta, jog pradinis bandinių iš savaime atsinaujinančio betono atsparumas šalčiui gaunamas mažesnis, nei kontroliniuose bandiniuose. Tačiau atlikus 1 – 3 mėn. „betono gydymą“, bandiniai su kristaliniais priedais pasiekė ne mažesnę teoriškai nustatytą atsparumą šalčiui lyginant su kontroliniais bandiniais. Svarbu pastebėti, kad bandymo metu nustatyta, jog apgniuždyti bandiniai iš savaime atsinaujinančio betono po gydymo atsparumą šalčiui atgauna žymiai greičiau nei kontroliniai. Toliau atlikus paviršinio šaldymo bandymą nebuvo pastebėta jokių skirtumų, tačiau tūrinis šaldymas parodė, kad bandiniai su kristaliniais priedais šiam šaldymo metodui yra atsparesni. Paskutinis su ardančiu šalčio poveikiu susijęs bandymas buvo kapiliarinis šaldymas, kuriuo metu nustatyta, kad kristaliniai priedai lemia žymiai didesnę betono atsparumą kapiliariniam šaldymui.

Toliau buvo tiriamas skirtingų sudėčių betono karbonatizacijos gylis prieš ir po 21 paros karbonatizacijos kameroje. Šiuo bandymu nustatyta, jog betono karbonatizacija kontroliniuose bandiniuose pasiekė iki 3 mm gylį, tuo tarpu bandiniuose iš savaime atsinaujinančio betono ji nepasireiškė. Paskutinis atliktas eksperimentas buvo chloridų migracijos bandymas, kuriuo gauta, kad chloridų jonai mažiau paveikia betoną su kristaliniais priedais, lyginat su betonu be jų.

Viską apibendrinant galima daryti išvadą, jog savaiminį atsinaujinimą skatinančių kristalinių priedų naudojimas nors ir neigiamai veikia ankstyvąjį betono stiprį ir atsparumą šalčiui, tačiau po 28 parų kietėjimo šie parametrai praktiškai susilygina. Tuo tarpu bandiniai iš savaime atsinaujinančio betono yra atsparesni karbonatizacijos ir chloridų poveikiui bei daugeliu atvejų geriau atlaiko ardomąjį šalčio poveikį.

Tadas Kavoliūnas „Effect of crystalline admixtures on microstructure of self-healing concrete“. Master's Final Degree Project / supervisor Dr. Algirdas Augonis; Faculty of Civil Engineering and Architecture, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Engineering, Civil Engineering (E05).

Keywords: *Self-healing concrete, crystalline admixtures, microstructure, crack, frost resistance.*

Kaunas, 2020. 40 p.

Summary

The aim of thesis is to evaluate crystalline admixtures influence to concrete and its products. Results of tests show that usage of the crystalline admixtures does not determine temperature, density and air content of concrete mixtures, but different consist of admixtures and concentration can change the slump of mixed concrete. Also, crystalline admixtures decrease concrete`s early strength comparing with control tests and reach about 85% after 1 day of curing. But after 7 and 28 days of consolidation these specimens became stronger.

The impact of frost for concrete products was examined with hydration kinetics test. Results of this test shows that specimens with crystalline additives have less resistance to frost than control specimen. But the resistance is changed after 1-3 months of curing. Specimens with crystalline additives reach not lower theoretically calculated resistance to frost than control specimen. It is important to notice that damaged specimens of self- healing concrete recover from frost resistance faster after curing than control specimen. Results of freezing slab test do not show any significant differences, but freezing cube test shows that specimens with crystalline additives are more resistance than control specimen. The last test related to frost impact was capillary suction test which shows that crystalline admixture determines higher resistance of concrete.

Other tests were done to examine carbonation depth and chloride ion ingress in concrete with different consist. The carbonation depth of specimens was measured before and after 21 days in carbonization chamber. Results show that carbonation is up to 3 mm depth in control specimen, but carbonation was completely absent in self-healing concrete specimens. Test of chloride ion ingress show that chloride ions have less influence for concrete with crystalline additives than without them.

In conclusion, using crystalline admixtures for self-healing concrete has worse impact to strength and resistance to frost for early formed concrete, but they become equal after 28 days of hardening. Specimens from self-healing concrete are more resistance to effects of carbonization, chloride ion ingress and frost.

Turinys

Lentelių sąrašas	7
Paveikslų sąrašas	8
Santrumpų ir terminų sąrašas	9
Įvadas.....	10
1. Literatūros apžvalga	11
1.1. Savaiminio plyšių užsitaisymo būdai	11
1.1.1. Savaiminis natūralus užsitaisymas	11
1.1.2. Savaiminis užsitaisymas, naudojant mineralines priemaišas	12
1.1.3. Savaiminis užsitaisymas, naudojant bakterijas.....	13
1.1.4. Savaiminis užsitaisymas, naudojant polimerines medžiagas	14
1.2. Savaimine atsinaujinančio betono savybės.....	15
2. Betono sudėtys ir tyrimų metodai	16
2.1. Betono sudėtys.....	16
2.2. XRD ir SEM–EDX metodų taikymas	17
2.3. Įgeriamumo kinetika.....	17
2.4. Paviršinis betono šaldymas.....	20
2.5. Tūrinis betono šaldymas	21
2.6. Kapiliarinis šaldymo metodas	22
2.7. Karbonatizacijos nustatymo metodika	23
2.8. Chloridų migracijos bandymo metodas	23
2.9. Tyrimams naudota įranga	26
3. Tyrimų rezultatai ir jų aptarimas	29
3.1. Kristalinių priedų įtaka betono mišinio savybėms	29
3.2. Cheminė bandinių analizė	30
3.3. Kristalinių priedų įtaka atsparumui šalčiui.....	33
3.4. Kristalinių priedų įtaka betono karbonatizacijai.....	36
3.5. Kristalinių priedų įtaka chloridų migracijai	37
Išvados	39
Literatūros sąrašas	40
Priedai.....	42

Lentelių sąrašas

1. lentelė. Betono mišinių sudėtys	16
2. lentelė. Betono mišinių savybės	29
3. lentelė. Betono gniuždomasis stipris po 1, 7 ir 28 dienų kietėjimo.....	29
4. lentelė. A bandymas. Bentono poringumo parametrai	33
5. lentelė. A bandymas. Bentono atsparumo šalčiui kriterijus	34
6. lentelė. B bandymas. Bentono poringumo parametrai	34
7. lentelė. B bandymas. Bentono atsparumo šalčiui kriterijus	34
8. lentelė. Kontroliniai tūrinio šaldymo duomenys	35
9. lentelė. Tūrinio šaldymo rezultatai	35
10. lentelė. Kapiliarinio šaldymo rezultatai	36

Paveikslų sąrašas

1. pav. Savaiminis plyšių užsitaisymas, naudojant mineralinius priedus.....	12
2. pav. Kapsulių aktyvavimo tikimybės	14
3. pav. Bandinių svėrimas	17
4. pav. Atsparumo šalčiui ciklų skaičiaus priklausomybė nuo atsparumo šalčiui kriterijaus	19
5. pav. Paviršinio šaldymo bandymui paruošti bandiniai.....	20
6. pav. Paviršinio užšaldymo – atšildymo ciklo temperatūros pokyčio kreivė	21
7. pav. Bandiniai tūrinio šaldymo kameroje.....	22
8. pav. Bandiniai pamerkti į druskos tirpalą.....	22
9. pav. Bandiniai laikomi 1 bar. slėgyje ore (kairėje) ir vandenyje (dešinėje).....	23
10. pav. Bandinių tvirtinimas išlaikant 5 cm tarpą tarp indų.....	24
11. pav. Bandinių tvirtinimas išlaikant 1 cm tarpą tarp indų.....	24
12. pav. Elektrolizės bandymas	24
13. pav. Laboratorinės svarstyklės	26
14. pav. Laboratorinės hidrostatinės svarstyklės	26
15. pav. Hidraulinis presas Toni Technik 2020.....	26
18. pav. Džiovinimo krosnelė SNOL 58/350	27
19. pav. Šaldymo kamera	27
20. pav. Tūrinio šaldymo kamera KHS-2-6S	28
21. pav. CO2 klimatinė kamera	28
22. pav. Slėginis indas su siurbliu	28
23. pav. Reguliuojamas srovės šaltinis „VOLTCRAFT VLP 2403 Bench PSU“	28
24. pav. Gniuždomasis stipris po 1, 7 ir 28 parų	30
25. pav. XDR analizė T – 1 ir T – 2 mėginiams.....	31
26. pav. SEM analizės metodu gautas T – 3 bandio nuosėdų paviršiaus vaizdas	31
27. pav. EDX metodu gauta T – 3 bandio nuosėdų cheminė sudėtis	32
28. pav. EDX metodu gauti T – 3 bandio nuosėdų cheminių elementų kiekiai	32
29. pav. Bandiniai po kapiliarinio šaldymo	35
30 pav. Karbonatizacijos gylio nustatymas. Kontroliniai (kairėje) ir tiriamieji (dešinėje) bandiniai	36
31 pav. Chloridų įsiskverbimo gylis. Kontroliniai (kairėje) ir tiriamieji (dešinėje) bandiniai	37
32. pav. Chloridų įsiskverbimo gylis. Kontrolinis (kairėje) ir tiriamasis (dešinėje) bandiniai	38

Santrumpų ir terminų sąrašas

Santrumpos:

XDR – rentgeno spindulių difrakcinė analizė;

SEM – Skenuojanti elektroninė mikroskopija;

EDX – Rentgeno spindulių energijos spektroskopija.

Terminai:

Savaime atsinaujinantis betonas – tai betonas, kuriame atsivėrę plyšiai užsitaiso savaime, nereikaujant žmogiškųjų resursų.

Betono gydymas – tai procesas, kuriuo metu vyksta savaiminis betone esančių plyšių užsitaistymas.

Įvadas

Betonas yra labiausiai naudojama statybinė medžiaga pasaulyje dėl savo palyginti mažos kainos ir didelių pritaikymo galimybių. Retas statinys, ar tai būtų gyvenamasis, administracinis ar industrinis pastatas, užtvanka, tiltas ar stadionas, savo konstrukcijose nenaudoja šios jau beveik 200 metų tobulinamos medžiagos. Per tokį ilgą laiko tarpą buvo sukurta daugybė betono atmainų, tokių kaip ypač stiprus, laidus šviesai ar dekoratyvinis betonas, tačiau ties tuo inovacijos betono gamybos technologijoje tikrai nesustojo. Šiuo metu didelį susirūpinimą pasaulyje kelia su globaliu atšilimu susijusios problemos, dėl kurių yra atsiradusios įvairios iniciatyvos, skatinančios mažinti neigiamus žmogaus veiklos padarinius mūsų klimatui. Šie projektai neaplenkia ir betono pramonės, kuri yra viena didžiausių atmosferos teršėjų. Yra nustatyta, jog betono gamybos metu į aplinką išskleidžiamas CO₂ dujų kiekis sudaro 8% viso žmonių ūkine veikla sukuriamo anglies dvideginio kiekio. Vienas iš būdų, kuris leistų šį procentą sumažinti, yra savaime atsinaujinančio betono naudojimas. Ši medžiaga yra pranašesnė už įprastą statybose naudojamą betoną tuo, jog išsprenčia dažniausiai betoninėse konstrukcijose pasitaikančią problemą – pleišėjimą. Atsivėrę plyšiai leidžia į konstrukcijos vidų patekti drėgmei ir įvairiems cheminiams junginiams, kurie lemia betono ir armatūros koroziją. Taip sugadinamas ne tik estetinis vaizdas, bet ir sumažinama laikomoji galia, dėl ko gelžbetonines konstrukcijas būtina remontuoti. Tuo tarpu naudojant savaime atsinaujinantį betoną vos atsivėrę plyšiai užsitaiso savaime, be jokio žmogaus įsikišimo. Tai leidžia sutaupyti remontui skiriamus kaštus bei medžiagas ir prailgina konstrukcijų ilgaamžiškumą.

Nors pirmieji moksliniai darbai, tiriantys savaime atsinaujinančio betono procesus, buvo pradėti dar 20 – tojo amžiaus pabaigoje, tačiau tikrasis proveržis šioje srityje pastebimas paskutinius penkerius metus. Mokslininkai aktyviai kuria skirtingus savaime atsinaujinančio betono gamybos būdus, tačiau, siekdami didžiausio plyšių užsitaisymo efektyvumo, mažai dėmesio skiria kitoms betono savybėms. Todėl vis dar yra neaišku, kokią įtaką betono modifikacijos turi betoninių konstrukcijų atsparumui šalčiui, karbonatacijai, chloridų ir kitų medžiagų poveikiui.

Darbo tikslas: Įvertinti kristalinių priedų įtaką betono mikrostruktūrai ir fizikinėms savybėms.

Uždaviniai:

1. Įvertinti kristalinių priedų įtaką betono mišiniui;
2. Atlikti eksperimentinius bandymus ir palyginti, kaip kinta betono poringumas priklausomai nuo kristalinių priedų;
3. Nustatyti kristalinių priedų poveikį betono atsparumui šalčiui;
4. Įvertinti, kaip kristaliniai priedai lemia betono karbonataciją;
5. Nustatyti kristalinių priedų įtaką chloridų migracijai.

1. Literatūros apžvalga

1.1. Savaiminio plyšių užsitaisymo būdai

Savaiminis plyšių užsitaisymas cementinėse sistemose gali būti pasiekiamas keliais būdais, todėl pagal užsitaisymo pobūdį šis procesas skirstomas į keturias grupes:

1. savaiminis natūralus užsitaisymas;
2. savaiminis užsitaisymas, naudojant mineralines priemaišas;
3. savaiminis užsitaisymas, naudojant bakterijas;
4. savaiminis užsitaisymas, naudojant polimerines medžiagas [1].

1.1.1. Savaiminis natūralus užsitaisymas

Savaiminis plyšių užsitaisymas vyksta įvairių reakcijų metu susidarant tam tikriems produktams, kurie užpildo plyšių tūrį. Tačiau remiantis skirtingais užsienio šalių tyrėjais, plyšiuose susidariusių medžiagų sudėtis yra gana nepastovi. Vykiant stipraus betono gydymą vandenyje, plyšiuose aptikta naujai susiformavusių kalcio hidrosilikatų (C – S – H), portlandito ir etringito [2]. Tuo tarpu kitų mokslininkų tyrimai patvirtino kalcio karbonato (CaCO_3) susiformavimą [3,4,5]. Tai rodo, jog savaiminis plyšių užsitaisymas gali atsirasti vykstant skirtingiems procesams:

1. dar nespėjusių hidratuotis cemento dalelių tolimesnei hidratacijai;
2. portlandito persikristalizavimui;
3. kalcito susiformavimui.

Visi šie fizikiniai ir cheminiai procesai gali vykti tuo pat metu, tačiau jų greičiai yra skirtingi. Pavyzdžiui, cemento dalelių hidratacija prasideda vos vandeniui patekus į betone atsivėrusį plyšį, tuo tarpu portlandito persikristalizavimas ir kalcito susiformavimas vyksta gerokai lėčiau. Tai lemia maža CO_3^{2-} jonų koncentracija plyšio viduje. Ši koncentracija yra gerokai didesnė ties betono paviršiumi, todėl kalcitas pirmiausia susiformuoja ties plyšio paviršiumi ir tik vėliau pačiame plyšyje [6]. Tai rodo, jog skirtingos aplinkos sąlygos lemia skirtingą plyšių užsitaisymo procesą.

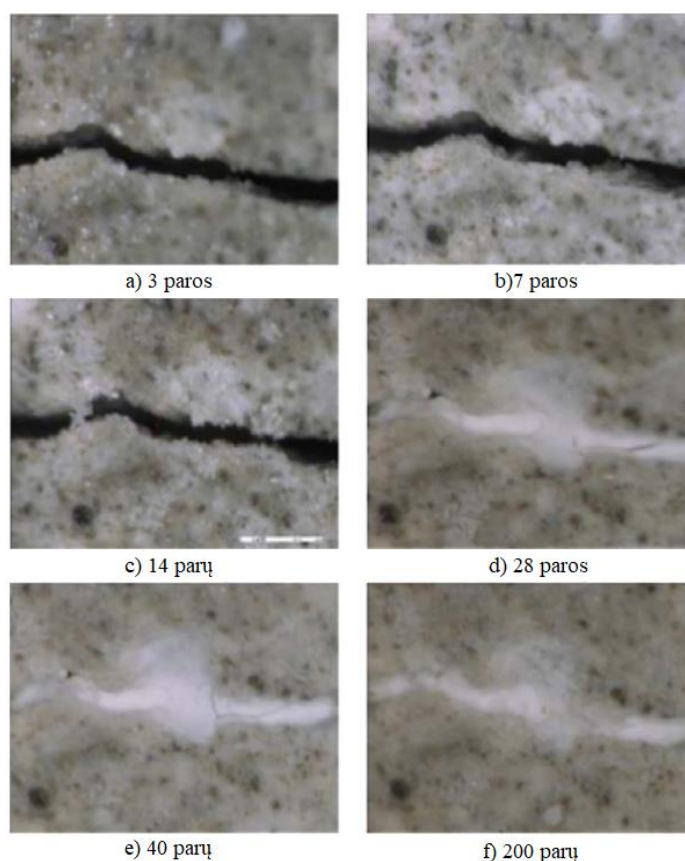
Betono gamyboje dažnai naudojami įvairūs betono savybes keičiantys priedai, kurie taip pat gali būti naudojami ir savaiminio plyšių užsitaisymo intensyvumui padidinti. Vienas iš būdų tam pasiekti yra lakiųjų pelenų arba aukštakrosnės šlako naudojimas betono mišinyje.

Kitas savaiminį plyšių užsitaisymą lemiantis veiksnys yra iš aplinkos į plyšį patenkantys jonai, pavyzdžiui, jau minėti CO_3^{2-} . Jie reaguodami su portlanditu sudaro kalcitą, kuris užima apie 11% didesnę tūrį nei pats portlanditas, ir taip užpildo esantį plyšį. Tuo pačiu metu plyšyje gali vykti ir kalcio hidrosilikatų karbonatizacija, tačiau skirtingai nuo portlandito karbonatizacijos, šiuo atveju reakcijos produktų tūris yra mažesnis nei kalcio hidrosilikatų, todėl ir poveikis savaiminiam plyšių užsitaisymui yra neigiamas [7].

1.1.2. Savaiminis užsitaishymas, naudojant mineralines priemaišas

Kitas būdas, kuriuo galima pasiekti savaiminį plyšių užsitaishymą cementinėse sistemose, yra mineralinių priemaišų naudojimas. Šios medžiagos dedamos į betono mišinį formavimo metu. Atsivėrus plyšiui į jį patenka vanduo, kuris reaguodamas su mineralinėmis priemaišomis sudaro junginius ir užpildo plyšius.

Mineralinės priemaišos, naudojamos savaiminiam plyšių užsitaishymui gauti, skirstomos į dvi grupes: besiplečiančias ir besikristalizuojančias [6]. Naudojant besiplečiančias priemaišas, tokias kaip kalcio sulfoaluminatą, laisvas kalkes, anhidritą ir kt., panašiai kaip jau minėtos karbonatizacijos metu, įvykus reakcijai gaunami produktai, turintys didesnę tūrį nei reagentai. Tuo tarpu besikristalizuojančios mineralinės priemaišos, pavyzdžiui, įvairūs karbonatai kaip Na_2CO_3 , taip pat talko milteliai ar natrio silikatai, dažniausiai reaguoja su kalcio hidroksidu $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ir sudaro kristalinius junginius. Savaiminis plyšių užsitaishymą naudojant mineralines priemaišas matomas 1. pav. [8].

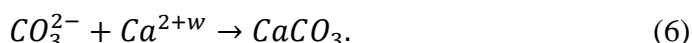
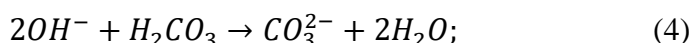
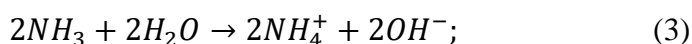
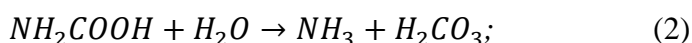
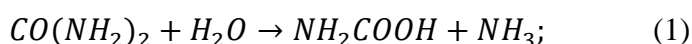


1. pav. Savaiminis plyšių užsitaishymas, naudojant mineralinius priedus

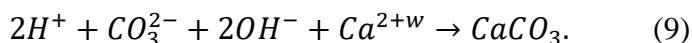
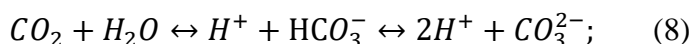
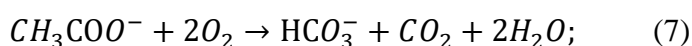
1.1.3. Savaiminis užsitaisymas, naudojant bakterijas

Skatinant savaiminį plyšių užsivėrimą be mineralinių priemonių gali būti naudojamos ir tam tikros bakterijos, pagreitinančios kalcio karbonato (CaCO_3) susidarymą plyšiuose. Yra keletas būdų šiam junginiui gauti, tačiau dažniausiai remiamasi karbamido $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ hidrolizės reakcija. Didžiausias šios reakcijos privalumas yra tas, jog kalcio karbonatas susidaro žymiai intensyviau nei naudojant mineralines priemaišas.

Karbamidui prijungiant vandenį susidaro amonio dujos ir aminorūgštis (1), kuri dar kartą reaguoja su vandeniu sudarydama dar daugiau amonio ir anglirūgštės junginių (2). Toliau amonis reaguodamas su vandeniu sudaro amonio ir hidroksido jonus (3), kurie reaguodami su anglirūgšte išskiria karbonato jonus CO_3^{2-} (4,5). Šie jonai susijungia su betone jau esančiais kalcio Ca^{2+} jonais ir sudaro kalcio karbonatą (6) [9].



Kitas būdas kalcio karbonatui gauti yra pagrįstas organinių rūgščių oksidacijos reakcijomis. Šios rūgštys reaguodamos su deguonimi išskiria bikarbonato jonus, anglies dvideginį ir vandenį (7). Dėl aukšto pH anglies dioksidas CO_2 pasikeičia į CO_3^{2-} joną (8) ir prijungus Ca^{2+} jonus gaunamas kalcio karbonatas (9). Šio metodo privalumas yra tas, jog reakcijų metu neišsiskiria amonio dujos, kurios turi neigiamą įtaką gamtai [10].



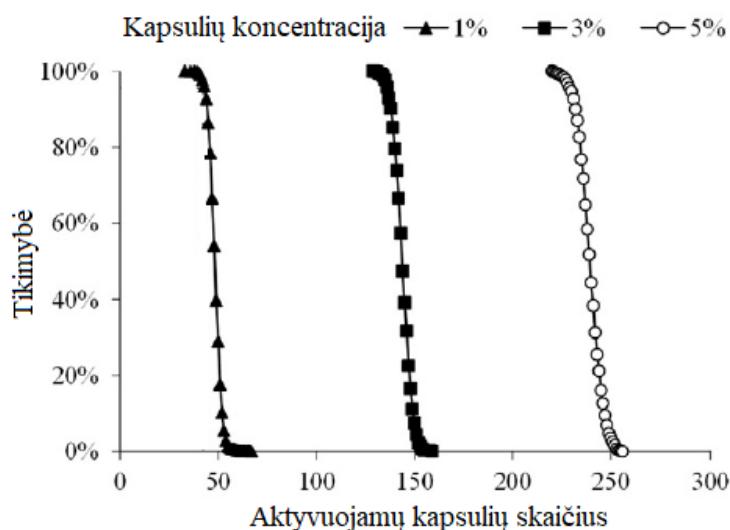
Įprastai bakterijos, naudojamos savaiminiam plyšių užsivėrimui, turėtų išgyventi bent iki 50 metų. Tačiau pastebėta, jog betone jų gyvavimo amžius siekia vos kelis mėnesius. Viena iš priežasčių – betone esanti šarminė terpė, kuri nėra palanki bakterijoms. Kita priežastis yra cemento hidratacija. Jos metu betono poros traukiasi ir tampa mažesnėmis už bakterijų sporas, taip jas sutraiškudamos. Dėl šių veiksmų bakterijų sporas reikia apsaugoti naudojant kapsules, kurios apsaugo organizmus nuo išorinio poveikio, tačiau atsivėrus plyšiui yra pažeidžiamos ir leidžia bakterijoms reaguoti su aplinka sudarant kalcio karbonatus [11].

1.1.4. Savaiminis užsitaishymas, naudojant polimerines medžiagas

Trečiasis būdas, taikomas norint gauti savaiminį plyšių užsitaishymą betone, yra polimerinių medžiagų naudojimas. Šias polimerines medžiagas gali sudaryti vienas, du ar daugiau reagentų, kurie kaip ir bakterijos yra patalpinami į kapsules ir dedami į betono mišinį formavimo metu. Naudojant sistemą su keliais reagentais, atsivėrus plyšiams ir pažeidus kapsules, veikliosios medžiagos susimaišo ir reaguodamos tarpusavyje sudaro kietus junginius, užpildančius plyšių ertmes. Tačiau šiuo metodu negalima kontroliuoti reagentų susimaišymo kokybės, dėl to ne visa veiklioji medžiaga sureaguoja ir plyšiai užtaisomi neefektyviai. Dėl šios priežasties patogiausiai naudoti polimerines rišančiąsias medžiagas iš vieno komponento, kuris reaguodamas su drėgme ar oru pats iš savęs sudaro užpildą supleišėjusiam betonui [12].

Viena iš dažniau naudojamų polimerinių medžiagų yra bespalvis monomerinis skysto pavidalo cianoakrilatas, pasižymintis greitu veikimu. Taip pat naudojami epoksidiniai, silikoniniai, poliuretaniniai ir kiti polimerai. Visgi ne visos išvardintos polimerinės medžiagos vienodai efektyviai užtaiso plyšius. Lyginant su kitomis sistemomis (naudojant mineralines priemaišas ar bakterijas), gaunamas žymiai didesnis plyšio zonoje esančio betono sankabumas, kuris pagerina mechanines savybes ir padidina stiprumą [12].

Savaiminis plyšių užsitaishymo efektyvumas, naudojant kapsules su polimerinėmis medžiagomis arba bakterijomis, priklauso ir nuo kapsulių kiekio betono mišinyje. Optimalus jų skaičius nustatomas kompiuterinėmis programomis atliekant modeliavimą, kurio metu skaičiuojama, kiek kapsulių yra pažeidžiama atsiveriant tam tikram nurodytų matmenų plyšiui. Iš bandymų rezultatų sudaromos kreivės (2.pav. [13]), iš kurių galima nustatyti aktyvuojamų kapsulių skaičių su tam tikra tikimybe esant vienai ar kitai šių kapsulių koncentracijai betono mišinyje.



2. pav. Kapsulių aktyvavimo tikimybės

1.2. Savaimė atsinaujinančio betono savybės

Daugiausia dėmesio savaimė atsinaujinančio betono tyrimų srityje yra skiriama anksčiau aprašytų plyšių užsitaisymo metodų kūrimui bei tobulinimui. Norint įvertinti šių metodų veikimo efektyvumą dažniausiai yra išmatuojamas plyšių užsitaisymo gylis ir plotis. Tyrimais yra nustatyta, jog mažesni nei 60 μm plyšiai esant tam tikroms aplinkos sąlygoms geba užsitaisyti savaimė. Tuo tarpu didesnius įtrūkimus „užgydyti“ gali tik betone naudojamos priemonės: kristaliniai priedai užveria iki 200 μm pločio plyšius, bakterinės mikrokapsulės iki 450 μm , o polimerinės medžiagos ir didesnius įtrūkius, priklausomai nuo naudojamų polimerų kiekio. Taip pat kartu vertinamas ir plyšių užsitaisymo režimas bei trukmė [1].

Toliau nustatomos ir pagrindinės betono mechaninės savybės: gniuždomasis bei tempiamasis stipriai. Tačiau atskiri mokslininkai atlikdami tyrimus su labai skirtingomis betonų sudėtimis gavo skirtingus rezultatus. Pavyzdžiui, apgniuždyti bandiniai po „gydymo“ vandenyje gali atgauti nuo 10 % iki 40 % gniuždomojo stiprio [14, 15]. Kiti tyrimai parodė, jog savaimė atsinaujinantis betonas paprastai pasižymi mažesniu ankstyvuju stipriu, tačiau iki 28-tos kietėjimo paros pasiekia ne mažesnę laikomąją galią, lyginant su analogišku betonu, neturiniu savaiminį plyšių užsitaisymą skatinančių priemonių [16].

Norint padidinti gautų rezultatų patikimumą yra atliekami betono mikrostruktūros tyrimai. Todėl nustatant plyšiuose susidariusių junginių cheminę sudėtį dažnai naudojami skenuojantys elektroniniai mikroskopai. Kitais metodais nustatomos tokios betono savybės kaip vandens įgėris bei pralaidumas, kapiliarinis laidumas, chloridų bei rūgščių įsiskverbimo intensyvumas. Tyrimais nustatyta, jog daugeliu atvejų chloro jonai neturi neigiamos įtakos savaiminio plyšių užsitaisymo procesui. Taip pat pastebėta, kad užsiveriantys įtrūkimai sulėtina chloridų įsiskverbimo intensyvumą [17]. Kitais bandymais nustatyta, jog savaimė atsinaujinančio betono laidumas vandeniui bėgant laikui mažėja ir labai priklauso nuo sąlygų, kuriomis laikomi betono bandiniai [18].

Nanostruktūros lygyje atliekami tyrimai yra skirti nustatyti ryšiui tarp betono matricos ir plyšyje susidariusių junginių. Ir nors šie bandymai padėtų aiškiau suprasti betone vykstančius savaiminio „užsigydymo“ procesus, tačiau kol kas jie atliekami itin retai.

2. Betono sudėtys ir tyrimų metodai

2.1. Betono sudėtys

Visi šiame darbe aprašomi laboratoriniai tyrimai ir eksperimentiniai bandymai atlikti su keturių skirtingų sudėčių bandiniais:

4. K – kontroliniai bandiniai, kuriuose nebuvo naudojami kristaliniai priedai;
5. T – 1 – bandiniai su 1-ojo gamintojo kristaliniais priedais, kurių kiekis betono mišinyje lygus 1% nuo cemento masės;
6. T – 2 – bandiniai su 1-ojo gamintojo kristaliniais priedais, kurių kiekis betono mišinyje lygus 2% nuo cemento masės;
7. T – 3 – bandiniai su 2-ojo gamintojo kristaliniais priedais, kurių kiekis betono mišinyje lygus 1% nuo cemento masės;

1. lentelė. Betono mišinių sudėtys

Betono sudėtis 1 m ³	Bandinių tipai			
	K	T – 1	T – 2	T – 3
Cementas CEM I 42,5R, kg	350	350	350	350
Vanduo, l (V/C=0.45)	157.5	157.5	157.5	157.5
Smėlis (0/4mm), kg	861	861	861	861
Žvyras (4/16mm), kg	1031	1031	1031	1031
Superplastiklis (0.85% nuo cemento masės), kg	2.98	2.98	2.98	2.98
Kristaliniai priedai (1-asis gamintojas), kg	-	3.50	7.00	-
Kristaliniai priedai (2-asis gamintojas), kg	-	-	-	3.50

Betono mišinių ruošimo seka:

1. 30 s maišomas smėlis, žvyras ir 1/3 betono mišiniui reikalingo vandens;
2. 1 min pauzė;
3. supilamas cementas ir maišoma 30 s;
4. supilamas likęs vanduo;
5. pamažu pilant superplastiklį maišoma 1 min;
6. supilami miltelių pavidalo kristaliniai priedai ir maišoma 30 s.

Paruošus betono mišinius yra nustatomos šios technologinės ir fizikinės savybės:

1. slankumas (pagal LST EN 12350-2);
2. tankis (pagal LST EN 12350-6);
3. oro kiekis (pagal LST EN 12350-7);
4. temperatūra.

Norint nustatyti bandinių stiprį pagal 1-os lentelės betono mišinių sudėtis yra suformuojami 100x100x100 mm betoniniai kubeliai. Po paros jie išimami iš formų ir laikomi 20 ± 2 °C temperatūros vandenyje. Vadovaujantis LST EN 12390-3, bandinių gniuždomasis stipris nustatomas po 1, 7 ir 28 parų.

2.2. XRD ir SEM–EDX metodų taikymas

Rentgeno spindulių difrakcinė analizė (XRD) yra skirta nustatyti bandinyje, esančių mineralų sudėčiai bei jų kiekiui. Tyrimo metu į betoninį kubelį tam tikru kampu paleidžiami rentgeno spinduliai, kurie priklausomai nuo bandinio kristalinės struktūros atsispindi arba išsisklaido. Visų spindulių sklaidimo kampai bei intensyvumas išmatuojami ir palyginami su duomenų bazėje turimais žinomų elementų parametrais. Kadangi kiekviena kristalinė medžiaga turi savitą struktūrą, skirtingai veikiančią į ją kritusius spindulius, todėl šis metodas yra itin tikslus ir patikimas. [19].

Skenuojančiu elektroniniu mikroskopu (SEM) gaunami bandinių vaizdai tiriant objektą fokusuotu elektronų spinduliu. Prietaiso skleidžiami elektronai sąveikaudami su bandinyje esančiais elektronais skleidžia signalus, kurie priimti ir apdoroti suteikia informacijos apie bandinio paviršiaus topografiją ir struktūrą [20]. Dažnai norint gauti daugiau duomenų, šis metodas yra kombinuojamas su Rentgeno spindulių energijos spektroskopija (SEM – EDX).

2.3. Įgeriamumo kinetika

Norint teoriškai nustatyti betono atsparumą šalčiui yra atliekamas vandens įgeriamumo kinetikos bandymas pagal GOST 12730.4-78 „Betonas. Poringumo nustatymo metodai“. Šiuo būdu yra nustatomas uždaras bei atviras bandinio poringumas, pagal kurį apskaičiuojamas betono šalčio faktorius.

Pirmiausia turimi bandiniai 24 val. džiovinami (105 ± 5)°C temperatūros ventiliuojamoje džiovykloje. Sausi bandiniai šiek tiek atvėsunami, pasveriami ir visu tūriu panardinami į (20 ± 5)°C temperatūros vandenį. Vėliau bandiniai ištraukiami iš vandens, o perteklinis vanduo nuvalomas drėgnu audiniu. Po to nustatomos bandinių masės ir jie toliau pamerkiama į vandenį. Sverimai atliekami kas 15 min., 60 min., 24 val. ir 48 val. nuo pirmo panardinimo į vandenį. Paskutinį kartą kiekvienas bandinys sveriamas du kartus: pirmą – standartinėmis svarstyklėmis kaip ir kiekvienu ankstesniu svėrimu, bei antrą – hidrostatinėmis svarstyklėmis, nustatant bandinių mases vandenyje.



3. pav. Bandinių svėrimas

Turint visus reikiamus parametrus atliekami skaičiavimai:

$$\text{Vandens įgėris pagal masę: } W_{p(m)} = \frac{m_{48} - m_s}{m_s} \cdot 100, \% \quad (2.1)$$

čia: m_{48} – masė po 48 val.;

m_s – sauso bandinio masė, g.

$$\text{Bandinio tankis: } \rho = \frac{m_s}{m_{48} - m_v}, \text{ kg/m}^3 \quad (2.2)$$

čia: m_v – masė po 48 val., sveriant vandenį;

$$\text{Vandens įgėris pagal tūrį: } W_{p(V)} = \frac{W_{p(m)} \cdot \rho}{1000}, \% \quad (2.3)$$

$$\text{Vandens įgėris po 15 min.: } W_1 = \frac{m_{15} - m_s}{m_s} \cdot 100, \% \quad (2.4)$$

čia: m_{15} – masė po 15 min.;

$$\text{Vandens įgėris po 60 min.: } W_2 = \frac{m_{60} - m_s}{m_s} \cdot 100, \% \quad (2.5)$$

čia: m_{60} – masė po 60 min.;

$$\text{Santykis } W_1/W_p: \quad W_{1(s)} = \frac{W_1}{W_p}; \quad (2.6)$$

$$\text{Santykis } W_2/W_p: \quad W_{2(s)} = \frac{W_2}{W_p} \quad (2.7)$$

Naudojantis GOST 12730.4-78 standarte pateiktomis nanogramomis nustatomi pagalbiniai parametrai:

α – porų vienodumo rodiklis ir λ_1 – porų pasiskirstymo rodiklis.

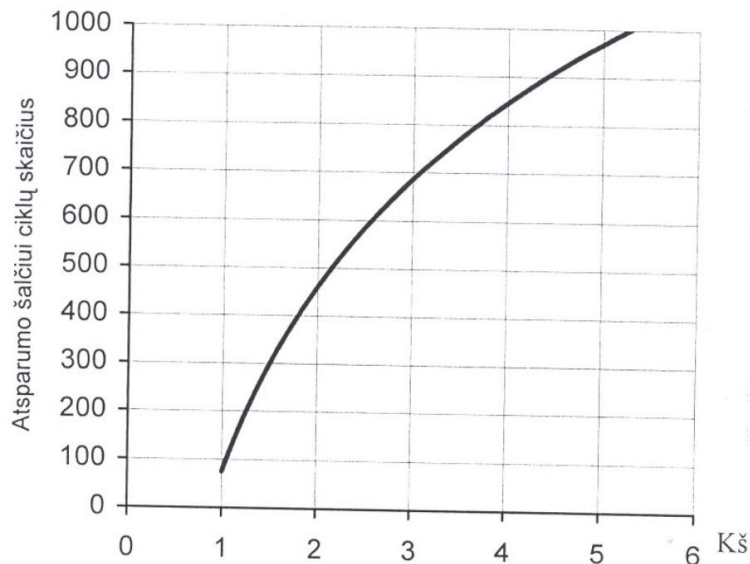
$$\text{Bendras poringumas: } P_b = \left(1 - \left(\frac{\rho}{2690}\right)\right) \cdot 100, \% \quad (2.8)$$

$$\text{Atviras poringumas: } P_a = W_{p(V)}, \% \quad (2.9)$$

$$\text{Uždaras poringumas: } P_u = P_b - P_a, \% \quad (2.10)$$

$$\text{Atsparumo šalčiui kriterijus: } K_s = \frac{P_u}{0,09P_a} \quad (2.11)$$

Pagal atsparumo šalčiui kriterijų iš pateikto grafiko (4. pav.) galima apytiksliai nustatyti prognozuojamą užšaldymo – atšildymo ciklą skaičių, kurį turėtų atlaikyti tiriami betoniniai bandiniai.



4. pav. Atsparumo šalčiui ciklų skaičiaus priklausomybė nuo atsparumo šalčiui kriterijaus

Įgėrio kinetikos matavimai iš viso atliekami penkis kartus pasirinkus šias dvi tyrimo eigas:

- a)
 1. sveiki bandiniai;
 2. bandiniai su mikroplyšiais;
 3. bandiniai 3 mėn. išlaikyti vandenyje.
- b)
 1. sveiki bandiniai;
 2. bandiniai 1 mėn. išlaikyti vandenyje.

Pirmuoju (a) atveju nustatomas sveikų bandinių poringumas. Tada pusė turimų bandinių sugniuždoma, norint nustatyti laikomąją galią. Likę bandiniai apgniuždomi jėga, artima prieš tai išmatuotajai, taip siekiant betone sukelti mikroįtrūkimus. Toliau antrą kartą atliekamas jau apgniuždytų bandinių poringumo nustatymas. Po to jie paliekami 3 mėn. mirkti vandenyje, taip siekiant suaktyvinti betone esančių kristalinių priedų veikimą ir tikintis, jog apgniuždymo metu sukelti mikroplyšiai užsitaitys. Po šio *betono gydymo* trečią kartą atliekamas įgeriamumo kinetikos bandymas.

Antruoju (b) etapu nustatymas sveikų bandinių poringumas prieš „betono gydymą“ ir po jo, bandinių neapgniuždant.

2.4. Paviršinis betono šaldymas

Paviršinis šaldymas atliekamas vadovaujantis CEN/TS 12390-9:2016 metodologija, skirta nustatyti betono paviršiaus atsparumą šalčio poveikiui. Bandymas pradedamas elektriniu pjūklų pusiau perpjaujant 150x150x150 mm bandinius, juos nuplaunant bei nusauginant drėgnu audiniu. Po to tiriamieji objektai iš šonų apskunami gumine juosta. Taip betono plokštuma, per kurią buvo pjauta, lieka atvira, o guminės juostos viršus nuo plokštumos pakilęs apie 20 mm. Visi bandinių kraštai tarp betono ir guminių juostų kruopščiai užsilikonuojami visu perimetru ir paliekami sudžiūti.

Kitas žingsnis yra bandinių terminis izoliavimas 20 mm storio polistireninio putplasčio sluoksniu, kurio šilumos laidumo koeficientas λ yra ne mažesnis už $0,036 \frac{W}{m \cdot K}$. Izoliuojami bandinių šonai ir apačia, atviras paliekamas tik viršutinis paviršius. Tiriamieji objektai paruošti šaldymui pavaizduoti 5. pav.

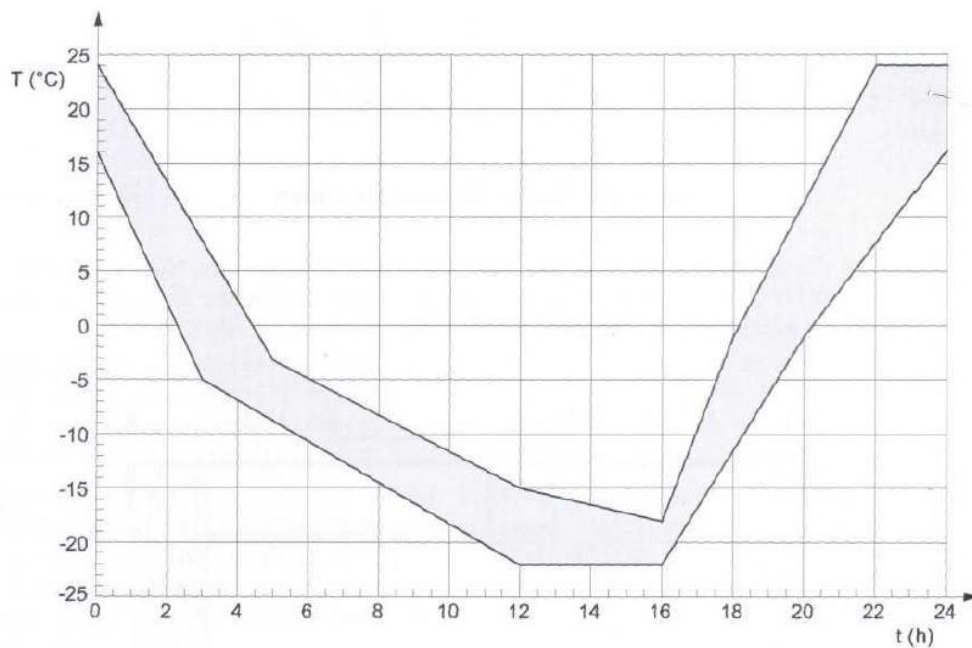


5. pav. Paviršinio šaldymo bandymui paruošti bandiniai

Bandinių paviršius užpilamas 3% druskos (NaCl) tirpalu, kurio aukštis nuo betono paviršiaus išlaikomas apie 3 mm. Po to tiriamieji objektai uždengiami permatoma polietileno plėvele, apsaugančia nuo tirpalo išgaravimo, ir patalpinami į šaldymo kamerą.

Per parą įvyksta vienas užšaldymo – atšildymo ciklas, kuris pateiktas 6. pav. Užtušuota grafiko zona rodo, kokiose ribose gali kisti bandomo paviršiaus temperatūra atitinkamo ciklo metu. Dėl to svarbu neatidarinėti šaldymo kameros ir joje pastoviai laikyti visu tiriamuosius objektus.

Po to kas 7, 14, 28, 42 ir 56 (± 1) ciklus bandiniai iš šaldymo kameros yra išimami tarp 20 ir 24 ciklo valandos. Tada tikrinama, ar yra atskilusio betono gabalų. Jei taip – jie surenkami į stiklinį indą. Toliau bandiniai užpilami nauju 3% druskos (NaCl) tirpalu ir dedami į šaldymo kamerą iki kitos patikros.



6. pav. Paviršinio užšaldymo – atšildymo ciklo temperatūros pokyčio kreivė

Jeigu tikrinant tiramuosius objektus tirpalo kiekis yra mažesnis nei 1 mm – bandinys toliau nebegali būti tiriamas. Taip gali būti dėl per didelio tirpalo garavimo, nesandarių kraštų, pro kuriuos skystis išbėga arba per didelio įsigėrimo į betoną.

Iš kiekvieno tiramojo objekto paimtas nutrupėjęs betono kiekis yra 24 val. džiovinamas (105 ± 5)⁰C temperatūros ventiliuojamoje džiovykloje. Sausas betonas pasveriamas ir išmatuojama, kokia medžiagos masė nutrupa nuo bandomo paviršiaus ploto vieneto po n ciklų:

$$S_n = \frac{m_{s,n}}{A} \cdot 10^3, \text{ kg/m}^3 \quad 2.12$$

čia: $m_{s,n}$ – atskilusio po n ciklų ir išdžiovinto betono masė, g;

A – efektyvusis bandinio paviršiaus plotas, mm².

Pabaigus 56 ciklų bandymą tiramieji objektai išformuojami ir vizualiai apžiūrimi iš visų pusių, ieškant įtrūkimų ar kitų pažeidimų, kurie galėtų turėti įtakos bandymo rezultatams.

2.5. Tūrinis betono šaldymas

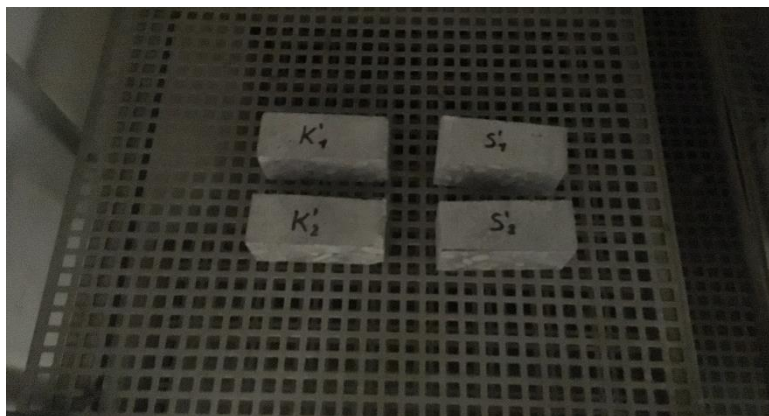
Tūrinis šaldymas yra vienas dažniausiai naudojamų metodų norint nustatyti betono šalčio atsparumo klasę. Bandymo pradžioje dalis projektinių stiprių pasiekusių bandinių sugniuždoma, taip nustatant jų laikomąją galią. Likę tiramieji objektai sudedami į specialioje šalymo kameroje esantį skylėtą konteinerį. Bandiniai šaldomi ore apie ($3 \pm 0,5$) val. palaikant neigiamą (18 ± 2)⁰C temperatūrą. Po to konteineris pripildomas (18 ± 5)⁰C temperatūros vandeniu, kuriame bandiniai šildomi apie ($3 \pm 0,5$) val. Per parą atliekami 3 užšaldymo – atšildymo ciklai.

Atlikus norimą ciklų skaičių bandiniai sugniuždomi ir nustatomas jų stiprio sumažėjimas:

$$\Delta F = \frac{F_k - F_s}{F_k} \cdot 100, \% \quad 2.13$$

čia: F_k – kontrolinių bandinių vidutinis stipris, MPa;

F_s – bandinių stipris po tūrinio šaldymo, MPa.



7. pav. Bandiniai tūrinio šaldymo kameroje

2.6. Kapiliarinis šaldymo metodas

Vienas iš agresyviausių betono ardymo bandymų yra kapiliarinis šaldymas. Tiriamieji objektai standartiškai 24 val. džiovinami (105 ± 5)⁰C temperatūros ventiliuojamoje džiovykloje ir pasveriami. Po to bandiniai įmerkami į 3% druskos (NaCl) tirpalą taip, jog betono apačia būtų apsemta apie 1 cm kaip pavaizduota 8. pav.



8. pav. Bandiniai pamerkti į druskos tirpalą

Paruošti tiriamieji objektai sudedami į šaldymo kamerą, kurioje laikomi tokiomis pačiomis sąlygomis, aprašytomis 1.4 skyriuje „Paviršinis šaldymas“. Kameroje bandiniai laikomi 3 paras, po kurių tikrinama betono būklė – įtrūkimai, nutrupėjimai ir pan. Nuo tiriamųjų objektų atskilęs betonas 24 val. džiovinamas (105 ± 5)⁰C temperatūros ventiliuojamoje džiovykloje ir pasveriamas. Taip yra pamatuojama, kiek masės praranda bandiniai po 3 šaldymo - atšildymo ciklų.

Apžiūrėti tiriamieji objektai toliau laikomi šaldymo kameroje sekant jų būklę ir bandymas yra baigiamas pastebėjus intensyvų betono irimą. Tada nuo bandinių lengvai nuvalomi atskilę betono likučiai, o patys tiriamieji objektai džiovinami vieną parą. Sausi bandiniai pasveriami ir pagal formulę 2.14 nustatomas betono masės sumažėjimas po n ciklų.

$$\Delta m_n = \frac{m_{pr} - m_n}{m_{pr}} \cdot 100, \% \quad 2.14$$

čia: m_{pr} – pradinė bandinių masė, g;

m_n – bandinių masė po n ciklų, g.

2.7. Karbonatizacijos nustatymo metodika

Karbonatizacijos gylis nustatomas vykdomas pagal standartą LST EN 13295:2004 „Betoniųjų konstrukcijų apsauginiai ir remontiniai produktai bei sistemos. Bandymo metodai. Atsparumo karbonizacijai nustatymas“. Turimi bandiniai perskialiami pusiau ir skėlimo plokštumą nupurškus fenoftaleino tirpalu išmatuojamas pradinis karbonatizacijos gylis, kuris gali būti lygus nuliui, jeigu betono karbonatizacija dar nėra prasidėjusi. Tada tiriamieji objektai sudedami į karbonatizacijos kamerą, kurioje palaikomos tokios sąlygos: CO₂ koncentracija – 2%, santykinė drėgmė – 65%, temperatūra – 20 °C. Po 28 parų bandiniai iš kameros išimami, perskeliami ir vėl naudojant purškiamą fenoftaleino tirpalą išmatuojamas karbonatizacijos gylis.

2.8. Chloridų migracijos bandymo metodas

Šis eksperimentas vykdomas pagal ASTM C1202 „Electrical Indication of Concrete’s Ability to Resist Chloride Ion Penetration” metodiką. Ši metodika leidžia išmatavus betono elektrinį laidumą nustatyti chloridų jonų įsiskverbimo į betoną intensyvumą.

Esperimentas pradedamas betono bandinius sudedant į vakuuminį indą, kuriame tiriamieji objektai 3 val. laikomi 1 bar. slėgyje. Po to, inde išlaikant vakuumą, bandiniai apsemiami vandeniu ir dar 1 val. laikomi 1 bar. slėgyje. Tada išjungiamas siurblys ir tiriamieji objektai paliekami (18 ± 2) val. mirkti vandenyje.



9. pav. Bandiniai laikomi 1 bar. slėgyje ore (kairėje) ir vandenyje (dešinėje)

Įmirkę bandiniai ištraukiami iš vandens ir perteklinis vanduo pašalinamas su drėgnu audiniu. Toliau tiriamieji objektai įstatomi į du specialius plastikinius indus ir užsilikonuojami taip, kaip pavaizduota 10. pav.

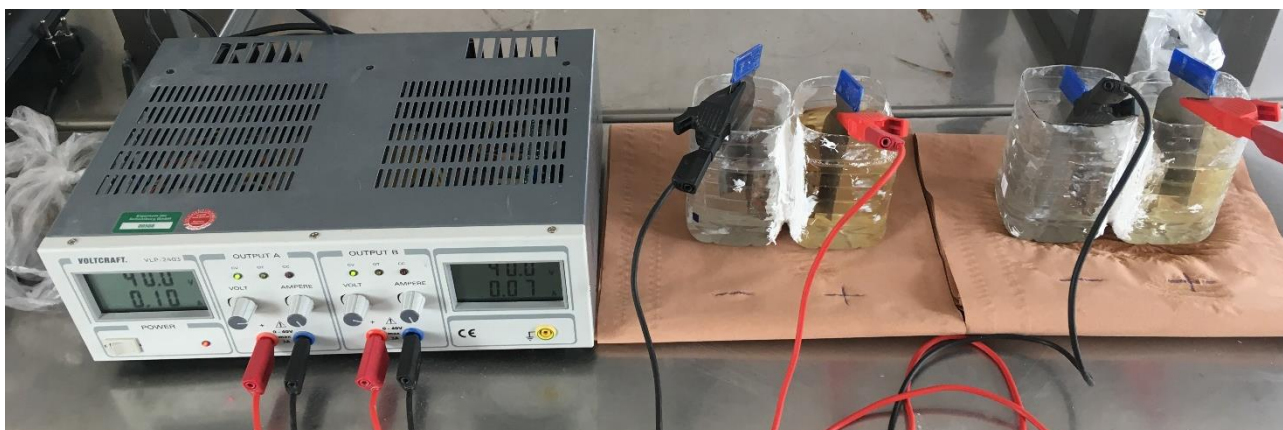


10. pav. Bandinių tvirtinimas išlaikant 5 cm tarpą tarp indų



11. pav. Bandinių tvirtinimas išlaikant 1 cm tarpą tarp indų

Laukiant kol silikonas sutvirtės bandiniai apdengiami polietilenine plėvele, apsaugančią betoną nuo džiūvimo. Silikonui patikimai užsandarinus plyšius, į vieną indą pilamas 3% druskos (NaCl) tirpalas, o į kitą – 0,3 N NaOH tirpalas (2 lituose vandens ištirpinti 24 g NaOH). Jų pilama tiek, kad pilnai apsemtų bandinius.



12. pav. Elektrolizės bandymas

Eksperimente naudojamas kintamos ir nuolatinės srovės reguliuojamas srovės šaltinis „VOLTCRAFT VLP 2403 Bench PSU“. Neigiamas prietaiso gnybtas panardinamas į natrio chlorido tirpalą, o teigiamas – į NaOH tirpalą. Įjungiamo ($40 \pm 0,1$) V įtampa ir pradedamas matuoti srovės stipris. Iš viso matavimai atliekami 6 val., ne mažesniais nei 30 min. laiko intervalais. Iš gautų duomenų brėžiami srovės stiprio priklausomybės nuo laiko grafikai, kuriuos suintegravus gaunamas srovės stipris, pratekėjęs grandine per 6 val. matavimo periodą. Galima apskaičiuoti naudojantis 2.15 formule:

$$Q = 900(I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + \dots + 2I_{300} + 2I_{330} + 2I_{360}), C \quad 2.15$$

čia: Q – grandine pratekėjusio elektrinio krūvio kiekis, C (kulonas) arba $A \cdot s$ (ampersekundė);

I_0 – srovės stipris bandymo pradžioje, A;

I_t – srovės stipris po laiko t , A;

Jeigu bandinys yra nestandartinio skerspjūvio ($D = 95$ mm), pratekėjęs elektros krūvis perskaičiuojamas pagal 2.16 formulę:

$$Q_s = Q_x \cdot \left(\frac{95}{x}\right)^2, C \quad 2.16$$

čia: Q_s – grandine pratekėjusio elektrinio krūvio kiekis, kai bandinio skerspjūvis $D = 95$ mm, C;

Q_x – grandine pratekėjusio elektrinio krūvio kiekis, kai bandinio skerspjūvis $D = x$ mm, C;

x – nestandartinio bandinio diametras.

2.9. Tyrimams naudota įranga



Sveria iki 3 500 g;

Tikslumas 0,01 g.

13. pav. Laboratorinės svarstyklės



Sveria iki 10 000 g;

Tikslumas 0,1 g.

14. pav. Laboratorinės hidrosatinės svarstyklės



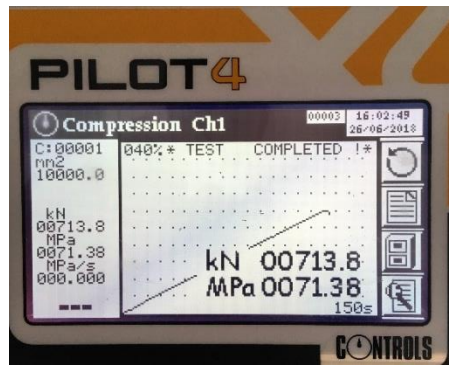
Didžiausia gniuždomoji galia 600 kN;

Apkrovos kitimo greitisbandymų metu 0,6 MPa/s

15. pav. Hidraulinis presas Toni Technik 2020



16. pav. Hidraulinis presas Controls 50-C4042



17. pav. Kompiuterinė įranga Pilot 4

Didžiausia gniuždomoji galia 3000 kN



18. pav. Džiovinimo krosnelė SNOL 58/350

Džiovinimo temperatūra 50 – 350 °C



19. pav. Šaldymo kamera

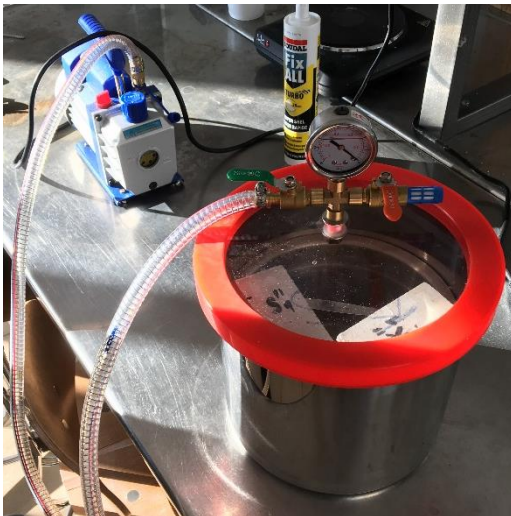


Tūris 5,5 m³

20. pav. Tūrinio šaldymo kamera KHS-2-6S

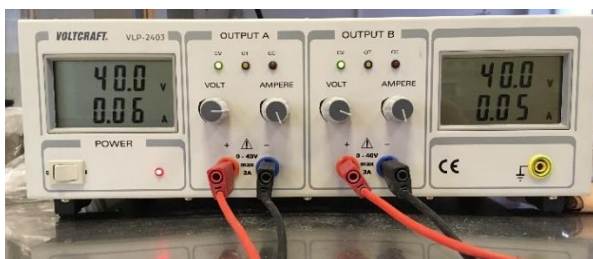


21. pav. CO₂ klimatinė kamera



Didžiausias palaikomas slėgis – 1 bar.;
Talpa – 7 l.

22. pav. Slėginis indas su siurbliu



Įtampa tarp gnybtų 0 – 40 V
Srovės stiprio matavimo tikslumas 0,01 A

23. pav. Reguliuojamas srovės šaltinis „VOLT-CRAFT VLP 2403 Bench PSU“

3. Tyrimų rezultatai ir jų aptarimas

3.1. Kristalinių priedų įtaka betono mišinio savybėms

2. lentelė. Betono mišinių savybės

Savybės	Bandinių tipai			
	K	T – 1	T – 2	T – 3
Slankumas, mm	75	110	155	60
Slankumas po 1 val., mm	70	110	175	50
Temperatūra, °C	18.0	17.5	17.1	17.6
Temperatūra po 1 val., °C	18.1	17.6	17.8	18.0
Tankis, kg/m ³	2369	2363	2376	2382
Oro kiekis, %	2.8	3.0	2.8	2.6

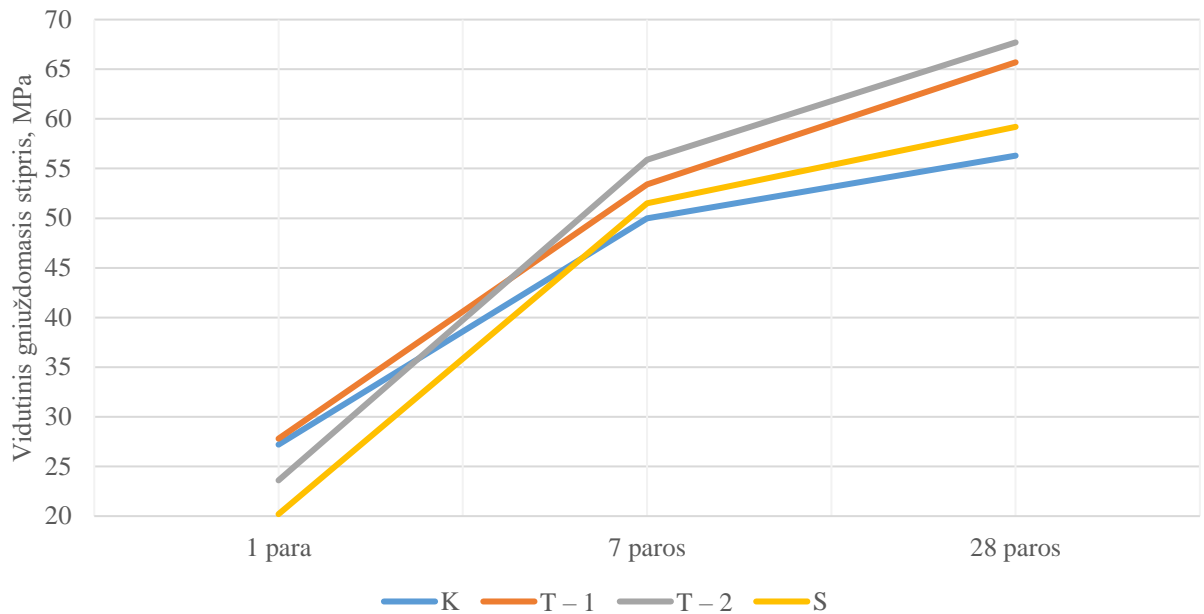
Pagal 3-ioje lentelėje pateiktus duomenis galima teigti, jog kristalinių priedų naudojimas betono mišinyje nepriklauso arba labai nežymiai lemia mišinio temperatūrą, tankį ir oro kiekį. Tuo tarpu betono slankumas kinta priklausomai nuo to, kokie kristaliniai priedai buvo naudojami. Taip pat svarbi yra ir jų koncentracija mišinyje. Pagal gautus rezultatus kontrolinio betono mišinio slankumo klasė yra S2. Naudojant 2-ojo gamintojo kristalinius priedus ši betono savybė nežymiai sumažėja, tačiau priklauso tai pačiai S2 klasei. Daug didesnę įtaką betono mišinio slankumui turi 1-ojo gamintojo naudojami kristaliniai priedai – panaudojus 1% minėtų priedų galima pasiekti S3 klasės slankumą, o padidinus koncentraciją iki 2% – S4 klasę.

3. lentelė. Betono gniuždomasis stipris po 1, 7 ir 28 dienų kietėjimo

Bandinio tipas	Gniuždomasis stipris po 1 dienos, MPa	Gniuždomasis stipris po 7 dienų, MPa	Gniuždomasis stipris po 28 dienų, MPa
K	27.2	50.0	56.3
T – 1	27.8	53.4	65.7
T – 2	23.6	55.9	67.7
T – 3	20.2	51.5	59.2

Iš 3-čios lentelės duomenų galima teigti, jog kristaliniai priedai turi neigiamą įtaką ankstyvam betono stiprumui, kadangi bandymo metu kubeliai su kristaliniais priedais po 1-os dienos buvo iki 25 % silpnesni nei kontroliniai.

Po 7 ir 28 dienų kietėjimo bandiniai su kristaliniais priedais pasiekia didesnę stiprį nei kontroliniai. Taigi įvertinus rezultatus įprasto betono bandinius galima priskirti C40/50 betono klasei, o tiriamuosius objektus su kristaliniais priedais - C50/60 klasei.



24. pav. Gniuždomasis stipris po 1, 7 ir 28 parų

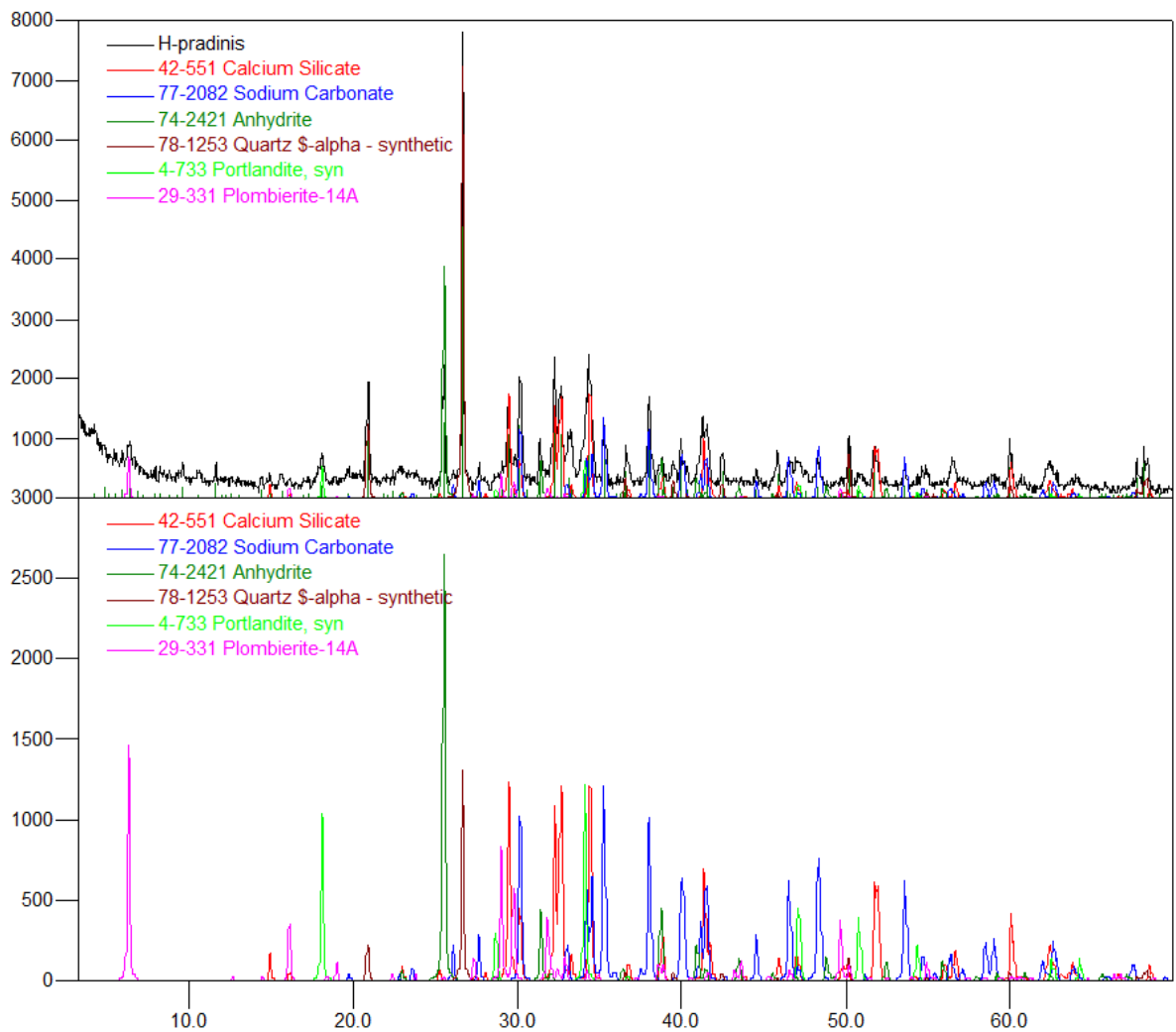
3.2. Cheminė bandinių analizė

Pagrindinė kristalinių priedų paskirtis yra užpildyti betone atsivėrusius plyšius. Norint patikrinti šio proceso veikimą yra suformuojami keturi visų tipų bandiniai (150x150x150 mm). Po mėnesio kietėjimo šie tiriamieji objektai apgniuždomi ir laikomi vandenyje 120 parų. Praėjus šiam laikotarpiui bandinių įtrūkimuose aiškiai matyti susidariusios nuosėdos (žiūrėti 2 priedą). Todėl galima teigti, jog kaip ir tikėtasi, vyksta savaiminis plyšių užsitaisymas betone.

Norint detaliau iširti susidariusių nuosėdų sudėtį 1-ojo gamintojo bandiniuose yra atliekama Rentgeno spindulių difrakcinė analizė (XRD). Toliau pateikiami gauti rezultatai rodo, kad susidariusios nuosėdos daugiausiai yra iš anhidrito ir kalcio silikatų mineralų.

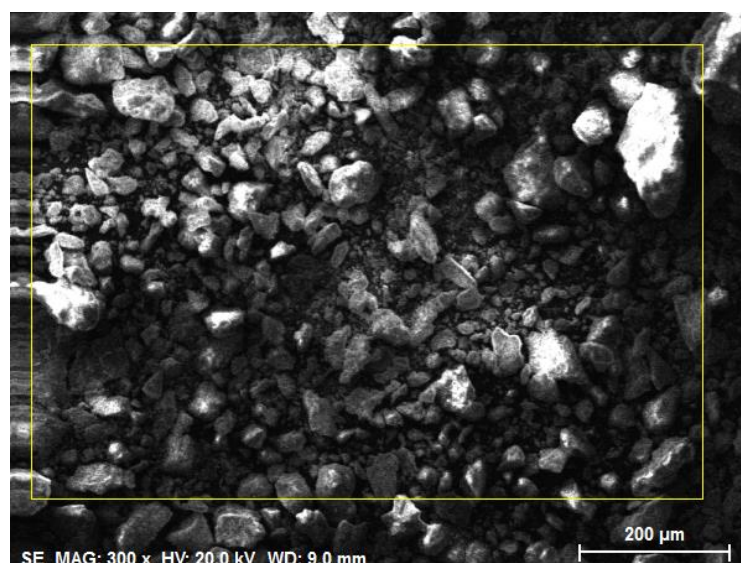
Medžiagos:

1. Kalcio silikatas (Calcium Silicate) Ca_3SiO_5
2. Natrio karbonatas (Sodium Carbonate) Na_2CO_3
3. Anhidritas (Anhydrite) $\text{Ca}(\text{SO}_4)$
4. Kvarcas (Quartz α – synthetic) SiO_2
5. Portlanditas (Portlandite, syn) $\text{Ca}(\text{OH})_2$
6. Plombieritas (Plombierite-14A) $\text{Ca}_5\text{Si}_6\text{O}_{16}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$

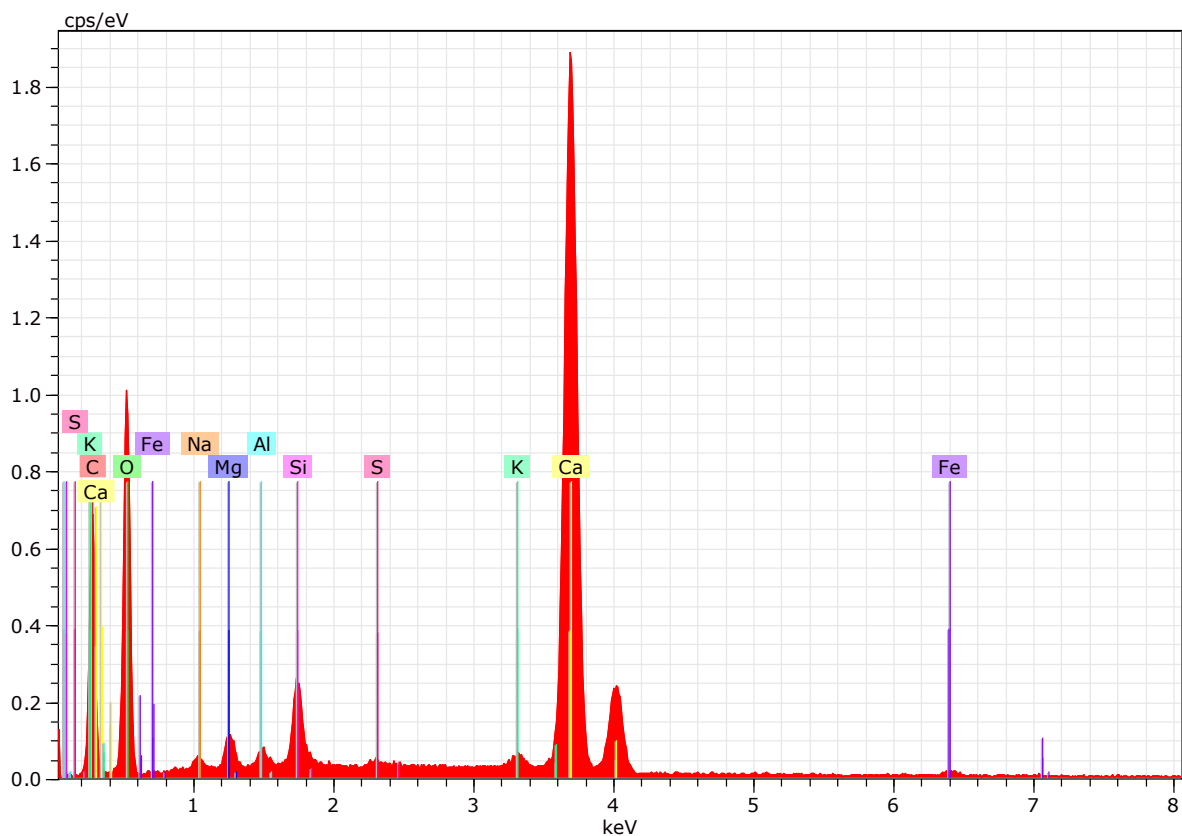


25. pav. XDR analizė T – 1 ir T – 2 mėginiams

Bandiniui, kuriame buvo naudojami 2-ojo gamintojo kristaliniai priedai, atliekamas SEM – EDX tyrimas, kurio metu nustatoma susidariusių nuosėdų topografija (26. pav.) ir cheminė sudėtis (27. pav.)



26. pav. SEM analizės metodu gautas T – 3 bandio nuosėdų paviršiaus vaizdas



27. pav. EDX metodu gauta T – 3 bandio nuosėdų cheminė sudėtis



Spectrum:

Element	Series	unn. C norm. C	Atom. C	Error (3 Sigma)
		[wt. %]	[wt. %]	[wt. %]
Carbon	K-series	23.00	19.40	9.86
Oxygen	K-series	59.49	50.20	23.55
Magnesium	K-series	0.66	0.56	0.21
Aluminium	K-series	0.23	0.20	0.13
Silicon	K-series	1.50	1.27	0.29
Calcium	K-series	32.38	27.32	2.94
Sodium	K-series	0.27	0.23	0.15
Potassium	K-series	0.41	0.35	0.13
Iron	K-series	0.43	0.36	0.15
Sulfur	K-series	0.15	0.13	0.11
Total:		118.52	100.00	100.00

28. pav. EDX metodu gauti T – 3 bandio nuosėdų cheminių elementų kiekiai

3.3. Kristalinių priedų įtaka atsparumui šalčiui

Tiriant šalčio poveikį betonui buvo pasirinktos keturios metodikos: įgeriamumo kinetika, paviršinis bei tūrinis šaldymas ir kapiliarinis ardyimas. Pirmuoju, įgeriamumo kinetikos bandymu, buvo siekiama netiesiogiai nustatyti betono atsparumo šalčiui kriterijų, kuris priklauso nuo betono mikrostruktūros – atviro ir uždaro poringumo. Taip pat šis bandymas suskaidytas į du etapus. Pirmuoju – bandiniuose sukeliama plyšiai, taip leidžiant suaktyvinti betone esančius kristalinius priedus, kurie pagal savo paskirtį užtaisydami plyšius turėtų pagerinti betono savybes. Tuo tarpu antruoju etapu nustatomas sveikų bandinių atsparumas šalčiui, norint sužinoti, ar kristalinių priedų naudojimas nepablogina betono savybių dar iki atsirandant pleišetumui.

Tyrimo metu surinkti duomenys pateikiami 3. priede. Pirmojo etapo bandinių poringumo rodiklių vidurkiai pateikti 4 – toje ir 6 – toje lentelėse. Iš turimų duomenų galima teigti, jog kristalinių priedų naudojimas lemia 7 – 9 % mažesnę betono pradinį poringumą lyginant su betonu, kuriame tokie priedai nenaudojami.

Apgniuždžius bandinius ir atsiradus mikroplyšiams dar kartą buvo nustatyti bandinių poringumo parametrai, iš kurių visais atvejais matomas padidėjęs atviras bandinių poringumas ir nepakitęs arba sumažėjęs uždaras poringumas. Atlikus tiriamųjų objektų gydymą gaunamas atviro poringumo sumažėjimas kontroliniuose (3 – 4 %) ir kristalinių priedų turinčiuose bandiniuose (5 – 7 %). Tuo tarpu uždaras poringumas padidėja atitinkamai 21 % (be priedų) ir 30 – 42 % (su priedais).

Atsparumo šalčiui kriterijus bandymo eigoje kinta, kaip ir tikėtasi: apgniuždžius bandinius – sumažėja, atlikus gydymą – išauga. Norint įvertinti dinamiką šalčio atsparumui skirtingos sudėties tiriamuosiuose objektuose, galima palyginti atsparumo šalčiui kriterijaus procentinį padidėjimą nuo bandinių apgniuždymo iki jų gydymo vandenyje pabaigos. Taip išvengiama netikslumų gaunamų apgniuždant bandinius, kadangi mikroplyšiai juose galėjo pasiskirstyti netolygiai. Taigi, atsparumo šalčiui kriterijus kontroliniuose bandiniuose po gydymo išaugo 26 %, o tiriamuosiuose objektuose su kristaliniais priedais atitinkamai 39 %, 43 % ir 50 %. Tai rodo, jog supleišėjęs betonai su savaiminį užsigydymą skatinančiais kristaliniais priedais atsparumą šalčio poveikiui atstato greičiau nei analogiškas betonai be šių priedų.

4. lentelė. A bandymas. Bentono poringumo parametrai

Bandinio tipas	Bendras poringumas, %			Atviras poringumas, %			Uždaras poringumas, %		
	Kontro- linio	Po gniuždymo	Po „gydymo“	Kontro- linio	Po gniuždymo	Po „gydymo“	Kontro- linio	Po gniuždymo	Po „gydymo“
K	15,12	16,98	17,22	11,66	13,30	12,77	3,46	3,68	4,45
T-1	13,97	15,23	15,35	11,17	12,36	11,61	2,80	2,88	3,75
T-2	14,02	13,48	13,62	10,94	11,23	10,58	3,09	2,26	3,04
T-3	13,70	14,19	14,52	10,91	12,02	11,45	2,79	2,17	3,07

5. lentelė. A bandymas. Bontono atsparumo šalčiui kriterijus

Bandinio tipas	Atsparumo šalčiui kriterijus		
	Kontrolinio	Po gniuždymo	Po „gydymo“
K	3,28	3,07	3,87
T-1	2,78	2,59	3,59
T-2	3,14	2,23	3,20
T-3	2,85	2,00	3,01

Antro etapo metu atliekant įgeriamumo bandymą gauti pradiniai tiriamųjų objektų poringumo parametrai. Nors šie bandiniai turėjo skirtingą geometriją, tačiau jų parametrai yra analogiški pirmo bandymo rezultatams, o atsparumo šalčiui kriterijai – praktiškai identiški (skyrėsi mažiau nei 3%). Tiriamuosius objektus apie mėnesį išlaikius vandenyje gauta, jog kontrolinių bandinių bendras poringumas nežymiai padidėjo, tuo tarpu betono su kristaliniais priedais sumažėjo. Nors atviras visų bandinių poringumas kito taip pat kaip pirmajame bandyme, tačiau uždaras poringumas tiriamuosiuose objektuose su kristaliniais priedais padidėjo 18 %, o be jų – 14 %. Atsparumo šalčiui kriterijus kontroliniuose bandiniuose po gydymo išaugo vidutiniškai 18%, o tiriamuosiuose objektuose su kristaliniais priedais 27 %. Tai rodo, kad savaime atsinaujinantis betonas per mėnesį laiko vandenyje sparčiau padidina savo atsparumą šalčiui.

6. lentelė. B bandymas. Bontono poringumo parametrai

Bandinio tipas	Bendras poringumas, %		Atviras poringumas, %		Uždaras poringumas, %	
	Kontrolinio	Po „gydymo“	Kontrolinio	Po „gydymo“	Kontrolinio	Po „gydymo“
K	13,14	13,23	10,19	9,86	2,95	3,37
T-3	12,24	12,03	9,69	9,02	2,55	3,01

7. lentelė. B bandymas. Bontono atsparumo šalčiui kriterijus

Bandinio tipas	Atsparumo šalčiui kriterijus	
	Kontrolinio	Po „gydymo“
K	3,21	3,80
T-3	2,93	3,71

Toliau buvo atliktas paviršinio šaldymo testas, kurio metu per 56 ciklų laikotarpį nebuvo pastebėta jokių betono pažeidimų, druskos tirpalo sumažėjimo ar kitų defektų. Todėl galima daryti išvadą, jog betono bandiniai buvo pernelyg stiprūs, jog po 56 užšaldymo – atšildymo ciklų būtų galima pastebėti paviršinio šaldymo žalą. Taip pat tai parodo, kad kristalinių riedų naudojimas betone nepablogina atsparumo šalčiui savybių tiriant betoninius paviršius.

Trečias atliktas bandymas buvo tūrinis šaldymas. Kontrolinių bandinių gniuždomieji stipriai pateikti 8 – oje lentelėje. Kadangi šie tiriamieji objektai buvo gniuždyti praėjus daugiau nei metams po jų suformavimo (iš kurių apie 3 mėn bandiniai buvo laikyti vandenyje), todėl apytiksliai perskaičius gaunamas 87 MPa kubinis betono stipris. Tai paaiškina, kodėl paviršinio šaldymo metu nebuvo pastebėtas ardomasis šalčio poveikis.

Tiriamieji objektai tūrinio šaldymo kameroje buvo laikomi 40 dienų, t.y. 120 užšaldymo – atšildymo ciklų. Po bandymo gauti rezultatai pateikti 9 – oje lentelėje. Jie rodo ženkliai sumažėjusią bandinių laikomąją galią: kontrolinių bandinių stipris sumažėjo apie 60%, o bandinių su kristaliniais priedais – 54%. Nors iš šio bandymo rezultatų negalima nustatyti šalčio atsparumo klasės, tačiau palyginus matome, jog naudojant kristalinius priedus betono bandiniai tampa nežymiai atsparesni tūrinio šaldymo poveikiui.

8. lentelė. Kontroliniai tūrinio šaldymo duomenys

Bandinio nr.	Bandinio matmenys, mm	Skerspjūvio plotas, mm ²	Gniuždymo jėga, kN	Laikomasis stipris, MPa
K3	48,68x42,56	2072	147,7	71,3
S3	50,05x39,77	1991	136,9	68,8

9. lentelė. Tūrinio šaldymo rezultatai

Bandinio nr.	Bandinio matmenys, mm	Skerspjūvio plotas, mm ²	Gniuždymo jėga, kN	Laikomasis stipris, MPa
K1	48,87x38,62	1887	50,27	27,0
K2	48,84x39,70	1939	58,4	30,1
S1	49,61x40,08	1988	66,9	33,6
S2	50,13x40,22	2016	59,9	29,8

Paskutinis metodas norint nustatyti šaldymo poveikį betonui buvo kapiliarinis ardymas. Iš pradžių atliekant bandymą buvo nutarta vietoje 3% druskos (NaCl) tirpalo naudoti distiliuotą vandenį, jog būtų sulėtintas irimo procesas ir būtų galima lengviau kontroliuoti tyrimo eigą. Tačiau po 7 užšaldymo – atšildymo ciklų nebuvo pastebėtas joks ryškesnis bandinių irimo požymis. Taip nutiko dėl jau minėto itin didelio tiriamųjų objektų stiprumo. Taigi vandenį pakeitus druskos tirpalu jau po 3 ciklų gautas rezultatas pavaizduotas 29. pav.



29. pav. Bandiniai po kapiliarinio šaldymo

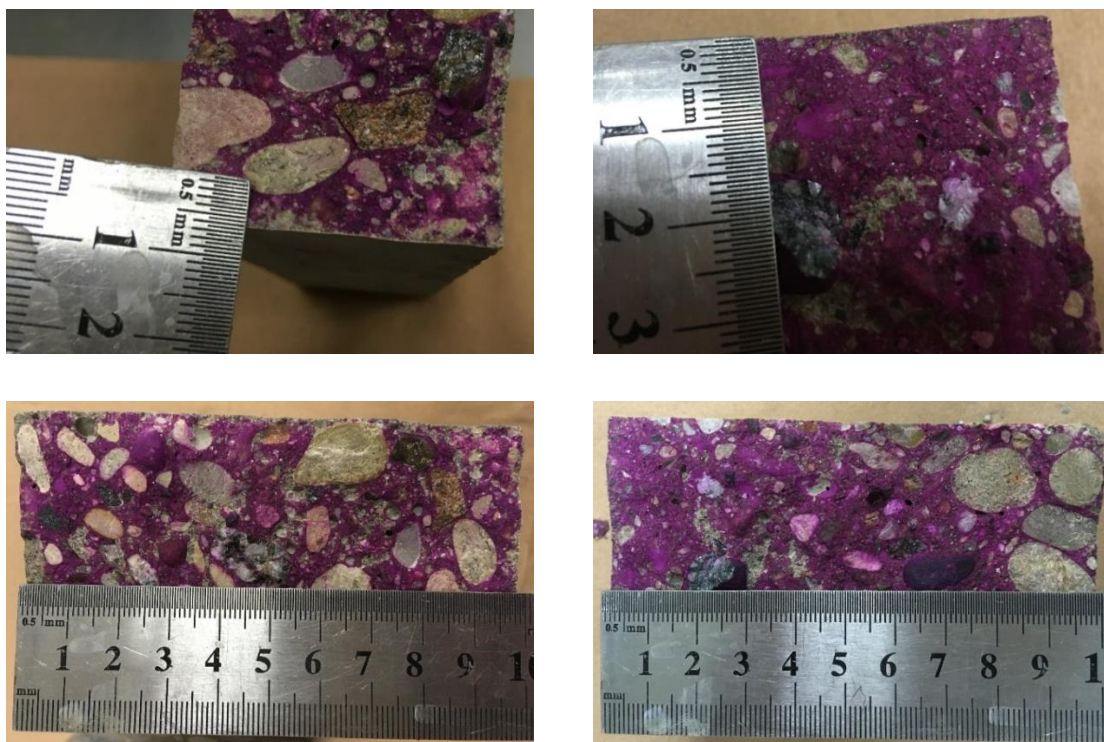
Iš nuotraukų matoma jog betoną veikiant šaltiui ir druskoms vyksta nepalyginamai spartesnis irimo procesas nei bandinius pamerkus į distiliuotą vandenį. Taip pat aiškiai matyti, jog kristalinių priedų naudojimas betone žymiai padidino tiriamųjų objektų atsparumą kapiliariniam ardymui. Tai patvirtina nesuirusių bandinių aukščiai ir likutinės masės, kurios pateiktos 10 – toje lentelėje.

10. lentelė. Kapiliarinio šaldymo rezultatai

Bandinio nr.	Pradinis aukštis, mm	Aukštis po bandymo, mm	Pradinė masė, g	Masė po bandymo, g	Masės pokytis, %
K – 3	100	65	566,1	362,6	36
K – 4	100	70	542,4	380,8	30
T – 3	100	80	548,9	446,0	19
T – 4	100	80	529,1	450,3	15

3.4. Kristalinių priedų įtaka betono karbonatizacijai

Karbonatizacijos gylio nustatymo metu buvo palygintas skirtingų tiriamųjų objektų karbonatizacijos gylis bandymo pradžioje ir po 21 dienos laikymo karbonatizacijos kameroje vadovaujantis ankstesniuose skyriuose aprašyta metodika. Tyrimo pradžioje buvo nustatyta, jog betono bandiniai nebuvo karbonatizavęsi. O atlikus testą gylio nustatymui po 21 dienos laikymo kameroje gauti kitokie rezultatai. Kontroliniuose bandiniuose nustatytas karbonatizacijos gylis siekė iki 2-3 mm ties paviršiais, kurie bandinių formavimo metu buvo atviri. Kitur karbonatizacijos gylis buvo iki 1 mm. Tuo tarpu tiriamuosiuose objektuose, kuriuose naudotos kristalinės priemaišos, karbonatizacija praktiškai nepasireiškė. Palyginamieji vaizdai pateikti 30. pav. Taigi savaime ausinaujinančio betono naudojimas sulėtina karbonatizacijos procesus betono konstrukcijose.



30 pav. Karbonatizacijos gylio nustatymas. Kontroliniai (kairėje) ir tiriamieji (dešinėje) bandiniai

3.5. Kristalinių priedų įtaka chloridų migracijai

Chloridų įsiskverbimo gylio į betoną nustatymo eksperimentas buvo atliktas su dvejomis poromis bandinių, kurių vienas elementas buvo kontrolinis – neturintis kristalinių priedų, o kitas – su savaiminį betono atsinaujinimą skatinančiais kristaliniais priedais. Bandymo metu pirmieji tiriamieji objektai (5 x 5 x 10 cm) buvo įstatyti į indelius taip, jog atstumas tarp tirpalų būtų apie 5 cm. Prijungus elektros srovės šaltinį gautas pradinis 0,02 A srovės stipris, kuris per 6 val. matavimo nepasikeitė. Buvo nuspręsta bandymą tęsti 24 val., po kurių, skėlimo būdu padalijus bandinius pusiau ir nupurškus sidabro nitrato (AgNO_3) tirpalu, papildėjusioje zonoje matomas chloridų įsiskverbimo į betoną gylis (31. pav.).

Antrą kartą buvo išbandomi 5 x 5 x 5 cm kubeliai, šįkart tarp druskos ir natrio šarmo tirpalų buvo paliktas mažesnis – apie 1 cm ilgio tarpas. Matavimų pradžioje srovės stipris per kontrolinį kubelį siekė 0,04 A. Antrajame bandinyje stipris buvo lygus 0,03 A. Per 6 val. ampermetro parodymai pakilo tik per 0,01 A – iki 0,05 A kontroliniame ir 0,04 A antrame bandinyje. Todėl, kaip ir pirmuoju atveju, bandymas buvo tęsiamas 24 val. ir po jų srovės stipris pirmame tiriamajame objekte išaugo iki 0,10 A, o antrame iki 0,07 A.

Elektrolizės metu gauti bandymų rezultatai neleidžia pagal ASTM C1202 metodiką įvertinti chloridų įsiskverbimo į betoną intensyvumo, nes visuose bandiniuose gauta per maža pratekanti elektros srovė ir jos pokytis. Taip nutiko dėl kelių veiksnių. Pirmiausia, bandiniai buvo pagaminti iš pakankamai stipraus ir tankaus betono (tai jau aptarta ankstesniuose skyriuose), pro kurį prasiskverbtį drėgmei buvo sudėtinga. Taip pat pirmo tyrimo metu tarp tirpalų palikus didesnę tarpą liko apie 4 cm atviro betono sluoksnis, kuris bandymo eigoje leido daliai tiriamajame objekte buvusios drėgmės išgaruoti, taip pabloginant betono laidumo elektrai savybes. Svarbu ir tai, kad bandymo metu buvo naudota didžiausia galima srovės šaltinio įtampa, kuri siekė 40 V, o pagal standartinę metodiką turėtų būti palaikoma 60 V. Taip pat šaltinio gnybtai buvo prijungti prie paprastų metalinių splokštelių, kai standartinio bandymo metu srovė į tirpalus perduodama per specialius metalinius tiklelius, turinčius geresnes elektros laidumo savybes ir daug didesnę paviršiaus plotą.



31 pav. Chloridų įsiskverbimo gylis. Kontroliniai (kairėje) ir tiriamieji (dešinėje) bandiniai

Visgi iš elektrolizės metu gautų duomenų matyti, jog srovės stipris visais atvejais labiau padidėja kontroliniuose bandiniuose nei tiriamuosiuose objektuose su kristaliniais priedais. Vadinasi galima daryti prielaidą, jog chloridai intensyviau įsiskverbia į įprastą betoną. Tai visiškai pasitvirtina perskėlus bandinius ir įvertinus tikrąjį chloridų įsiskverbimo gylį. Nupurškus trumpuosius bandinius sidabro nitrato tirpalu gaunamas viso skerspjūvio papildėjimas, kuris rodo, jog chloridai persiskverbė per visą elementą. Tik iš anksčiau elektrolizės metodu gautų duomenų galima tvirtinti, jog įsiskverbimas į kontrolinį bandinį vyko intensyviau. Tuo tarpu ilguosiuose tiriamuosiuose objektuose per 24 val. chloridams nepavyko paveikti viso skerspjūvio. Iš 32. pav. matyti, jog kontroliniame bandinyje chloridai į betoną įsiskverbė 5 – 8 cm, o į betoną su kristaliniais priedais 1 – 8 cm, visą betono centrinę dalį paliekant nepaveiktą. Todėl galima daryti išvadą, jog savaime atsinaujinantis betonas yra atsparesnis chloridų poveikiui.



32. pav. Chloridų įsiskverbimo gylis. Kontrolinis (kairėje) ir tiriamasis (dešinėje) bandiniai

Išvados

1. Kristalinių priedų naudojimas neturi įtakos betono mišinio temperatūrai, tankiui ir oro kiekiui mišinyje, tačiau gali lemti betono mišinio slankumo svyravimus, kurie priklauso nuo naudotų kristalinių priedų sudėties ir koncentracijos. Taip pat savaime atsinaujinantis betonas pasižymi iki 25 % mažesniu ankstyvuotu betono stipriu po gaminių suformavimo.
2. Kristalinių priedų naudojimas lemia 7 – 9 % mažesnę betono pradinę poringumą lyginant su betonu, kuriame tokie priedai nenaudojami. Bandinius laikant vandenyje atviras poringumas sumažėja 3 – 4 % kontroliniuose ir 5 – 7 % kristalinių priedų turinčiuose bandiniuose. Tuo tarpu uždaras poringumas padidėja atitinkamai 21 % (be priedų) ir 30 – 42 % (su priedais).
3. Netiesioginiais matavimais nustatytas nuo 5 % iki 15 % mažesnis pradinis savaime atsinaujinančio betono atsparumas šalčiui priklausomai nuo naudotų kristalinių priedų sudėties ir koncentracijos. Tačiau kontrolinius bandinius 3 mėn. laikant vandenyje jų atsparumas šalčiui padidėja tik 26 %, tuo tarpu bandiniuose iš savaime atsinaujinančio betono 39 – 50 %. Atlikus ardančius bandymus pastebėta, jog bandiniai su kristaliniais priedais yra atsparesni kapiliariniam ardymui, nes jų masė po bandymo sumažėjo 15 – 19 %, lyginant su kontroliniais 30 – 36 %. Paviršinio ir tūrinio šaldymo rezultatai neparodė reikšmingų skirtumų.
4. Savaime ausinaujinančio betono naudojimas sulėtina karbonatizacijos procesą. Bandinius išlaikius CO₂ kameroje karbonatizacijos gylis kontroliniuose bandiniuose siekė 1 – 3 mm, o bandiniuose su kristaliniais priedais karbonatizacija nepasireiškė.
5. Savaime atsinaujinantis betonas yra atsparesnis chloridų poveikiui, nes elektrolizės metu pro jį sunkiau prateka elektros srovė ir gaunamas iki 30 % mažesnis srovės stipris. Taip pat išmatuotas iki 4 cm mažesnis chloridų įsiskverbimo gylis.

Literatūros sąrašas

1. Haoliang Huang, Guang Ye, Chunxiang Qian, Erik Schlangenb, *Self-healing in cementitious materials: Materials, methods and service conditions*, 2015;
2. S. Jacobsen, J. Marchand, H. Hornain, *Sem observations of the microstructure of frost deteriorated and self-healed concretes*, 1995;
3. C. Edvardsen, *Water permeability and autogenous healing of cracks in concrete*, 1999;
4. Y. Yang, M.D. Lepech, E.-H. Yang, V.C. Li, *Autogenous healing of engineered cementitious composites under wet-dry cycles*, 2009;
5. S. Qian, J. Zhou, M.R. de Rooij, E. Schlangen, G. Ye, K. van Breugel, *Self-healing behavior of strain hardening cementitious composites incorporating local waste materials*, 2009;
6. K. Sisomphon, O. Copuroglu, E.A.B. Koenders, *Self-healing of surface cracks in mortars with expansive additive and crystalline additive*, 2012;
7. H. Huang, *Thermodynamics of Autogenous Self-healing in Cementitious Materials*, 2014;
8. T.H. Ahn, T. Kishi, *Crack self-healing behavior of cementitious composites incorporating various mineral admixtures*, 2010;
9. W. De Muynck, N. De Belie, W. Verstraete, *Microbial carbonate precipitation in construction materials: a review*, 2010;
10. N. De Belie & J. Wang, *Bacteria-based repair and self-healing of concrete*, 2015;
11. H.M. Jonkers, A. Thijssen, G. Muyzer, O. Copuroglu, E. Schlangen, *Application of bacteria as self-healing agent for the development of sustainable concrete*, 2010;
12. Maria Araújo ir kiti, *Cross-linkable polyethers as healing/sealing agents for self-healing of cementitious materials*, 2016;
13. H. Huang, G. Ye, Z. Shui, *Feasibility of self-healing in cementitious materials by using capsules or a vascular systems*, 2014;
14. Nasiru Zakari Muhammad ir kiti, *Tests and methods of evaluating the self-healing efficiency of concrete*, 2016;
15. C. De Nardi, A. Cecchi, L. Ferrara, A. Benedetti, D. Cristofori, *Effect of age and level of damage on the autogenous healing of lime mortars*, 2017;
16. Mian Luo, Chunxiang Qian, *Influences of bacteria-based self-healing agents on cementitious materials hydration kinetics and compressive strength*, 2016;
17. M. Maes, D. Snoeck, N. De Belie, *Chloride penetration in cracked mortar and the influence of autogenous crack healing*, 2016;
18. H. Maa, S. Qian, Z. Zhang, *Effect of self-healing on water permeability and mechanical property of Medium-Early-Strength Engineered Cementitious Composites*, 2014;
19. A. Kanellopoulos, T.S. Qureshi, A. Al-Tabbaa, *Glass encapsulated minerals for self-healing in cement based composites*, 2015;
- 20 Ramin Andalib ir kiti, *Optimum concentration of Bacillus megaterium for strengthening structural concrete*, 2016;
21. LST EN 12350-2:2011 *Betono mišinio bandymai. 2 dalis. Slankumo bandymas*;
22. LST EN 12350-6:2011 *Betono mišinio bandymai. 6 dalis. Tankis*;
23. LST EN 12350-7:2011 *Betono mišinio bandymai. 7 dalis. Oro kiekis. Slėginiai metodai*;
24. LST EN 12390-3:2011 *Sukietėjusio betono bandymai. 3 dalis. Bandinių gniuždymo stipris*;
25. GOST 12730.4-78:2007 *Betonas. Poringumo nustatymo metodai*;
26. CEN/TS 12390-9:2016 *Testing hardened concrete - part 9: freeze-thaw resistance with de-icing salts – scaling*;

27. LST EN 13295:2004 *Betoninių konstrukcijų apsauginiai ir remontiniai produktai bei sistemos. Bandyto metodai. Atsparumo karbonizacijai nustatymas;*
28. ASTM C1202:2012 *Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration;*
29. EN 13396:2004 *„Products and systems for the protection and repair of concrete structures – test;*
30. Mater Struct, *Freeze-thaw and de-icing resistance of concrete*, 1996, p. 523-528.

Priedai

1 priedas. Apgniuždyti bandiniai



1. pav. Kontrolinis bandinys



2. pav. T – 3 bandinys



3. pav. T – 1 bandinys



4. pav. T – 2 bandinys

2 priedas. Ant bandinių susidariusios nuosėdos po 120 dienų laikymo vandenyje



5. pav. Susiformavusios nuosėdos

3 priedas. Įgeriamumo kinetikos bandymo duomenys ir skaičiavimų rezultatai

1. lentelė. Kontroliniai bandiniai

Bandinio tipas	Nr.	Išdžiovintas bandinys	Bandinio masė vandenyje				48 val. sveriant vandenyje	Wp(m),%	ρ, kg/m ³	Wp(V),%	W1,%	W2,%	W1(s)	W2(s)	L1	a	W3,%	Pp	Pa	Pu	Ks
			15 min.	1 val.	24 val.	48 val.															
K	1	522,45	536,47	544,74	551,59	551,76	318,70	5,61	2241,70	12,58	2,68	4,27	0,48	0,76	1,43	0,53	5,58	16,67	12,58	4,09	3,61
	2	507,68	520,05	526,34	531,40	531,68	312,88	4,73	2320,29	10,97	2,44	3,68	0,52	0,78	1,53	0,55	4,67	13,74	10,97	2,77	2,81
	3	505,44	519,46	525,98	531,49	531,82	309,29	5,22	2271,33	11,85	2,77	4,06	0,53	0,78	1,53	0,55	5,15	15,56	11,85	3,71	3,48
	4	540,15	553,72	560,52	566,27	566,53	331,71	4,88	2300,27	11,23	2,51	3,77	0,51	0,77	1,48	0,51	4,84	14,49	11,23	3,25	3,22
	vid.							5,11	2283,40	11,66	2,60	3,94	0,51	0,77	1,48	0,51	5,06	15,12	11,66	3,46	3,28
T-1	1	552,81	565,62	572,52	579,62	580,00	339,84	4,92	2301,84	11,32	2,32	3,57	0,47	0,72	1,27	0,44	4,85	14,43	11,32	3,11	3,05
	2	521,52	534,21	541,27	548,19	548,63	320,30	5,20	2284,06	11,87	2,43	3,79	0,47	0,73	1,31	0,44	5,11	15,09	11,87	3,22	3,01
	3	527,69	539,44	546,04	552,68	552,90	326,18	4,78	2327,50	11,12	2,23	3,48	0,47	0,73	1,31	0,44	4,74	13,48	11,12	2,36	2,35
	4	543,54	555,25	561,52	567,30	567,56	335,66	4,42	2343,86	10,36	2,15	3,31	0,49	0,75	1,39	0,52	4,37	12,87	10,36	2,51	2,69
	vid.							4,83	2314,31	11,17	2,28	3,53	0,47	0,73	1,31	0,44	4,77	13,97	11,17	2,80	2,78
T-2	1	515,71	526,91	532,60	539,35	539,66	318,03	4,64	2326,90	10,81	2,17	3,28	0,47	0,71	1,24	0,43	4,58	13,50	10,81	2,69	2,77
	2	539,20	550,56	556,51	563,63	563,94	330,36	4,59	2308,42	10,59	2,11	3,21	0,46	0,70	1,21	0,44	4,53	14,19	10,59	3,59	3,77
	3	564,27	577,08	583,37	591,19	591,54	346,68	4,83	2304,46	11,14	2,27	3,38	0,47	0,70	1,21	0,44	4,77	14,33	11,14	3,20	3,19
	4	540,03	552,50	558,60	565,98	566,21	332,59	4,85	2311,57	11,21	2,31	3,44	0,48	0,71	1,24	0,44	4,81	14,07	11,21	2,86	2,84
	vid.							4,73	2312,84	10,94	2,21	3,33	0,47	0,70	1,21	0,44	4,67	14,02	10,94	3,09	3,14
T-3	1	531,22	541,30	547,31	555,69	556,16	328,12	4,69	2329,50	10,94	1,90	3,03	0,40	0,65	1,06	0,44	4,61	13,40	10,94	2,46	2,50
	2	544,66	556,02	562,30	570,70	571,19	335,08	4,87	2306,81	11,24	2,09	3,24	0,43	0,66	1,09	0,44	4,78	14,25	11,24	3,01	2,98
	3	509,06	518,84	524,00	531,22	531,59	313,83	4,43	2337,71	10,35	1,92	2,93	0,43	0,66	1,09	0,44	4,35	13,10	10,35	2,75	2,95
	4	572,43	584,11	590,16	599,59	599,94	352,33	4,81	2311,82	11,11	2,04	3,10	0,42	0,64	1,03	0,44	4,74	14,06	11,11	2,95	2,95
	vid.							4,70	2321,46	10,91	1,99	3,07	0,42	0,65	1,06	0,44	4,62	13,70	10,91	2,79	2,85

2. lentelė. Bandiniai po gniuždymo

Bandinio tipas	Nr.	Išdžiovintas bandinys	Bandinio masė vandenyje				48 val. sveriant vandenyje	Wp(m),%	ρ, kg/m ³	Wp(V),%	W1,%	W2,%	W1(s)	W2(s)	L1	a	W3,%	Pp	Pa	Pu	Ks
			15 min.	1 val.	24 val.	48 val.															
K	1	521,66	535,69	543,57	552,21	552,73	319,14	5,96	2233,23	13,30	2,69	4,20	0,45	0,71	1,24	0,45	5,86	16,98	13,30	3,68	3,07
T-1	2	520,53	531,67	537,57	548,46	548,74	320,46	5,42	2280,23	12,36	2,14	3,27	0,39	0,60	0,92	0,42	5,37	15,23	12,36	2,88	2,59
T-2	1	515,34	525,45	530,55	539,82	540,23	318,54	4,83	2324,60	11,23	1,96	2,95	0,41	0,61	0,95	0,42	4,75	13,58	11,23	2,36	2,33
	2	538,59	549,41	554,25	564,16	564,54	333,39	4,82	2330,05	11,23	2,01	2,91	0,42	0,60	0,92	0,42	4,75	13,38	11,23	2,15	2,13
	vid.							4,82	2327,32	11,23	1,99	2,93	0,41	0,61	0,95	0,42	4,75	13,48	11,23	2,26	2,23
T-3	1	530,40	540,41	545,11	556,46	556,79	328,73	4,98	2325,70	11,57	1,89	2,77	0,38	0,56	0,83	0,40	4,91	13,54	11,57	1,97	1,89
	2	541,97	556,98	563,15	571,12	571,49	334,89	5,45	2290,66	12,48	2,77	3,91	0,51	0,72	1,27	0,43	5,38	14,85	12,48	2,37	2,11
	vid.							5,21	2308,18	12,02	2,33	3,34	0,44	0,64	1,03	0,42	5,15	14,19	12,02	2,17	2,00

čia:

Wp(m) – vandens įgėris pagal masę, %;

ρ – tankis, kg/m³;

Wp(V),% – vandens įgėris pagal tūrį, %;

W1,% – vandens įgėris po 15 min.;

W2,% – vandens įgėris po 1 val.;

L1, a – pagalbiniai parametrai;

W3,% – vandens įgėris po 24 val.;

Pp – bendras poringumas;

Pa – atviras poringumas;

Pu – uždaras poringumas;

Ks – atsparumo šalčiui kriterijus.

3. lentelė. Bandiniai po „gydymo“

Bandinio tipas	Nr.	Išdžiovintas bandinys	Bandinio masė vandenyje				48 val. sveriant vandenyje	Wp(m),%	ρ, kg/m ³	Wp(V),%	W1,%	W2,%	W1(s)	W2(s)	L1	a	W3,%	Pp	Pa	Pu	Ks
			15 min.	1 val.	24 val.	48 val.															
K	1	524,16	534,45	539,81	553,76	554,21	318,83	5,73	2226,87	12,77	1,96	2,99	0,34	0,52	0,75	0,32	5,65	17,22	12,77	4,45	3,87
T-1	2	523,07	531,74	535,82	549,18	549,73	320,01	5,10	2276,99	11,61	1,66	2,44	0,33	0,48	0,68	0,32	4,99	15,35	11,61	3,75	3,59
T-2	1	517,71	526,18	530,19	541,15	541,46	318,36	4,59	2320,53	10,65	1,64	2,41	0,36	0,53	0,77	0,32	4,53	13,73	10,65	3,09	3,22
	2	541,14	549,54	553,20	564,91	565,57	333,01	4,51	2326,88	10,50	1,55	2,23	0,34	0,49	0,69	0,31	4,39	13,50	10,50	2,99	3,17
	vid.							4,55	2323,71	10,58	1,59	2,32	0,35	0,51	0,73	0,32	4,46	13,62	10,58	3,04	3,20
T-3	1	533,30	540,68	544,35	555,97	557,22	327,83	4,49	2324,86	10,43	1,38	2,07	0,31	0,46	0,65	0,31	4,25	13,57	10,43	3,15	3,35
	2	543,99	556,64	561,62	573,27	573,82	334,60	5,48	2274,02	12,47	2,33	3,24	0,42	0,59	0,70	0,29	5,38	15,46	12,47	2,99	2,67
	vid.							4,98	2299,44	11,45	1,85	2,66	0,37	0,53	0,77	0,31	4,82	14,52	11,45	3,07	3,01

4. lentelė. Bandiniai prieš „gydymą“

Bandinio tipas	Nr.	Išdžiovintas bandinys	Bandinio masė vandenyje				48 val. sveriant vandenyje	Wp(m),%	ρ, kg/m ³	Wp(V),%	W1,%	W2,%	W1(s)	W2(s)	L1	a	W3,%	Pp	Pa	Pu	Ks
			15 min.	1 val.	24 val.	48 val.															
K	1	348,42	356,10	359,88	362,88	363,34	214,80	4,28	2345,63	10,04	2,20	3,29	0,51	0,77	1,48	0,51	4,15	12,80	10,04	2,76	3,05
	2	330,44	338,03	341,57	344,28	344,70	203,50	4,32	2340,23	10,10	2,30	3,37	0,53	0,78	1,53	0,51	4,19	13,00	10,10	2,90	3,19
	3	350,45	358,61	362,50	365,90	366,20	215,70	4,49	2328,57	10,47	2,33	3,44	0,52	0,77	1,48	0,50	4,41	13,44	10,47	2,97	3,15
	4	341,80	349,48	353,37	356,49	356,71	210,10	4,36	2331,36	10,17	2,25	3,39	0,52	0,78	1,53	0,52	4,30	13,33	10,17	3,16	3,46
	vid.							4,36	2336,45	10,19	2,27	3,37	0,52	0,77	1,48	0,50	4,26	13,14	10,19	2,95	3,21
T-3	1	340,24	347,56	350,73	353,42	353,89	210,00	4,01	2364,58	9,49	2,15	3,08	0,54	0,77	1,48	0,45	3,87	12,10	9,49	2,61	3,06
	2	327,28	334,29	337,56	340,50	340,72	202,30	4,11	2364,40	9,71	2,14	3,14	0,52	0,76	1,43	0,48	4,04	12,10	9,71	2,39	2,74
	3	325,81	333,09	336,19	338,98	339,25	201,20	4,13	2360,09	9,74	2,23	3,19	0,54	0,77	1,48	0,45	4,04	12,26	9,74	2,53	2,89
	4	348,22	355,95	359,24	362,41	362,75	214,80	4,17	2353,63	9,82	2,22	3,16	0,53	0,76	1,43	0,46	4,08	12,50	9,82	2,68	3,04
	vid.							4,10	2360,68	9,69	2,19	3,14	0,53	0,77	1,48	0,48	4,01	12,24	9,69	2,55	2,93

5. lentelė. Bandiniai po „gydymo“

Bandinio tipas	Nr.	Išdžiovintas bandinys	Bandinio masė vandenyje				48 val. sveriant vandenyje	Wp(m),%	ρ, kg/m ³	Wp(V),%	W1,%	W2,%	W1(s)	W2(s)	L1	a	W3,%	Pp	Pa	Pu	Ks
			15 min.	1 val.	24 val.	48 val.															
K	1	349,20	354,27	356,68	363,09	363,43	214,50	4,08	2344,73	9,55	1,45	2,14	0,36	0,53	0,77	0,32	3,98	12,84	9,55	3,28	3,82
	2	331,22	336,52	338,66	344,67	345,05	203,20	4,18	2335,00	9,75	1,60	2,25	0,38	0,54	0,79	0,34	4,06	13,20	9,75	3,45	3,93
	3	351,46	356,56	359,03	365,93	366,48	215,50	4,27	2327,86	9,95	1,45	2,15	0,34	0,50	0,71	0,32	4,12	13,46	9,95	3,51	3,92
	4	342,03	346,95	349,31	356,79	356,99	210,10	4,37	2328,48	10,18	1,44	2,13	0,33	0,49	0,69	0,32	4,32	13,44	10,18	3,26	3,55
	vid.							4,22	2334,02	9,86	1,49	2,17	0,35	0,51	0,73	0,32	4,12	13,23	9,86	3,37	3,80
T-3	1	341,49	345,78	347,63	353,60	353,95	210,10	3,65	2373,93	8,66	1,26	1,80	0,34	0,49	0,69	0,31	3,55	11,75	8,66	3,09	3,96
	2	328,58	332,54	334,35	340,46	340,92	202,20	3,76	2368,66	8,90	1,21	1,76	0,32	0,47	0,67	0,39	3,62	11,95	8,90	3,05	3,81
	3	326,81	331,10	333,05	338,91	339,51	201,30	3,89	2364,59	9,19	1,31	1,91	0,34	0,49	0,69	0,31	3,70	12,10	9,19	2,91	3,52
	4	349,11	353,83	356,08	362,48	362,95	214,90	3,96	2358,05	9,35	1,35	2,00	0,34	0,50	0,71	0,32	3,83	12,34	9,35	2,99	3,56
	vid.							3,81	2366,31	9,02	1,28	1,86	0,34	0,49	0,69	0,31	3,67	12,03	9,02	3,01	3,71

