

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Viktor KIZINIEVIČ

**TECHNOLOGINIŲ VEIKSNIŲ POVEIKIS
KERAMINIŲ MŪRO GAMINIŲ
ATSPARUMUI ŠALČIUI**

DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,
MEDŽIAGŲ INŽINERIJA (08T)



LEIDYKLA

Vilnius **TECHNIKA** 2008

Disertacija rengta 2002–2008 metais Vilniaus Gedimino technikos universiteto Termoizoliacijos institute.
Disertacija ginama eksternu.

Darbo mokslinis konsultantas

Dr. Fabijonas Petrikaitis (Vilniaus Gedimino technikos universiteto Termoizoliacijos institutas, technologijos mokslai, medžiagų inžinerija – 08T).

<http://leidykla.vgtu.lt>

VG TU leidyklos TECHNIKA 1542-M mokslo literatūros knyga

ISBN 978-9955-28-351-5

© Kizinievič, V., 2008

© VG TU leidykla TECHNIKA, 2008

Reziუმė

Šiame darbe, naudojant eksperimentų planavimo metodą, išnagrinėtas pagrindinių technologinių veiksnių (molio, liesinančiųjų priedų, išdegančiųjų priedų, atliekinių priedų, sumaišymo trukmės maišyklėje, suspaudimo laipsnio formavimo galvutėje, išretinimo gylio juostinio preso vakuumo kameroje, džiovinimo režimo, išlaikymo aukščiausioje degimo temperatūroje trukmės) poveikis keraminių bandinių fizikinėms-mechaninėms savybėms ir ilgalaikiškumui. Sudarytos regresijos lygtys, pagal kurias, priklausomai nuo technologinių veiksnių, galima prognozuoti keraminių mūro gaminių savybes. Sukurti keraminiai gaminiai iš lengvai lydžių hidrožerutinių Tauragės ir Ukmergės telkinių molių, tinkami naudoti stipriai ardančioje aplinkoje. Įvertintas vienpusio šaldymo–atšildymo metodikos pagal LST 1985:2006, 6 p. tinkamumas keraminių mūro gaminių atsparumo šalčiui nustatymui Lietuvos klimato sąlygomis.

Disertaciją sudaro 6 skyriai, bendrosios išvados ir literatūros sąrašas. Pirmame skyriuje apžvelgta tiriamoji problema, suformuluoti darbo tikslai bei uždaviniai, aprašomas mokslinio darbo naujumas, pristatomi autoriaus pranešimai ir publikacijos, disertacijos struktūra.

Antras skyrius skirtas literatūros apžvalgai.

Trečiame skyriuje aprašyta naudotų žaliavų savybės, žaliavų ir bandinių paruošimas eksperimentams, tyrimų metodikos.

Ketvirtame skyriuje pateikiami technologinių veiksnių poveikio keraminių mūro gaminių fizikinėms ir mechaninėms savybėms bei ultragarso impulso sklidimo greičio keraminiuose bandiniuose tyrimai.

Penktame skyriuje pateikiama keraminių bandinių eksploatacinio atsparumo šalčiui prognozės pagal struktūros ir deformacinius rodiklius, technologinių veiksnių poveikio keraminių mūro gaminių atsparumo šalčiui bei keraminių bandinių makrostruktūros ir mikrostruktūros tyrimai.

Šeštame skyriuje pateikiami atsparumo šalčiui reikšmių palyginamieji tyrimai.

Disertacijos tema paskelbtos 4 mokslinės publikacijos recenzuojamuose periodiniuose mokslo leidiniuose, įtrauktuose į tarptautines duomenų bazes. 7 straipsniai paskelbti kituose mokslo leidiniuose. Disertacijos tema perskaityta 11 pranešimų Lietuvos bei kitų šalių konferencijose.

Abstract

In this work the influence of the main technological factors (clay, non-plastic materials, burning out additive, waste materials, duration of mixing in a mixer, degree of compression in formation heads, level of vacuuming in a vacuum chamber, regimes of drying, duration of keeping at the highest burning temperature) on the physical-mechanical properties and durability of ceramic samples, is analysed applying experimental design. Derived the regression equations to be used to forecast the properties of clay masonry units depending on the technological factors. Ceramic products, manufactured by using fusible hydro-micous clays from Taurage and Ukmerge mines, are suitable to be used in severe exposure environment. Evaluated the suitability of one side freezing-thawing method, implemented in accordance with LST 1985:2006, to estimate the frost resistance of clay masonry units in Lithuanian climatic conditions.

The dissertation is composed of six chapters, general conclusion and literature list. In the first chapter it is review the topicality of the problem, the aim and task of the work are formulated, the novelty of the scientific work is described, the reports and publications of the author and the structure of the dissertation are presented.

The second chapter covers an analysis of existing publications related with problems of the dissertation.

In the third chapter the properties and the preparation of the used materials, the preparation of the samples for the experiments, methodology of the research are described.

In the fourth chapter the research on the influence of technological factors on the physical-mechanical properties of clay masonry units and the velocity of the ultrasonic wave in the ceramic specimens are presented.

In the fifth chapter the research on the prediction of the actual frost resistance according to structural parameters and deformation parameters of the ceramic specimens, the influence of technological factors on the frost resistance of clay masonry units and the macrostructure and microstructure of the ceramic specimens are presented.

In the sixth chapter the research on the comparison of the frost resistance are presented.

The main statements of the dissertation were published in 4 scientific journals, which are abstracted in the international database. 7 articles are published in other scientific publication. The results of dissertation were announced in 11 conferences in Lithuania and abroad.

Terminai ir apibrėžtys [1–5]

1. Molis – polimineralinė nuosėdinė uoliena, su vandeniu sudaranti plastinę masę, kuri džiūdama įgauna tam tikrą stiprį, o po degimo sudaro keraminę šukę.
2. Formavimo masė – plastiškų ir neplastiškų žaliavų komponentų vienalytis mišinys, naudojamas pusgaminiams formuoti.
3. Plastiškas formavimas – reikalingas formos ir matmenų suteikimas 15–35 % drėgnio formavimo masei, rankomis, žiedimo, ekstruzijos ar kt. būdu.
4. Keraminė šukė – bet kokios formos išdegta keraminė formavimo masė.
5. Pusgaminis – iš paruoštos formavimo masės suformuotas bet neišdegtas gaminy.
6. Mūro gaminy – suformuotas komponentas, numatytas naudoti mūro konstrukcijoms.
7. Keraminis mūro gaminy – mūro gaminy, kuris pagamintas iš molio arba kitų medžiagų su smėliu, kuru bei kitais priedais arba be jų ir išdegtas pakankamai aukštoje temperatūroje, kad susidarytų keraminis ryšys.
8. HD gaminy – keraminis mūro gaminy, skirtas panaudoti neapsaugotame mūre, taip pat didelio tariamojo (bruto) sausojo tankio keraminis mūro gaminy, skirtas naudoti apsaugotame mūre.
9. Keraminis mūro gaminy stipriai ardančioje aplinkoje – mūras arba jo elementai, kurie panaudojimo sąlygomis dėl klimatinų sąlygų poveikio įmirksta (ilgalaikis lietus, gruntinis vanduo) ir veikiami šaldymo ir atitirpinimo kaitos, bet nėra veiksmingai apsaugoti.
10. Keraminis mūro gaminy vidutiniškai ardančioje aplinkoje – mūras arba mūro elementas, kurie panaudojimo sąlygomis yra veikiamas drėgmės ir šaldymo ir atitirpinimo kaitos, bet nepriskiriami statiniams stipriai ardančioje aplinkoje.
11. Keraminis mūro gaminy neardančioje aplinkoje – mūras arba mūro elementai, kuriuos panaudojimo sąlygomis neveikia drėgmės bei šaldymo ir atitirpinimo kaita.
12. Atsparumas šalčiui – įdrėkusios medžiagos gebėjimas atlaikyti daugkartinius užšaldymo ir atšildymo ciklus be esminio savybių pablogėjimo.
13. Neto sausasis tankis – išdžiovinto iki pastovios masės gaminio masės ir neto tūrio santykis.
14. Neto tūris – gaminio tariamasis (bruto) tūris, atmetus bet kokių skylių ar tuštymių, kurias nenumatoma užpildyti skiediniu, tūrį.

15. Liesiklis – formavimo masės komponentas, mažinantis formavimo masės plastiškumą, džiūstamąjį ir degamąjį susitraukimą.
16. Skaldelė – susmulkintų keraminių gaminių grūdeliai, naudojami formavimo masei liesinti ar turi kitą paskirtį.
17. Išdegantysis priedas – formavimo masės komponentas, kuriam išdegus keraminėje šukėje lieka poros.
18. Fliusas – žaliavoje esanti medžiaga arba formavimo mišinio priedas, žeminantis keraminės šukės susidarymo temperatūrą ir lydalo kiekį.
19. Formavimo galvutė – juostinio preso dalis, kurioje suformuojama reikalingos formos ir matmenų molio juosta.
20. Sluoksninis lupimasis – didėjantys keraminės šukės nuostoliai, apėmę didesniąją arba visą gaminio storio dalį.
21. Sluoksniavimasis – plokštelinis lupimasis, dėl kurio šukė gali suskilti į lygiagrečių plokštelių sluoksnius.
22. Žvyninis atskilinėjimas – paviršiaus iškilimas, prasidedantis atskilimas arba įtrūkis, kurie sukelia pažaidą.

Turinys

Reziumė.....	iii
Abstract.....	iv
Terminai ir apibrėžtys.....	v
1. Įvadas.....	1
1.1. Mokslinė problema.....	1
1.2. Darbo tikslas.....	2
1.3. Darbo uždaviniai	2
1.4. Mokslinis darbo naujumas.....	3
1.5. Praktinė darbo vertė	3
1.6. Ginamieji teiginiai.....	4
1.7. Darbo rezultatų aprobavimas.....	5
1.8. Disertacijos struktūra.....	6
2. Literatūros analizė.....	7
2.1. Technologinių veiksnių poveikis keraminių mūro gaminių savybėms	9
2.2. Keraminių mūro gaminių atsparumo šalčiui nustatymo būdai.....	19
2.3. Antrojo skyriaus išvados	23
3. Tyrimo metodikos ir žaliavos	25
3.1. Naudotos žaliavos	25
3.2. Žaliavų paruošimas ir bandinių formavimas	28
3.3. Tyrimų metodika	31
3.4. Formavimo masių sudėtys ir eksperimentų planas.....	35

4. Technologinių veiksnių poveikio keraminių mūro gaminių fizikinėms ir mechaninėms savybėms tyrimai.....	43
4.1. Keraminių bandinių, išdegtų 1 000 °C temperatūroje, tyrimai	43
4.2. Keraminių bandinių, išdegtų 1 070 °C temperatūroje, tyrimai	54
4.3. Ultragarso impulso sklaidimo greičio keraminiuose bandiniuose tyrimai.	65
4.4. Ketvirtąjo skyriaus išvados	68
5. Technologinių veiksnių poveikio keraminių mūro gaminių atsparumo šalčiui tyrimai.....	70
5.1. Keraminių bandinių eksploatacinio atsparumo šalčiui prognozė pagal struktūros rodiklius.....	70
5.2. Keraminių bandinių eksploatacinio atsparumo šalčiui prognozė pagal deformacinius rodiklius	75
5.3. Keraminių bandinių atsparumo šalčiui tyrimai tūrinio ir vienpusio šaldymo–atšildymo būdais	78
5.3.1. Keraminių bandinių, išdegtų 1 000 °C temperatūroje, tyrimai	78
5.3.2. Keraminių bandinių, išdegtų 1 070 °C temperatūroje, tyrimai	88
5.4. Keraminių bandinių struktūros tyrimai ir gautų rezultatų analizė.....	101
5.5. Rentgenografiniai keraminių šukių tyrimai.....	111
5.6. Keraminių mūro gaminių gamybos parametrų parinkimas	113
5.7. Penktojo skyriaus išvados	116
6. Atsparumo šalčiui rezultatų statistinis įvertinimas	118
6.1. Atsparumo šalčiui reikšmių palyginamieji tyrimai	118
6.2. Šeštojo skyriaus išvados.....	125
7. Bendrosios išvados.....	127
Literatūros sąrašas	129
Autoriaus publikacijų sąrašas disertacijos tema	138

Ivadas

1.1. Mokslinė problema

Per pastaruosius metus, sparčiai plečiantis statyboms, padidėjo ir statybinių medžiagų poreikis bei joms keliami reikalavimai. Ypač rūpinamasi gaminių įvairove, asortimentu, ieškoma naujų formų ir spalvų. Vis daugiau reikia termoizoliacinės, apdailos, grindinio (klinkerinės) keramikos, keraminių plytelių ir čerpių. Lietuvos keraminių gaminių gamintojų produkcija dažnai būna struktūriškai nevienalytė, jos žemesni kokybiniai rodikliai nei iš užsienio importuojamos produkcijos. Gamyklose dirbama su pasenusia įranga, nekompleksiškai sprendžiami gamybos technologijos tobulinimo klausimai. Paprastai renovuojama kokia nors viena technologinės linijos dalis, kurios poveikis keraminių gaminių kokybei nėra labai reikšmingas.

Lietuvoje negaminami atsparūs šalčiui keraminiai gaminiai pastatų fasadams ir stogo dangoms iš vietinių žaliavų. Pertvarkant statybinių keraminių dirbinių pramonės įmones, rūpinamasi atitvarų šiluminės varžos didinimu, tačiau per menkai atsižvelgiama į keraminių fasadų ilgalaikiškumo problemas. Norint pagaminti aukštos kokybės keraminius gaminius, pasižyminčius dideliu atsparumu šalčiui ir tinkamus naudoti stipriai ardančioje aplinkoje, pirmiausia būtina nustatyti pagrindinius technologinius veiksnius, turinčius didžiausią

poveikį gaminių atsparumui šalčiui ir mechaninėms bei fizikinėms savybėms. Pertvarkant ir rekonstruojant likusias perspektyvias keramikos gamyklas, reikia ne tik modernizuoti degimo bei džiovinimo agregatus, bet ir žaliavų apdorojimo ir formavimo įrenginius, nuo kurių labai priklauso gaminių kokybė. Labai svarbu, kad šalčiui atspari produkcija būtų gaminama iš vietinių žaliavų.

Pagal šiuo metu galiojantį nacionalinį standartą LST 1985:2006 ir techninę specifikaciją LST CEN/TS 772-22, kol bus priimtas galutinis sprendimas dėl jos pakeitimo į Europos standartą, pasikeitė atsparumo šalčiui nustatymo vienpusio šaldymo–atšildymo būdu metodika. Siekiant objektyviai vertinti keraminių mūro gaminių ilgalaikiškumą Lietuvos klimato sąlygomis, būtina sulygtinti atsparumą šalčiui, nustatytą vienpusio šaldymo–atšildymo būdu pagal LST 1985:2006, 6 p. metodiką su atsparumu šalčiui, nustatytu vienpusio šaldymo–atšildymo būdu pagal seniau galiojusią LST 1272-92, 3.8.3 p. metodiką, kurios tinkamumas nustatyti atsparumą šalčiui, keraminių gaminių eksploatuojamų Lietuvos klimato sąlygomis, buvo patvirtintas natūriniais bandymais.

1.2. Darbo tikslas

Ištirti formavimo mišinių ir svarbiausių technologinių veiksnių poveikį keraminių mūro gaminių atsparumo šalčiui bei kitoms fizikinėms ir mechaninėms savybėms, iš vietinių žaliavų sukurti keraminius gaminius, tinkamus naudoti stipriai ardančioje aplinkoje. Įvertinti atsparumo šalčiui, nustatyto vienpusio šaldymo–atšildymo būdu pagal LST 1985:2006, 6 p. metodiką ryšį su atsparumu šalčiui, nustatytu vienpusio šaldymo–atšildymo būdu pagal LST 1272-92, 3.8.3. p. metodiką ir jos tinkamumą vertinti atsparumą šalčiui Lietuvos klimato sąlygomis.

1.3. Darbo uždaviniai

3. Parinkti formavimo mišinio iš naudojamų žaliavų (vietiniai moliai, liesinantieji, išdegantieji ir atliekiniai priedai) sudėčių kitimo ribas ir technologinių įrenginių (maišyklė, juostinis vakuuminis presas, elektrinė krosnis) darbo režimo parametrus. Pagal sudarytus eksperimentų planus laboratorinėmis ir artimomis gamybinėms sąlygomis pagaminti keraminius bandinius.
4. Nustatyti pagamintų bandinių fizikines ir mechanines savybes, struktūrinius rodiklius bei atsparumą šalčiui pagal galiojančius normatyvinius

dokumentus ir naudojamas metodikas. Panaudojus sparčiuosius atsparumo šalčiui nustatymo metodus prognozuoti keraminių bandinių atsparumą šalčiui.

5. Ištirti pasirinktų keraminių mūro gaminių gamybos technologinių veiksnių reikšmingumą, reikšminių technologinių veiksnių poveikį nustatytoms keraminių bandinių savybėms ir jų tarpusavio sąveiką. Sudaryti regresijos lygtis, pagal kurias, priklausomai nuo technologinių veiksnių, galima prognozuoti keraminių mūro gaminių savybes.
6. Nustatyti galimybes gaminti keraminius mūro gaminius, tinkamus naudoti stipriai ardančioje aplinkoje, iš vietinių, lengvai lydžių hidrožerutinių molių.
7. Įvertinti sukurtų keraminių bandinių atsparumą šalčiui, atsižvelgiant į keraminių bandinių struktūrą.
8. Įvertinti ryšį tarp atsparumo šalčiui, nustatyto vienpusio šaldymo–atšildymo būdu pagal LST 1985:2006, 6 p. metodiką, su atsparumu šalčiui, nustatytu vienpusio šaldymo–atšildymo būdu pagal LST 1272-92, 3.8.3 p. metodiką.
9. Įvertinti vienpusio šaldymo–atšildymo metodikos pagal LST 1985:2006, 6 p. tinkamumą nustatant keraminių mūro gaminių atsparumą šalčiui Lietuvos klimato sąlygomis.

1.4. Mokslinis darbo naujumas

1. Eksperimentiškai nustatyti technologinių veiksnių lygiai, lemiantys keraminių gaminių, tinkamų naudoti stipriai ardančioje aplinkoje, atsparumą šalčiui ir kitas fizikines bei mechanines savybes.
2. Sudarytos daugiakriterinės regresijos lygtys, kurias naudojant galima įvertinti technologinių veiksnių poveikį keraminių mūro gaminių, pagamintų iš vietinių žaliavų (Tauragės ir Ukmergės telkinių molių) fizikinėms ir mechaninėms savybėms bei atsparumui šalčiui.
3. Pirmą kartą nustatytas ryšys ir gautas sąryšis tarp atsparumo šalčiui reikšmių, nustatytų vienpusio šaldymo–atšildymo būdu pagal LST 1985:2006, 6 p. metodiką ir pagal LST 1272-92, 3.8.3 p. metodiką.

1.5. Praktinė darbo vertė

Gautus tyrimų duomenis galima panaudoti taip parenkant keraminių mūro gaminių sudėtis ir reguliuojant technologinį gamybos procesą, kad būtų gaminami keraminiai mūro gaminiai tinkami naudoti stipriai ardančioje

aplinkoje ir būtų nustatytos silpniausios technologinio proceso vietos, kurias būtina pertvarkyti siekiant gaminti ilgalaikiškus keraminius mūro gaminius.

Iš Tauragės ir Ukmergės telkinių molių, sukurti keraminiai gaminiai tinkami naudoti stipriai ardančioje aplinkoje.

Įvertinus atsparumo šalčiui, nustatyto vienpusiu būdu pagal LST 1985:2006, 6 p. metodiką, ryšį su atsparumu šalčiui, nustatytu vienpusiu būdu pagal LST 1272-92, 3.8.3 p. metodiką, pagilintos teorinės ir praktinės keraminių mūro gaminių atsparumo šalčiui nustatymo Lietuvos klimato sąlygomis žinios ir numatyti tolesni tyrimai.

1.6. Ginamieji teiginiai

1. Parinkus keraminių mūro gaminių, pagamintų iš Tauragės ir Ukmergės telkinių molių, gamybos technologinius veiksnus ir jų kitimo lygius, galima pagaminti HD (pagal LST EN 771-1+A1) keraminius mūro gaminius.
2. Keraminės šukės, pagamintos iš Tauragės ir Ukmergės telkinių molių, struktūros tolygumas, susidariusių porų kiekis ir dydis lemia keraminių mūro gaminių atsparumo šalčiui reikšmes.
3. Pagal keraminių mūro gaminių gamybos technologinius veiksnus (formavimo mišinio sudėtį – molio, liesinančiųjų, išdegančiųjų bei atliekinių priedų kiekius, jo paruošimo ir sumaišymo trukmę, išretinimo gylių preso vakuumo kameroje, suspaudimo laipsnį formavimo galvutėje ir degimo parametrus), naudojant daugiakriterines eksperimentines regresijos lygtis, galima prognozuoti keraminių mūro gaminių, pagamintų iš Tauragės ir Ukmergės telkinių molių, fizikines ir mechanines savybes bei atsparumą šalčiui.
4. Sudaryta regresijos lygtis, įvertinanti ryšį tarp atsparumo šalčiui reikšmių, nustatytų vienpusio šaldymo–atšildymo būdu pagal LST 1985:2006, 6 p. metodiką ir LST 1272-92, 3.8.3 p. metodiką. Pagal LST 1985:2006 reikalavimus, aukščiausiai atsparumo šalčiui klasei (F.2), nustatyta 100 ciklų reikšmė nepakankama vertinti keraminių mūro gaminių, skirtų naudoti stipriai ardančioje aplinkoje ilgalaikiškumą Lietuvos klimato sąlygomis.

1.7. Darbo rezultatų apibavimas

Disertacijos tema paskelbtos 4 mokslinės publikacijos recenzuojamuose periodiniuose mokslo leidiniuose, įtrauktuose į tarptautines duomenų bases. 7 straipsniai paskelbti kituose mokslo leidiniuose. Disertacijoje teikiama medžiaga buvo paskelbta 5 tarptautinėse ir 6 respublikinėse konferencijose:

1. Influence of Some Technological Factors on the Physical-Mechanical Properties of Clay Masonry Units from Fusible Hydrous-Mica Clays, *International Conference Mechatronic Systems and Materials, held of October 20–23, 2005, Vilnius.*
2. Influence of Technological Factors on the Structural Parameters of Clay Masonry Units, *14th International Baltic Conference Materials Engineering 2005, held of October 6–7, 2005, Kaunas.*
3. Influence of Technological Factors on the Frost Resistance of Clay Masonry Units, *2nd Baltic Conference on Silicate Materials, held of May 13–14, 2005 Kaunas.*
4. Technologinių veiksnių įtaka keraminių mūro gaminių atsparumui šalčiui, *8-oji Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencija „Lietuva be mokslo – Lietuva be ateities“, 2005 m. kovo 24 d., Vilnius.*
5. Оптимизация производства изделий строительной керамики с применением метода планирования эксперимента, *Международная научно-практическая конференция "Научный потенциал мира – 2004", 1–15 Ноября 2004, Днепрпетровск.*
6. Technologinių veiksnių įtaka keraminių mūro gaminių fizikinėms-mechaninėms savybėms, *Respublikinė konferencija „Medžiagų inžinerija 2004“, 2004 m. lapkričio 12 d., Kaunas.*
7. Technologinių veiksnių įtaka keraminių mūro gaminių fizikinėms-mechaninėms savybėms, *Konferencija „Silikatų technologija“, 2004 m. balandžio 22 d., Kaunas.*
8. Dependence of Fusible Hydro-micous Clay Building Ceramics Properties on Additives, *The 8th International Conference on Modern Building Materials, Structures and Techniques, held of May 19–21, 2004, Vilnius.*
9. Lietuvoje naudojamų keraminių čerpių fizikinių-mechaninių bei atsparumo šalčiui savybių tyrimai, *7-oji Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencija „Lietuva be mokslo – Lietuva be ateities“, 2004 m. kovo 26 d., Vilnius.*
10. Statybinės keramikos vystymosi perspektyvos, *6-oji Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencija „Lietuva be mokslo – Lietuva be ateities“, 2003 m. kovo 26 d., Vilnius.*

11. Keraminės šukės kai kurių fizikinių-mechaninių savybių priklausomybė nuo išdegančių priedų, *Tarptautinė konferencija „Silikatų technologija“ 2003 m. balandžio 22 d., Kaunas.*

1.8. Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro 6 skyriai, bendrosios išvados, naudotos literatūros sąrašas, publikacijų sąrašas. Darbo apimtis – 150 puslapių, kuriuose pateikti 56 paveikslai, 30 lentelių ir 129 literatūros šaltiniai.

Literatūros analizė

Šiuo metu Lietuvoje keraminius mūro gaminius gamina AB „Palemono keramika“, AB „Rokų keramika“, AB „Švenčionėlių keramika“, UAB „Tauragės keramika“, AB „Alytaus keramika“ ir „vienadienės“ smulkios įmonės [6].

Statybinė keramika dažniausiai gaminama dviem būdais: plastinio formavimo ir pussausio presavimo. Lietuvoje visi keraminiai mūro gaminiai gaminami plastinio formavimo būdu. Pussausio presavimo gamybos būdas leidžia taupyti gamybos plotus, darbo jėgą, energetines sąnaudas, o gaminamos produkcijos kokybiniai rodikliai nenusileidžia pagamintiems plastinio formavimo būdu, tačiau jam įdiegti reikia panaudoti beveik 3 kartus daugiau lėšų [7, 8].

Nuo 2006-04-01 iki tol galiojusius Lietuvos standartus LST 1270-92 *Keraminiai blokai. Techninės sąlygos* ir LST 1272-92 *Keraminės plytos. Techninės sąlygos* pakeičia darnusis mūro gaminių Europos standartas LST EN 771-1+A1 *Mūro gaminių techniniai reikalavimai. 1 dalis. Keraminiai mūro gaminiai*, parengtas pagal Europos komisijos ir Europos laisvosios prekybos asociacijos įgaliojimą, suteiktą CEN, ir atitinka esminius Europos Sąjungos statybos gaminių direktyvos (89/106/EEC) reikalavimus (mechaninis atsparumas ir patvarumas, sauga gaisro atveju, higiena, sveikata ir aplinka, sauga naudojimo metu, apsauga nuo triukšmo, energijos taupymas bei šilumos saugojimas). Naujas standartas skiriasi nuo iki tol naudotų standartų.

Gamintojas neprivalo klasifikuoti gaminamos produkcijos (pagal paskirtį: sienų apdailos ir sienų paprastosios, išorės sienų konstrukciniams elementams mūryti, dūmtraukių; pagal markę; pagal mechaninį stiprį: nuo M25 iki M300; pagal tankį: apdailos ir paprastosios plytos skirstomos į lengvasias ir sunkiausias; pagal atsparumą šalčiui: nuo 15 iki 100 ir daugiau markės, apdailos plytos I, II ir III kategorijos), jis deklaruos gaminamos produkcijos charakteristikas, remdamasis gamybos kokybės sistema [9–12].

Naujas standartas taikomas dviem grupėms išdegto molio gaminių (keraminių mūro gaminių): LD gaminių, kurių tariamasis (bruto) sausasis tankis $\leq 1000 \text{ kg/m}^3$, naudojamų apsaugotame mūre, ir HD gaminių, kurių bruto sausasis tankis $> 1000 \text{ kg/m}^3$, naudojamų apsaugotame mūre, ir keraminių mūro gaminių, naudojamų neapsaugotame mūre. Apdailos ir paprastosios plytos vertinamos vienodai, išskyrus atsparumą šalčiui. Taip pat gamintojas privalo tiksliai deklaruoti gaminamojo gaminio savybes. Produkcija skirstoma pagal kategorijas: I kategorijos mūro gaminiai – deklaruojamojo gniuždomojo stiprio mūro gaminiai, kurių tikėtumas, kad suirs, pasiekę tą stiprį, neviršys 5 %, ir II kategorijos mūro gaminiai, kurie nepasiekia I kategorijos pasikliautinumo lygmens. Šis standartas nenustato keraminių mūro gaminių standartinių dydžių, gaminio matmenų, kampų ir spindulių charakteristikų. Naujame standarte kai kurios charakteristikos vertinamos kaip pagrindinės, pvz., matmenys, gniuždomasis stipris ir t. t., kitos yra kaip papildomos, priklausančios nuo panaudojimo paskirties, pvz., šilumos laidumas.

Atsižvelgiant į esminius pokyčius rinkoje, Lietuvos keraminių mūro gaminių gamintojai turėtų [13]: plėsti fasadų apdailos keraminių gaminių nomenklatūrą, didinti termoizoliacinių porizuotųjų, tuštymėtųjų stambiųjų blokų gamybą mikrokarkasinėms ištisinio mūro sienoms mūryti. Siekiant neprarasti rinkos, keraminių mūro gaminių kokybiniai ir eksploataciniai rodikliai turi būti pakankamai aukšti, spalvų bei gaminių asortimentas platus, o gaminama produkcija pigi. Dirbant su techniškai pasenusia įranga, tai yra be galo sunku, o kartais visiškai neįmanoma. Lengviausias, bet brangiausias kelias – įsigyti visiškai naujos kartos keraminių mūro gaminių gamybos technologines linijas, kurių kaina siekia dešimtis milijonų litų. Tačiau be valstybės paramos keraminių gaminių gamyklos to negali padaryti, o investuotojams toks sprendimas nėra patrauklus dėl ilgo investicijų atsiperkamumo laiko. Nagrinėdami tolesnę galimą keraminių mūro gaminių pramonės raidą, galime teigti, kad keraminių mūro gaminių poreikį Lietuvoje galėtų užtikrinti viena pilnu pajėgumu dirbanti gamykla. Kita išeitis būtų pamažu modernizuoti veikiančias technologines linijas, pradedant nuo silpniausių vietų. Jų reikšmingumą dar reikia įvertinti, nes šia tema atlikta gana mažai darbų.

2.1. Technologinių veiksnių poveikis keraminių mūro gaminių savybėms

Statybinės keramikos gamybos technologija susideda iš keturių pagrindinių procesų: žaliavų paruošimo (džiovinimo, smulkinimo, frakcionavimo, maišymo), formavimo, džiovinimo ir degimo. Svarbiausias yra degimo procesas, o pirmieji trys procesai – paruošiamieji. Degimo procesas lemia įvairias keraminio gaminio savybes (gniuždomąjį stiprį, tankį, vandens įmirkį, cheminį atsparumą ir kt.), nes jo metu degamame gaminyje vyksta daug fizikinių ir cheminių pokyčių. Tačiau, pasirinkus reikiamus degimo režimus, kiti technologiniai veiksniai taip pat smarkiai veikia gaminių kokybinius rodiklius.

Šiuolaikiniai statybos techniniai reglamentai pastatų šiluminėms savybėms nustato padidintus reikalavimus mūro gaminiams. Termoizoliacinių keraminių mūro gaminių (pagal LST EN 771-1 LD gaminys – mažo tariamojo (bruto) tankio ($\leq 1\,000\text{ kg/m}^3$) keraminis mūro gaminys, skirtas naudoti apsaugotame mūre) gamybos technologija nuo įprastinių keraminių mūro gaminių skiriasi tuo, kad pagamintas produktas turi būti reikiamo porėtumo ir tuštymėtumo. Tai pasiekama mažinant keraminių gaminių tankį, didinant tuštymių kiekį, parenkant geriausią tuštymių išdėstymą, keičiant keraminės šukės struktūrą, naudojant įvairius organinius išdegančiuosius priedus (medienos ir popieriaus atliekas, anglis, putų polistirolu granules ir kt.) bei metalizuojant plonu monomolekuliniu metalo sluoksniu keraminių blokų pertvaras. Atlikta daug darbų, siekiant pagaminti keraminius gaminius su mažiausiu šilumos laidumo koeficientu [14–17]. Darbe [18] tyrinėtas išdegančiųjų priedų (putų polistirolu, popieriaus, perlito ir silicingos žemės) poveikis keraminių gaminių savybėms ir gauti įdomūs rezultatai. Panaudotos silicingos žemės 10 kg/dm^3 priedas sumažino keraminės šukės tankį ir padidino gniuždomąjį stiprį net 10 MPa . Daugeliu atveju mažinant tankį mažėja ir mechaninės gaminių savybės.

Autoriai [19] sukūrė būdą akytajai keramikai iš vietinių žaliavų gaminti. Gauta akytosios struktūros keramika, kurios tankis gali kisti nuo 300 kg/m^3 iki $1\,000\text{ kg/m}^3$, o gniuždomasis stipris – iki 20 MPa . Akytajai struktūrai sudaryti buvo dedami PAM ir išdegančiųjų medžiagų priedai. Taip pat ištirta galimybė panaudoti įvairius natūralios drėgmės sapropelius kaip išdegančiuosius priedus. Jų atsargos didelės, o sunaudojimas yra labai mažas.

Nagrinėjant organinių išdegančiųjų priedų poveikį keraminių mūro gaminių savybėms, dažnai susiduriama su gaminio viduje susidariusia „juoda šerdimi“. A. Sadūnas nustatė [20], kad išdegantieji priedai labai padidina atsparumą šalčiui. Degimui vykstant redukciniėje dujų terpėje, o paskui oksidaciniėje,

keraminio kūno formavimosi reakcijos gerokai intensyvesnės, bandiniai sukepa geriau ir todėl jų atsparumas šalčiui gali padidėti 2 ir daugiau kartų. Kitas autorius [21] teigia, kad tokia susidariusi gaminių struktūra neigiamai veikia gaminių eksploatacines savybes. Dažniausiai „juoda šerdis“ nėra pageidaujama, o jos atsiradimo priežastis – netinkamai parinktas degimo režimas.

Liesinančiųjų priedų poveikis gana plačiai išnagrinėtas mokslinėje literatūroje. Autorius [20] nustatė, kad geriausia granulimetrinė molio ir smėlio mišinio sudėtis gali būti tokia: molingosios (21–34) %, dulkingosios (46–67) %, smėlingosios (10–23) % frakcijos. Tokios sudėties bandinių atsparumas šalčiui gali būti 2 200 vienpusio šaldymo–atšildymo ciklą.

Autoriai [22] nagrinėjo (0–20) % ir (1–0,5) mm smėlio frakcijos poveikį keraminių plytų savybėms. Nustatytas geriausias šios smėlio frakcijos kiekis yra 10 %. Smėlio ir cemento dulkių poveikis keraminių gaminių savybėms išsamiai nagrinėjamas [23] darbe. Nustatyta, kad didesnis kaip 20 % smėlio kiekis neigiamai veikia keraminių gaminių džiūstamąjį ir degamąjį susitraukimą, gniuždomąjį stiprį, tankį. 5 % cemento priedas ir 20 % smėlio kompozicija parodė nedidelį, tačiau teigiamą poveikį. Darbe [24] buvo nagrinėjama skirtingos frakcinės sudėties smėlio iki 30 % kiekio poveikis keraminių gaminių savybėms. Nustatyta, kad, naudojant formavimo masėse iki 30 % smėlio, geriausias yra (1–0,5) mm frakcijos smėlis. Autoriai [25] nurodo, kad keraminių apdailos plytų gamybai geriausia sudėtis – kai (0,63–0,315) mm ir (0,315–0,14) mm suminis smėlio frakcijų kiekis ne mažesnis kaip (80–85) %. Tyrėjai [26–28] nagrinėjo liesinančiųjų priedų kiekio bei frakcinės sudėties, degimo temperatūros kėlimo ir aušinimo greičio bei aukščiausios degimo temperatūros poveikį gniuždomajam stipriui. Nustatyta, kad degimo procesas veikia naujai susidariusių fazių kristalų dydžius. Kristalų didėjimas nuo (5–15) μm iki (40–50) μm lemia gniuždomojo stiprio sumažėjimą. Norint didinti gniuždomąjį stiprį, būtina parinkti geriausią smėlio frakcinę sudėtį, kelti aukščiausią degimo temperatūrą ir, atsižvelgiant į degimo greitį, parinkti aušinimo greitį. Darbe [29] tyrinėtas skirtingų frakcijų skaldelės ir malto lauko špato poveikis ekstruzijos būdu pagamintoms keraminėms plytelėms. Gautos išvados, kad, atsižvelgiant į naudotų medžiagų granulimetrinę sudėtį, keičiasi formavimo mišinio vandens poreikis, plastiškumas, o tai, labai veikia džiovinimo režimo energetines sąnaudas.

Matyti, kad nėra vienos nuomonės dėl geriausios liesiklio sudėties, nes minėtieji autoriai naudojo skirtingų vietovių molius, kurių buvo skirtinga granulimetrinė ir mineralinė sudėtis, bei džiovinimo, degimo ir kiti parametrai.

Dažnai į formavimo mišinį dedamos kalkės ir dolomitas, nes jie didina karbonatinių junginių kiekius. Šie leidžia reguliuoti tam tikras technologines

(molio juostos kietumą, dozuojamojo vandens kiekį, pusgaminių lenkiamąjį stiprį, džiovinimo jautrumą, degamąjį susitraukimą, sukepimo intervalą ir kt.) ir kokybines gaminių savybes (spalvą, uždarąjį porėtumą, tankį, lenkiamąjį ir gniuždomąjį stiprį, elastingumo modulį, atsparumą šalčiui, įmirkį ir kt.). Darbe [30] pabrėžiama, kad būtina atsižvelgti į gamyboje naudojamų žaliavų charakteristikas ir technologinių parametų poveikį, nes karbonatinių junginių poveikis įvairiems moliams, atsižvelgiant į jų kiekį ir karbonatinių interų dydį, gali būti skirtingas. Autorius [31] nustatė, kad karbonatiniai priedai (iki 5 %) didina gaminių atsparumą šalčiui tik tada, kai jie smulkiai sumalti, t. y. priedo dalelės yra mažesnės nei 0,063 mm. Nustatyta [32], kad dolomito kiekį galima didinti net iki 80 %. Tokie gaminiai turi būti gaminami pussausio presavimo būdu ir išdegami (200–250) °C žemesnėje nei įprastinės keraminės plytos temperatūroje, be to, hidratacijos metu po degimo pastebimas gaminių mechaninių savybių didėjimas.

Darbo [33] autoriai nagrinėjo smulkiadispersės stiklo atliekos poveikį dviejų lengvai lydžių hidrožerutinių molių sukepimui. Į formavimo mases buvo dedamas 10 %, 20 % ir 50 % smulkiadispersio stiklo priedo kiekis. Nustatyta, kad stiklo priedas, naudojant vienos rūšies molį, praplėtė sukepimo intervalą nuo 75 °C iki 200 °C temperatūros ir sumažino bandinių lydymosi pradžios temperatūrą 60 °C. Naudojant kitą molį, sukepimo intervalas buvo praplėstas nuo 50 °C iki 100 °C temperatūros ir lydymosi pradžios temperatūra sumažinta 40 °C. Autoriai [34] nustatė, kad smulkinto stiklo priedas (frakcija < 0,5 mm) gerina keraminės šukės sukepimo parametrus: sukepimo pradžia persistumia į žemesnių temperatūrų sritį, padidėja sukepimo temperatūros intervalas ir gaminių mechaninės savybės (~30 %).

Siekiant gaminti sukepusiąją keramiką iš Lietuvos lengvai lydžių molių, atlikta nemažai mokslinių tyrimų, kuriuose įrodytas tokių molių tinkamumas, koreguojant jų sudėtį sukepusiosios keramikos gamybai. Darbuose [35, 36] nustatyta, kad sukepusiosios keramikos gamybai geriausias vietinių molių (Ukmergės ir Rokų) santykis yra 4:1, degimo temperatūra – 1 070 °C, o išlaikymo joje trukmė (4–8) h. Sukepusioji keramika taip pat gali būti gaminama naudojant 20 % naftos pramonės atliekos priedą (naudotą katalizatorių) [36, 37]. Siekiant pagaminti sukepusiąją keramiką naudojant formavimo masėse (15–30) % technogeninių atliekų, turinčių 20 % Al_2O_3 , buvo gauti puikūs rezultatai: įmirkis – $\leq 4\%$, gniuždomasis stipris – (61,5–80,7) MPa [38]. Tačiau minėtųjų formavimo mišinio sudėčių pusgaminiai turi būti degami pakankamai aukštose degimo temperatūrose nepriekaištingai dirbančiose krosnyse.

Keraminių gaminių ilgalaikiškumą teigiamai veikia natrio silikato 2 % priedas [39]. Jis padidina gaminių gniuždomąjį stiprį, sumažina vandens įmirkio ir įsotinimo koeficiento reikšmes, tai lemia didesnę ilgalaikiškumą.

Darbuose [40, 41] tirtas glaukonito poveikis keraminių šukių savybėms ir nustatyta, kad jis pagreitina keramines šukės susidarymo procesus. Naudojant iki 20 % šio priedo, sumažinama degimo temperatūra, padidėja lenkiamasis stipris, gaunamos keraminės šukės su vandens įmirkio $< 5\%$. Autoriai [42] įvertino galimybes iš žaliavų, turinčių glaukonito, gaminti sienines medžiagas ir nustatė, kad iki 20 % glaukonitinio smėlio priedas yra geriausias. Jis mažina gaminių džiūstamąjį susitraukimą, formavimo mišinio drėgnį ir plastiškumą, o džiovinimo parametrams reikšmingo poveikio neturi.

Gaminių ilgalaikiškumą galima didinti hidrofobizuojant juos silikonais. Išdegti keraminiai gaminiai (apdailos plytos, čerpės) laistomi arba įmerkami į hidrofobizatoriaus talpyklą. Atlikta daug darbų [43, 44], kuriuose parodyta, kad hidrofobizuojančios medžiagos padarė, priešingai nei buvo tikėtasi, neigiamą poveikį gaminių eksploatacinėms savybėms dėl pasunkėjusios drėgmės migracijos iš gaminių į išorę. Keraminių gaminių impregnavimas silicio organiniais junginiais [45] veikia teigiamai. Nurodoma, kad šie junginiai apsaugo gaminius nuo drėgmės, tačiau vandens garų pralaidumas išlieka didelis ir neapsunkina drėgmės migracinių procesų.

Kita įvairių priedų panaudojimo keraminių mūro gaminių gamyboje kryptis – technogeninių medžiagų utilizavimas. Šiuo atveju didesnis dėmesys skiriamas ne kokybiniais rodikliais, o geriausiai atliekinio priedo kiekiui nustatyti gaminant produktą, atitinkantį kokybinius, ekologinius ir eksploatacinius reikalavimus. Darbe [46] nustatyta, kad keraminių gaminių produkcijoje galima utilizuoti atliekas, turinčias sunkiųjų metalų, kadangi degimo metu dėl vystančių intensyvių procesų jie surišami ir neišsiplauna. Darbe [47] nagrinėtos naftos, popieriaus ir elektrinės jėgainės pramoninės atliekos. Kaip ir daugumoje publikacijų pažymima, kad ekologiniu požiūriu jas galima utilizuoti, tačiau, vertinant kokybiniu požiūriu, gaminių savybės didinant atliekų kiekį blogėja, palyginti su gaminiais be atliekų.

Gaminant keraminius mūro gaminius, svarbu gauti homogenišką formavimo masę. Darbuose [48, 49] nurodoma, kad, atsižvelgiant į naudojamų žaliavų savybes, formavimo mišinio homogeniškumui yra svarbios šios maišyklių charakteristikos: maišyklės forma, maišymo sraigtų geometriniai parametrai, maišymo intensyvumas ir laikas. Autorius [31] nustatė, kad tuštymėtųjų gaminių įtrūkų atsiranda dėl nepakankamo formavimo mišinio vienalytiškumo. Liesiklio pasiskirstymo netolygumas pusgaminiuose arba atskirose jo tūrio dalelėse negali būti didesnis kaip 2 %.

Nuo formavimo mišinio homogeniškumo priklauso tolesnių gamybos operacijų stabilumas ir pagamintos produkcijos kokybė. Viena iš pagrindinių gaminamų gaminių kokybinių rodiklių nestabilumo priežasčių [50] yra naudojamų to paties karjero molių cheminės bei mineralinės sudėčių nestabilumas ir dėl to apsunkintas technologinio proceso valdymas. Molių cheminės bei mineralinės sudėčių skirtingumas paaiškinamas tuo, kad molio mineralai labai priklauso nuo dirvoje vykstančių pokyčių. Perspektyvūs bei veiksmingi metodai naudojami paruošiant formavimo mases [51]: mechaninė žaliavų aktyvacija, naudojant rutulinius malūnus ir vibrosmulkintuvus, smulkiadispersių žaliavų klasifikavimas, naudojant uždaruosius tūrinius elektroklasifikatorius, ultragarsinis keraminių masių apdorojimas, žaliavų apdorojimas magnetiniu lauku, elektrocheminė aktyvacija. Tačiau šių metodų įdiegimas pramonėje yra labai brangus, didėja produkcijos savikaina.

Rusų mokslininkai siūlo molio paruošimui naudoti eksperimentinį įrenginį, galintį pakeisti daugelį molio apdorojimo įrenginių. Jo darbas paremtas tuo, kad molis jame apdirbamas keliais būdais, imituojant keramikos pramonėje naudojamus įrenginius. Jis drožiamas, perspaudžiamas per groteles specialiu peiliu. Kaip rodo atlikti tyrimai, apdorojant molį tokiu įrenginiu, labai padidėja molio plastiškumas, mechaninės pusgaminių ir gaminių savybės, sumažėja molio jautrumo džiovinimui koeficientas [52].

Įdomus ir netradicinis molio žaliavos gerinimo būdas – mikrobiologinis apdirbimas [53] naudojant mikroflorą. Bandyto rezultatas – padidėjęs molio dispersiškumas ir plastiškumas, sumažėjęs džiuostamasis susitraukimas ir molio jautrumas džiovinimui. Tai leido sumažinti džiovyklų energetines sąnaudas ir neatitiktinių produktų kiekį, sumažėjo sukepimo temperatūra, padidėjo sukepimo proceso aktyvumas bei paruoštų gaminių kokybiniai rodikliai.

Formuojant keramines mases, dažnai vertinamas kokybinis santykis tarp kietųjų, skystųjų ir dujinių mišinio fazių. Skystoji fazė, t. y. vanduo, sutraukia molingąsias daleles, bet taip pat lemia didesnę molingųjų dalelių slankumą viena kitos atžvilgiu. Todėl skystosios fazės kiekis, reikalingas sėkmingam formavimo procesui užtikrinti, priklauso nuo formavimo būdo, mineralinės molingosios komponento sudėties ir jo kiekio, dujinės fazės kiekio ir kt. Pagrindiniai reikalavimai suformuotam pusfabrikačiui yra pakankamas, pastovus ir vienodas jo sutankinimas visame tūryje bei pakankamas mechaninis stipris, leidžiantis toliau apdoroti pusfabrikatį. Taip pat neturi būti įtrūkių, įvairių įtempių ir kitų pažeidimų [54, 55]. Paprastai formavimo procesui naudojami sraigtiniai (juostiniai) presai. Juose keraminė masė juda sudėtingomis trajektorijomis, t. y. sukamaisiais judesiais aplink sraigto ašį ir išilgai jos. Masės judėjimas priklauso nuo daugelio veiksnių, kurie praktikoje sunkiai apskaičiuojami, o tai gali lemti išspaustos iš preso formavimo masės

nevienalytiškumą, dėl kurio gauname nekokybišką gaminį. Todėl, siekiant išvengti arba bent jau sumažinti minėtojo veiksnio pasekmes, būtina laikytis ir imtis tokių veiksmų: kruopščiai ir teisingai paruošti formavimo masę iki presavimo, sumažinti dulkingųjų dalelių kiekį, prailginti formavimo galvutės ilgį, sumažinti tarpą tarp preso sraigto vijų ir korpuso, sumažinti sraigto veleno apsūkų skaičių iki (20–30) aps./min ir padidinti drėgnį [54].

Publikacijoje [56] išskiriami du pagrindiniai veiksniai, nuo kurių priklauso keraminių gaminių kokybė: tai tolygus formavimo masės judėjimo greitis ir tolygus tankis formavimo agregate. Tačiau kadangi gamybinės formavimo masės priklausomai nuo naudojamų žaliavų labai skiriasi, kiekvienu atveju turi būti parenkami reikiami formavimo įrenginių parametrai. Autorius [57] nurodė, kad geriausias ekstruzinio preso darbo režimas priklauso nuo sraigto geometrijos, jo sukimosi greičio, formavimo masės temperatūros. Atitinkamai reguliuojant minėtuosius parametrus, galima gerokai sumažinti energetines preso sąnaudas ir pagerinti gaminių kokybę.

Autorius [31] nustatė, kad, didinant formuojamojo pusgaminių skerspį, reikia didinti suspaudimo laipsnį presavimo galvutėje ir nustatyti geriausią vakuumavimo laipsnį. Mažiausias leistinasis išretinimas preso vakuumavimo kameroje turi būti ne mažesnis kaip 0,08 MPa. Pusgaminius, pagamintus esant 0,09 MPa išretinimo gyliui, preso vakuumavimo kameroje, galima degti 4 h trumpiau nei pagamintus, esant 0,08 MPa išretinimo gyliui preso vakuumavimo kameroje.

Veiksmingas būdas padidinti suformuotų gaminių kokybę – formavimo masės vakuumavimas. Kaip žinoma, oro buvimas formavimo masėje ardo ryšį tarp molingų komponento mineralų ir tarp vandens molekulių, kartu mažindamas formavimo masės mechanines ir formavimosi savybes. Be to, oro buvimas keraminėje masėje sulėtina molingųjų dalelių dezagregacijos procesą, sumažina formavimo mišinio sukibimą tarp sluoksnių, lemia netolygų sutankėjimą ir mikroplyšių atsiradimą [54]. Formuojant gaminius plastinio formavimo būdu, formavimo masė yra išretinama vakuumu juostinio preso vakuumavimo kameroje. Išretinimo veiksmingumas priklauso nuo gabalų dydžio, išretinimo gylio ir formuojamos masės sudėties bei išlaikymo vakuume kameroje trukmės. Išretinant oro tūris formavimo masėje sumažinamas nuo (5–15) % iki (0,3–4) % [58]. Išretinimas sumažina formavimo mišinio tekstūros nevienalytiškumą, padidina plastiškumą bei pagerina formavimo parametrus, (20–30) °C sumažinama gaminių degimo temperatūra ir iki 5 MPa padidinamas pusgaminių mechaninis stipris.

Suformuotas keraminis pusgaminis dėl jame esančios drėgmės būna nedidelio mechaninio stiprio. Drėgmės kiekis priklauso nuo gamybos būdo, mineralinės sudėties ir kitų veiksnių, tai apsunkina tolesnį technologinių

operacijų eigą. Todėl džiovinimas yra būtina technologinio proceso operacija. Sudėtingiausiai džiovinimo procesas vyksta pusgaminuose, kurie suformuoti plastinio formavimo arba liejimo būdu iš vandeningos suspensijos (kai jų drėgnis būna apie (20–25) %). Tai aiškinama dideliu džiuostamuoju susitraukimu ir nedideliu plastiškojo molio vandens pralaidumu. Gaminio tūrio sumažėjimo priežastis – paviršinių įtempių jėgos, kurios priverčia suartėti masės daleles, pasišalinant tarp jų esančioms vandens plėvelėms. Be to, susitraukimas gali vykti ir dėl paties molingojo mineralo dalelių tūrio mažėjimo. Drėgname pusgaminyje išskiriami du vandens tipai: laisvasis ir higroskopinis. Džiovinimo metu pirmiausia pasišalina laisvasis vanduo, ir todėl pusgaminio tūris sumažėja. Higroskopinis vanduo pasišalina iš gaminio adsorbcinėmis ir kapiliarinėmis jėgomis, todėl pusgaminio tūris nesumažėja [54].

Kiekvieno gaminio tipo džiovinimo režimas priklauso nuo džiovinamos masės savybių (liesinančiųjų priedų kiekio, jų dispersiškumo, molio jautrumo džiovinimui), keraminės masės formavimo būdo, gaminių matmenų ir džiovinimo tipo. Dažniausiai džiovinimo režimas parenkamas laboratorijoje, o gamyboje jis koreguojamas. Šilumą džiovyklose paprastai tiekia karštas oras iš krosnies aušinimo pozicijų arba paruošimo degimui zonos. Džiovinimo greitis reguliuojamas keičiant džiovinimo agento temperatūrą, santykinį oro drėgnį ir judėjimo greitį. Gaminius galima džiovinti ir radiaciniu būdu, tuomet naudojami dujiniai beliepsniai degikliai, laidiniai elektriniai šildytuvai, elektrinės lempos su infraraudonąja spinduliuote ir kt. [54, 59].

Keraminių gaminių degimas – pagrindinė technologinė operacija. Degimo metu vykstant fizikiniams ir cheminiams procesams keraminė šukė sukepa. Sukepimas įvyksta dėl eutektinės skystosios fazės susidarymo, kai kurių komponentų ištirpimo joje ir jos cementacijos [54, 59].

Termiškai apdorojant keraminę masę, jau (120–200) °C temperatūroje pradeda vykti cheminiai procesai, lemiantys tiek atskirų sandų, tiek ir visos keraminės masės kokybinius pokyčius. Minėtuojų terminio apdorojimo periodu laisvasis vanduo gana intensyviai skiriasi iš pusgaminio, todėl dažnai šis procesas būna įtrūkių arba plyšimų priežastis. Norint išvengti minėtųjų pažaidų, reikia mažinti temperatūros kėlimo greitį arba (ir) mažinti gaminio drėgnį. Toliau keliant temperatūrą, dehidratacija tęsiasi, t. y. skiriasi tarpsluoksninis adsorbcinis ir ceolitinis vanduo. Adsorbcinio vandens išsiskyrimas sukelia gaminio traukimąsi, kadangi jis yra tarp medžiagos plokštelių, kurios dėl dehidratacijos susispaudžia. Pasiekus (200–250) °C temperatūrą, karkasinio tipo aliumosilikatuose, kuriuose vandens molekulės yra gardelės ildubose, sujungtose kanalais, pradeda skirtis ir ceolitinis vanduo. Dažniausiai šio vandens išsiskyrimas vyksta palaipsniui be endoterminių sustojimų ir gali tęstis net iki (800–900) °C temperatūros. Aliumosilikatiniuose junginiuose dažnai yra

kristalohidratinio ir konstitucinio vandens. Kristalohidratinis vanduo kristalo gardelėje išsiskiria (300–400) °C temperatūroje, jos neardydamas. Konstitucinis vanduo paprastai į gardelę patenka OH⁻ hidroksilinės grupės pavidalu ir turi labai stiprų ryšį, todėl dehidratacija (dehidroksiliacija) šiuo atveju vyksta suardant gardelę ir daug aukštesnėje temperatūroje. Be minėtųjų procesų, keraminėse sistemose pradinėje terminio apdorojimo stadijoje vyksta ir oksidacijos reakcijos. Iki šiol šiam procesui buvo skiriamas palyginti mažai dėmesio. Paprastai visos organinės medžiagos pradeda anglėti 150 °C ir išdega (300–400) °C temperatūroje. Didelę reikšmę terminio apdorojimo režimui turi karbonatų skilimas (masių karbonizacija). Atsižvelgiant į sudėtį, jie skyla (600–950) °C temperatūroje. Jei karbonatai nespėja suskilti iki porų uždarymo momento, tai gaminyje, toliau keliant temperatūrą, dėl slėgio didėjimo gali susidaryti didelės poros, įtrūkiai arba jis gali išsipūsti. Tai svarbu žinoti naudojant greitąjį degimo režimą [54, 60, 61].

Darbe [62] siūloma panaudoti oksidacinį-redukcinį degimo režimą ir keraminius gaminius degti sumažinus slėgį degimo kameroje iki 133 Pa.

Autorius [20] atliko daug darbų, degdamas bandinius iš gamtinių aliumosilikatų ir veikdamas juos įvairaus potencialo redukuojančiųjų-oksiduojančiųjų dujų srautu bei vandens garais. Įrodyta, kad redukuojančiųjų dujų terpėje Fe³⁺ jonai virsta Fe²⁺ jonais, o šie labai intensyvina aliumosilikatuose susidarančių termodinamiškai stabilių ir pageidaujamų kristalinių fazių: mulito, anortito, diopsido, volastonito reakcijas bei stiklingąsias fazes, į kurių sudėtį įeina Fe²⁺ jonas. Redukuojančiųjų dujų terpėje kaolinito sukepimo reakcijos vyksta (150–200) °C, hidrožėručiuose – (100–150) °C, montmorilonite – ~100 °C, o hidrožėručiuose ir daug karbonatų turinčiuose moliuose – (50–100) °C žemesnėse temperatūrose nei oksidacinėje dujų terpėje.

Pagrindinė problema, išskylanti išdegant gaminius, yra ta, kad neužtikrinama vienoda degimo temperatūra krosnyje pagal statinio aukštį ir plotį bei reikiami temperatūriniai parametrai, atsižvelgiant į intensyvius procesus, vykstančius terminio apdorojimo metu. Dėl netinkamo terminio režimo, degant tunelinėje krosnyje, išskiriamos tokios pagrindinės gaminių neatitiktys: išsipūtimas, gaminių spalvos nevienodumas, apnašos, įtrūkiai, juoda šerdis. Išsipūtimas paprastai atsiranda dėl CaCO₃ skilimo į CaO ir CO₂, kai jau susidarė skystoji fazė. Susidaręs CO₂ turi išsiskirti, kol pusfabrikatis yra porėtas ir pralaidus garams. Gaminių spalvos nevienodumas, įtrūkiai bei pusgaminių suirimas atsiranda dėl nereguliuoto terminio apdorojimo, pasišalinant iš pusgaminių higroskopinei drėgmei. Šio etapo metu (40–150) °C temperatūroje per greitai pasišalinantys vandens garai gali suplėšyti suformuotus pusgaminius, sutrumpinus džiovinimo laiką, į paviršių su vandens garais difundavusios

druskos reaguoja su sieros junginiais, esančiais dūmų sudėtyje, todėl gaminių paviršiuje susidaro apnašos. Kita įtrūkų ir surimo priežastis – iki 575 °C temperatūroje vykstantis α -kvarco perėjimas į β -kvarcą, padidėjus tūriui 2,8 % ir vėstant. Vykstant atvirkštiniam procesui, tūris sumažėja 0,82 %. 800 °C temperatūroje Al_2O_3 sąveikauja su SiO_2 ir susidaro mulitas ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$). Šios sąveikos metu suyra kristalinės molio gardelės ir susidaro naujos keraminės struktūros, todėl būtina atsižvelgti į tuo metu vykstantį temperatūros kėlimo greitį [20].

Degant gaminius tunelinėje krosnyje 1 000 °C temperatūroje, dėl neteisingo degiklių išdėstymo degimo ertmėse ir dėl netinkamos degiklių konstrukcijos pasitaiko iki 80 °C temperatūrų skirtumas. Netolygiai išdegtų gaminių tūrinės deformacijos skiriasi iki 5 %, todėl buvo gaminama nemaža dalis neatitiktinių produktų. Ši problema gali būti išspręsta pakeitus senus degiklius naujais, kurie leistų tiksliai reguliuoti temperatūrą krosnyje ir užtikrintų pusgaminiams vienodas degimo sąlygas [63]. Daug dėmesio skiriama impulsinių degiklių valdymui tobulinti [64]. Degiklius valdo automatinės kompiuterinės sistemos, kurios reaguodamos į temperatūros pokyčius, tam tikrais kiekiais tiekia degimo kurą ir valdo degiklio liepsnos impulsus, galinčius siekti iki 800 vnt. per minutę. Taip gali būti užtikrinama vienoda degimo temperatūra tunelinės krosnies skerspjūvyje. Nors temperatūros nevienodumas krosnies apačioje ir viršuje yra viena iš pagrindinių problemų, ji nėra iki galo išspręsta, nes net ir naujausi technikos laimėjimai neleidžia visiškai tiksliai sureguliuoti degimo proceso, kuriam nemažą poveikį daro naudojamų žaliavų savybės.

Norint mažinti energetines tunelinių krosnių sąnaudas [65], siūloma degimui naudoti sąvartynuose susidarancias biodujas. Tokio tipo gamykla yra pastatyta Ispanijoje. Jos įrangos kaina – 1,5 mln. eurų, sutaupoma 60 % gamtinių dujų. Taip pat vykdomi moksliniai ir praktiniai tyrimai, kuriant greitaeigius degimo režimus, kurie sutrumpintų degimo laiką iki 3–8 h [66, 67]. Termoizoliacijos instituto mokslininkams pavyko sutrumpinti degimo režimą tunelinėje krosnyje iki 26 h [68]. Tačiau yra mokslininkų, kurie nesutinka su greitaeigių degimo režimų taikymu keraminių mūro gaminių gamybos pramonėje [69].

Daug darbų atlikta tyrinėjant keraminių gaminių atsparumą šalčiui. Nustatyta, kad keraminių gaminių atsparumas šalčiui priklauso nuo naudojamų žaliavų charakteristikų (molio ir smėlio granulometrinės ir mineraloginės sudėties), technologinių operacijų ir naudojamų įrenginių parametrų (formavimo, degimo, aušinimo). Visi minėtieji veiksniai lemia keraminės šukės struktūros susidarymą ir atsparumą šalčiui [70–72]. Nagrinėjant atsparumo šalčiui vertinimo problemas, akcentuojama, kad, nustatant keraminių gaminių

ilgalaikiškumą atsparumo šalčiui požiūriu, nepakanka vadovautis vienu kriterijumi, nes gaminiai naudojami sudėtingose konstrukcijose, susidedančiose iš skirtingų gaminių grupių, ir nėra aiškus jų poveikis ilgalaikiškumui.

Autoriai [73] iš molių, kurių sudėtyje yra 60 % SiO_2 kiekio, o Al_2O_3 kiekį sudaro 1/3 SiO_2 kiekio ir yra mažas išdegančiųjų priedų kiekis, išdegę suformuotus bandinius 1 050 °C temperatūroje, gavo didžiausio atsparumo šalčiui, mechaninių savybių ir mažiausio susitraukimo gaminius.

Vertinant degimo temperatūros dydžio ir išlaikymo joje trukmės poveikį keraminių čerpių savybėms, nustatyta [74], kad geriau yra kelti temperatūrą ir trumpinti išlaikymo joje trukmę, nei mažinti temperatūrą ir ilginti išlaikymo trukmę. Darbe [75] pateikiamas daugiakomponentis modelis, leidžiantis nustatyti smėlio sudėties ir kiekio, didžiausios degimo temperatūros bei išlaikymo joje trukmės poveikį gautų keraminių gaminių atsparumui šalčiui, nustatytam vienpusio šaldymo–atšildymo būdu pagal specialų režimą. Šis modelis remiasi eksperimento planavimo teorija, kuri taip pat taikyta šiame darbe. Iš pateikto modelio galima spręsti, kad degimo temperatūros kėlimas, išlaikymo aukščiausioje degimo temperatūroje ilginimas ir smėlio kiekio didinimas teigiamai veikia atsparumą šalčiui. Darbuose [31, 76–78] parodyta, kad panaudojus eksperimentų planavimo metodą galima nagrinėti molio plastiškumo, formavimo mišinio sudėties, sumaišymo trukmės, išretinimo vakuumo kameroje gylio, suspaudimo laipsnio presavimo ir formavimo galvutėse, formavimo juostos išspaudimo iš formavimo galvutės greičio, formavimo mišinio apdorojimo bei sudėties, pusgaminių džiovinimo bei degimo režimų, naudojamos organinės plėvelės technologinius veiksnius. Autoriai [79] išnagrinėjo formavimo masės komponentų ryšį su keraminės šukės įvairiais struktūriniais rodikliais, reikalingais prognozuojant eksploatacinį atsparumą šalčiui, tačiau jų išvadoms ir rezultatams pagrįsti reikia papildomų tyrimų.

Nagrinėjant keraminių gaminių struktūros ryšį su atsparumu šalčiui, nustatyta [80–83], kad minėtajam rodikliui didelį poveikį turi susidariusių porų tūris (mm^3/g) ir vidutinis porų skersmuo. Autoriai [84] nurodo, kad pagrindinis rodiklis, prognozuojant eksploatacinį atsparumą šalčiui, yra poringosios erdvės rezervas, kuris nustatomas pagal vandens įmirkio rodiklius.

Nekeliant degimo temperatūros, keraminių stogo čerpių atsparumas šalčiui gali būti padidintas naudojant flusus [85]. Priedo sudėties autorius nenurodo, tik nurodoma, kad jis pagamintas druskos ir šarminių metalų pagrindu. Didžiausias naudojamas kiekis – 2 %, tačiau jau 0,25 % priedo kiekis veikė teigiamai, degant 920 °C temperatūroje. Autoriai [86] nagrinėjo boro oksido (B_2O_3) poveikį keraminių gaminių savybėms. B_2O_3 buvo naudojamas kaip flusas, jo gali būti dedama iki 2 %. Toks priedas padidina gaminių ilgalaikiškumą, gniuždomąjį stiprį, dilumą ir kt. Autorius [74, 87, 88] teigia, kad

atsparumą šalčiui labiausiai veikia porų skersmuo, o ne porų tūrio kiekis. Darbe [89] nurodoma, kad atsparių šalčiui gaminių porų skersmuo turi būti didesnis nei 1 μm , priešingu atveju gaunami neatsparūs šalčiui gaminiai. Turint tam tikros informacijos apie palankią atsparumo šalčiui keraminių gaminių struktūrą, galima reguliuoti šią struktūrą veikiančius veiksnius ir gauti atsparius šalčiui gaminius. Tačiau tai nėra lengva, kadangi atsparumas šalčiui priklauso nuo žaliavų sudėties, degimo parametrų, įvairių naudojamų priedų.

Autoriai tyrinėjo tinko savybes [90] ir nustatė, kad apsaugoti nuo kritulių fasadai, veikiami tik rūko ir rasos lašelių arba nestipraus rūgštaus lietaus bei drėgno oro, senėja greičiau. Tai vyksta dėl to, kad rūgštys ardo tinką, o norint to išvengti, reikia „plauti“ fasadus.

2.2. Keraminių mūro gaminių atsparumo šalčiui nustatymo būdai

Sudrėkusi medžiaga ardoma padidėjus užšalancio vandens tūriui. Visiškai prisotintos medžiagos yra tos, kurių tuštumų (porų, kapiliarų ir plyšių) prisotinimo laipsnis artėja prie vieneto. Paprastai medžiagų prisotinimo laipsnis yra gerokai mažesnis ir priklauso nuo porų atvirumo ir jas jungiančių kapiliarų dydžio. Iš dalies prisotintose medžiagose užšalantis vanduo gali persiskirstyti ir sumažinti mechaninį slėgį į porų ir kapiliarų sienes. Mechaninis užšalancio vandens slėgis į tuštumų sienes pradeda pastebimai didėti, jeigu visų porų (arba kokios nors vietos) tūris pripildytas daugiau nei 75 % [91].

Tiriant vandens migracijos ir fazinių virsmų, medžiagos deformacijos ir destrukcijos procesų skirtumus tūriniu ir vienpusiu būdu, didelis A. Sadūno ir jo mokinių įnašas. Jų atliktuose darbuose [20, 61, 92–95] konstatuojama, kad tūrinis būdas netapatus vienpusiam. Pagrindiniai šių būdų skirtumai pasireiškia tiek šaldant, tiek atšildant keraminius bandinius. Šaldomi tūrinio šaldymo–šildymo būdu keraminiai bandiniai peršąla daug greičiau nei šaldomi vienpusiu būdu. Bandant tūriniu būdu, didžiausių vandens sankaupų vietas lemia keraminio gaminio struktūros ypatumai, o vienpusiu būdu – vandens sankaupos lokalizuojamos paviršiniuose peršalusiuose sluoksniuose.

Drėgmės migracija poringuose kūnuose glaudžiai siejama su šilumos srautu ir priklauso nuo drėgmės ryšio su medžiaga. Žinomi [92, 93, 96, 97] šie pagrindiniai drėgmės migracijos mechanizmai: molekulinės difuzijos, molekulinės efuzijos, plėvelinis ir vykstantis su faziniais virsmis. Priklausomai nuo šaldymo būdo bei porų ir kapiliarų ekvivalentinio spindulio, vandens migracija poringame kūne gali vykti pagal ir prieš šilumos srauto kryptį.

Ledo kristalizacijos greitis priklauso nuo šaldymo sąlygų ir greičio, nuo išotrinimo vandeniui laipsnio ir ledo kristalizacijos mechanizmo [92, 93].

Atšildymo metu vykstantis vandens persiskirstymas peršalusiuose bandinio paviršiaus sluoksniuose, kuris irgi priklausomai nuo bandinio struktūros ypatumų ir šaldymo būdų gali padidinti arba sumažinti lokalinę vandens koncentraciją [92, 93].

Pasak A. Sadūno [20], vyrauja du suirimo tipai: tai atsisluoksniavimas, trupėjimas, lupimasis bei suskilimas perpus ar į gabalus. Pirmasis suirimo tipas – tai eksploatacijai būdingas paviršiaus irimas. Bandinio įmirkis suirimo metu yra didesnis už bandinio įmirkį po vakuumavimo, ir šiuo atveju dominuoja drėgmės migracija į paviršių. Antrasis suirimo tipas – nebūdingas eksploatacijai (skilimas į gabalus). Suirimo metu bandinio įmirkis yra mažesnis nei to paties bandinio įmirkis po vakuumavimo. Vadinasi, vyksta drėgmės migracija į pažeistas vietas bandinio viduryje ar centre.

Viena iš atsparumo šalčiui tyrimo krypčių yra natūrinių ir laboratorinių atsparumo šalčiui reikšmių lyginimas, bandant tapačius bandinius, siekiant labiausiai priartinti atsparumo šalčiui nustatymo metodo režimą natūraliai egzistuojančiam režimui ir sukalibruoti natūrines bei laboratorines atsparumo šalčiui reikšmes, t. y. nustatyti, kiek ciklų, gautų laboratorinėmis sąlygomis, atitinka atsparią ir neatsparią šalčiui produkciją bei tarpines reikšmes. Anglų mokslininkai [98] palygino 9 žiemų atsparumo šalčiui rezultatus su laboratorijoje gautais rezultatais. 12 partijų keraminių bandinių laboratorinės ir natūrinės atsparumo šalčiui reikšmės koreliavo ir jų sąryšis išreikštas tiesine funkcija. Gauti rezultatai rodo, kad pagal standartizuotą metodiką nustatant atsparumą šalčiui sudaroma daug agresyvesnė aplinka nei natūraliai vykstantis šaldymo–šildymo procesas, nes laboratorijoje bandiniai išotrinami vandeniui visada vienodai bei šaldomi vienoda neigiama temperatūra, o natūraliomis sąlygomis šis veiksnys ne visada didžiausias ir priklauso nuo aplinkybių. Nustatyta, kad 100 ciklų atlaikiusius bandinius galima vertinti kaip atsparius šalčiui.

Kuriant bendrą Europai keraminių čerpių atsparumo šalčiui nustatymo metodiką [99], buvo atlikti šiuo požiūriu įdomūs tyrimai. Iki tol galiojusiam Europos standarte naudotos keturios čerpių atsparumo šalčiui nustatymo metodikos, pagrastos vienpusio šaldymo–atšildymo principu ir taikomos atsižvelgiant į geografinės gaminio naudojimo zonų sąlygas. Lietuvos klimato sąlygomis tinkamiausia pripažinta D metodika (pagal LST EN 539-2), kuri naudojama Airijoje, Didžiojoje Britanijoje ir Danijoje. Šių tyrimų pagrindas buvo prieštaringi rezultatai, gauti nustatant keraminių čerpių atsparumą šalčiui pagal skirtingas vienpusio šaldymo–atšildymo metodikas. Tyrimų eigoje buvo analizuojami skirtingų 12 ES šalių klimatiniai duomenys, atlikti preliminarūs

palyginamieji tyrimai, vėliau nutarta atlikti natūrinius tyrimus skirtinguose regionuose bei palyginamuosius laboratorinius bandymus ir sukurta bendra metodika (E metodika) visai ES, tačiau paliktos galioti ir ankstesnės A-D metodikos.

Lietuvos mokslininkai [20, 92, 93] atliko analogišką eksperimentą mūsų klimato sąlygoms. Gautų natūrinių ir laboratorinių rezultatų ryšiai leido analizuoti ir sukurti tinkamiausius mūsų klimato sąlygoms vienpusio šaldymo–šildymo režimus, iš kurių tinkamiausi buvo standartizuoti.

Lygindami vienpusio metodo principu paremtus atsparumo šalčiui nustatymo režimus, Lietuvos mokslininkai [20, 92, 93] nustatė, kad vienpusio šaldymo principas užtikrina rezultatų palyginamumą ir pakankamai stiprų jų koreliacinį ryšį, nepaisant bandymų režimo parametrų skirtumo.

Kaip matyti, atsparumo šalčiui nustatymo metodikų palyginimo klausimai yra sprendžiami, tačiau, analizuojant gautus rezultatus, pastebima nemažai nevienareikšmės informacijos, kuri tik patvirtina šio klausimo sudėtingumą ir nelengvą sprendimo kelią.

Tiesiogiai atsparumas šalčiui iki 2006-04-01 buvo nustatomas remiantis standartizuota metodika pagal LST 1272-92 „Keraminės plytos. Techninės sąlygos“ tūriniu arba vienpusiu šaldymo ir šildymo būdais:

- tūriniu būdu atsparumas šalčiui nustatomas tūriniu šaldymo ir šildymo būdu šaldymo kameroje, kurioje įrengta dirbtinė ventiliacija. Bandiniai mirkomi vandenyje 48 h. Šaldymo kameroje oro temperatūra prieš sudedant bandinius turi būti ne aukštesnė kaip -15°C ir sudėjus – nepakilti aukščiau kaip -5°C . Šaldymo laikas pradedamas skaičiuoti, kai temperatūra kameroje yra -15°C . Per visą šaldymo laiką temperatūra kameroje gali keistis nuo -15°C iki -20°C . Šaldoma ne mažiau kaip 4 h. Po šaldymo bandiniai panardinami į indą su $(20\pm 5)^{\circ}\text{C}$ temperatūros vandeniu. Šildymo trukmė turi būti ne trumpesnė kaip pusė šaldymo laiko;

- vienpusiu šaldymo ir šildymo būdu atsparumas šalčiui nustatomas šaldymo–lietinio įrenginyje, galima naudoti šaldymo kamerą, papildytą vienpusio bandinių šaldymo įrenginiu. Bandiniai prisotinami vandens, mirkant jame $(72 + 1)$ h. Iš prisotintų vandens bandinių šaldymo–lietinio įrenginio sekcijoje montuojamas vienos plytos pločio, o vienpusio bandinių šaldymo įrenginio kasetėje – dviejų plytų pločio imitacinis mūro fragmentas. Šio fragmento montavimo metu gautiems bandinių drėgnumo nuostoliams kompensuoti bandinių paviršius fragmente ne mažiau kaip 8 h turi būti drėkinamas vandeniu. Per visą šaldymo laiką temperatūra kameroje gali keistis nuo -15°C iki -20°C . Šaldoma ne mažiau kaip 8 h. Po šaldymo bandiniai

atšildomi (20 ± 5) °C temperatūros vandeniu. Šildymo laikas turi būti lygus šaldymo laikui.

Bandinių šaldymo ir šildymo laikas sudaro vieną ciklą. Bandinių atsparumas šalčiui nustatomas pagal bandymo metu atsiradusias paviršiaus pažaidas (nusilupimą, nuoskilas, įtrūkas).

Pagal šiuo metu galiojančią techninę specifikaciją LST CEN/TS 772-22:2006 bei suteikus jai Europos standarto statusą, atsparumas šalčiui bus nustatomas tikrai vienpusiu šaldymo ir šildymo būdu. Šiuo metu galiojantis nacionalinis standartas LST 1985:2006, kol visiškai įsigalios LST CEN/TS 772-22:2006, dar leidžia nustatyti atsparumą šalčiui tūrinio arba vienpusio šaldymo būdu, kad keraminių mūro gaminių gamintojai turėtų laiko pasiruošti standarte esančioms naujovėms. Nacionaliniame standarte LST 1985:2006 ir techninėje specifikacijoje LST CEN/TS 772-22:2006, palyginti su prieš tai galiojusiu LST 1272-92, iš esmės pasikeitė vienpusio šaldymo ir atšildymo būdo temperatūrinis režimas bei bandinių įmirkymo laikas:

- vienpusiu šaldymo ir šildymo būdu atsparumas šalčiui nustatomas šaldymo įrenginyje, kuris gali atlikti nurodytus šaldymo–atitirpinimo ciklus ir užtikrinti vienos krypties šaldymą bei atitirpinimą per vieną gaminių paviršių. Bandiniai prisotinami vandens mirkant 7 paras. Pirmasis šaldymo periodas turi trukti 6 h, o kiekvienas tolesnis periodas – (120 ± 5) min. Oro temperatūra ne mažiau kaip per 20 min ir ne daugiau kaip per 30 min turi nukristi nuo (20 ± 3) °C iki (-15 ± 3) °C. (-15 ± 3) °C temperatūra turi būti palaikoma tolesnes (90–100) min taip, kad visas šaldymo periodas truktų (120 ± 5) min. Atitirpinant oro temperatūra ne mažiau kaip per 15 min ir ne daugiau kaip per 20 min turi pakilti nuo (-15 ± 3) °C iki (20 ± 3) °C. Visas šilto oro tiekimo periodas, įskaitant temperatūros kėlimo periodą, turi būti (20 ± 1) min. Tolesnis vandens įpurškimo periodas, kai vanduo iš viršaus tolygiai purškiamas ant plokštės, kad vandens plėvelė tolygiai pasiskirstytų virš viso plokštės paviršiaus, turi trukti (120 ± 10) s. Vanduo, kurio temperatūra (20 ± 5) °C, turi būti tiekiamas su ($6 \pm 0,5$) l/metrai bandomosios plokštės pločio/min debitu. Pasibaigus apipurškimo periodui, vanduo turi per 2 min nutekėti nuo bandymo įrangos.

Pereinant prie naujo nacionalinio standarto LST 1985:2006, kuris numato aukščiausią atsparumo šalčiui klasę F.2 (leidžia naudoti gaminius stipriai ardančioje aplinkoje) suteikti bandiniams, atlaikiusiems daugiau 100 šaldymo–atšildymo ciklų vienpusio šaldymo–atšildymo būdu bei visiškai įsigaliojus LST CEN/TS 772-22:2006, Lietuvos keraminių mūro gaminių gamintojų produkcija gali būti įvertinta neadekvačiai.

Pagal LST 1272-92 atsparumas šalčiui dažniausiai buvo vertinamas tūriniu šaldymo–atšildymo būdu dėl trumpesnių laiko sąnaudų, palyginti su vienpusio

šaldymo–atšildymo būdu. Tačiau įrodyta ir neabejojama [92–94], kad tikrąsias eksploatacines sąlygas geriausiai įvertina vienpusis šaldymo–atšildymo būdas ir jis yra netapatas tūrinio šaldymo–atšildymo būdui. Pasikeitus vienpusio šaldymo–atšildymo metodikai kyla klausimai, kaip gaminti atsparią šalčiui produkciją, t. y. kokie technologiniai veiksniai lemia vieną ar kitą šaldymo–atšildymo metodiką ir ar jos tapčios.

Apžvelgus keraminių mūro gaminių atsparumo šalčiui prognozavimo galimybes, matyti, kad nėra vienareikšmio ir aiškaus atsakymo, kaip tiksliai prognozuoti keraminių gaminių atsparumą šalčiui. Žinomi atsparumo šalčiui prognozavimo būdai, naudojant struktūrinius rodiklius, kurie įvertina bandinių porėtumą, kapiliarų ir porų dydžius bei potencialą, vandens įsotinimo laipsnį, struktūros tolygumą, struktūrinius ir deformacinius rodiklius, fizikines-mechanines bei struktūrines savybes. Tačiau nėra aišku, kurie iš naudojamų prognozavimui rodiklių geriausiai leidžia tai padaryti. Vieningai sutinkama, kad atsparumo šalčiui prognozavimas turi būti sprendžiamas kompleksiskai naudojant kelis įvertinimo metodus [20, 61, 92, 93, 100, 101].

Autoriai [102–104] pasiūlė keletą empirinių eksploatacinio atsparumo šalčiui prognozavimo keraminiams gaminiams lygčių, naudojant struktūrinius, deformacinius, fizikinius bei mechaninius rodiklius. Darbe [105] siūlomi nauji kriterijai, vertinant keraminių plytelių ilgaamžiškumą pagal liekamąją masę ir liekamąjį paviršių, bei nauji struktūriniai rodikliai: porų ir kapiliarų spindulys arba skersmuo ir efektyvių porų bei kapiliarų netolygumas.

Vertinant atsparumą šalčiui, pasiūlytas modifikuotas vienpusio šaldymo būdas [106], kai įsotintas vandeniu bandinys įmerkiamas į kambario temperatūros vandenį taip, kad jo paviršius lieka virš vandens ir yra veikiamas šalto bei šilto oro srovių. Taip šaldant vieno ciklo laikas sutrumpinamas iki (5–10) min. Keraminių bandinių savybės gali būti vertinamos naudojant garsą ir ultragarsą [107–109], tačiau dėl netikslumo šiuos metodus reikia tobulinti arba naudoti kaip papildomus.

2.3. Antrojo skyriaus išvados

Apžvelgus technologinių veiksnių poveikį keraminių mūro gaminių savybėms, galima teigti, kad pagrindiniai keraminių mūro gaminių gamybos, formuojant plastiniu būdu, technologiniai veiksniai atskiruose etapuose yra šie: tinkamų žaliavų (molio, liesiklių, flusuojančiųjų, išdegančiųjų bei atliekinių priedų) paruošimas, formavimo mišinio homogenizavimas, formavimo (mišinio išretinimo gylio, molio juostos judėjimo greičio, suspaudimo laipsnio ir kt.), džiovinimo, degimo parametrų parinkimas. Įvertinus įvairius mokslinių tyrimų

rezultatus, galima teigti, kad dėl įvairių vietovių molių skirtingų savybių tikslus technologinių veiksmų poveikis keraminių mūro gaminių kokybinėms charakteristikoms gali būti įvertintas tik eksperimentiškai.

Įvertinus keraminių mūro gaminių atsparumo šalčiui nustatymo būdus, galima teigti, kad tūrinis ir vienpusis šaldymo–atšildymo būdai yra netapatūs ir negali pakeisti vienas kito. Įvairiais moksliniais tyrimais įrodyta, kad vienpusio atsparumo šalčiui nustatymo būdas objektyviau įvertina gaminių eksploatacinį atsparumą šalčiui. Natūraliomis sąlygomis atsparumą šalčiui lemia klimatinėse zonose vykstantys skirtingi gamtos reiškiniai, todėl net ir vienpusio būdo metodikų taikymas neleidžia gauti tapačių atsparumo šalčiui reikšmių, kas tik patvirtina šių metodikų skirtingą poveikį, naudojant įvairius vandens įsotinimo, šaldymo ir šildymo režimus. Todėl būtina įvertinti keraminių mūro gaminių atsparumą šalčiui vienpusiu šaldymo–atšildymo būdu pagal LST 1985:2006, 6 p. metodiką ir nustatyti ar ji gali pakeisti seniau galiojusia vienpusio šaldymo–atšildymo būdu pagal LST 1272-92, 3.8.3 p. metodiką ir tinka vertinti atsparumą šalčiui Lietuvos klimato sąlygomis.

Apibendrinus literatūros apžvalgą nustatyta, kad technologinių veiksmų poveikis keraminių mūro gaminių ilgalaikiškumui išnagrinėtas nepakankamai. Ypač mažai darbų, kuriuose analizuojamas technologinių veiksmų poveikis keraminių mūro gaminių, tinkamų naudoti stipriai ardančioje aplinkoje, ilgalaikiškumui. Todėl šiame darbe tikslinga nagrinėti technologinių veiksmų poveikį keraminių mūro gaminių atsparumui šalčiui bei kitoms fizikinėms ir mechaninėms savybėms bei keraminės šukės struktūrai. Pasikeitę keraminių mūro gaminių standartizuota atsparumo šalčiui vienpusio šaldymo–atšildymo būdu nustatymo metodika. Todėl, būtina ištirti technologinių veiksmų poveikį keraminių mūro gaminių atsparumui šalčiui nustatytam vienpusiu šaldymo–atšildymo būdu pagal naująją metodiką.

Tyrimo metodikos ir žaliavos

3.1. Naudotos žaliavos

Keraminių bandinių gamybai buvo naudojamos vietinės žaliavos: Tauragės ir Ukmergės telkinių moliai, liesinantieji priedai – „Giraitės“ karjero smėlis (Varėnos raj.), keraminių plytų skaldelė, išdegantysis priedas – antracitas, atliekiniai priedai – langų stiklas, naftos pramonės technogeninė žaliava iš katalitinio krekingo reaktoriaus (katalizatorius GP–534, Rusija) iš AB „Mažeikių nafta“.

Pagal cheminę sudėtį moliai yra pusiau rūgštūs su dideliu kiekiu dažančių oksidų. Molių cheminė sudėtis pateikta 3.1 lentelėje, granulimetrinė sudėtis – 3.2 lentelėje, plastiškumas – 3.3 lentelėje, užterštumas priemaisomis – 3.4 lentelėje, sukepimo intervalas – 3.5 lentelėje.

3.1 lentelė. *Molių cheminė sudėtis*

Eil. Nr.	Molio pavadinimas	Cheminė molio sudėtis, %								
		SiO ₂	Al ₂ O ₃ +TiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	Kaitmenys
1	Tauragės	46,00	18,09	6,84	8,02	4,10	1,47	0,43	0,22	12,38
2	Ukmergės	66,33	15,80	6,42	1,80	2,72	1,63	–	–	5,30

3.2 lentelė. Molių granulimetrinė sudėtis

Eil. Nr.	Molio pavadinimas	Smėlio dalelių > 0,05 mm kiekis, %	Dulkių dalelių (0,05–0,005) mm kiekis, %	Molio dalelių < 0,05 mm kiekis, %
1	Tauragės	0,26	16,22	83,52
2	Ukmergės	23,93	34,03	42,04

3.3 lentelė. Molių plastiškumas

Eil. Nr.	Molio pavadinimas	Absoliutinis drėgnis, % kai		Plastiškumo skaičius
		tekėjimo riba	voliojimo riba	
1	Tauragės	39,53	20,37	19,16
2	Ukmergės	25,31	15,46	9,86

3.4 lentelė. Molių užterštumas priemaisomis

Eil. Nr.	Molio pavadinimas	Priemaišų pavadinimas	Sieto akučių skersmuo, mm – daliniai likučiai, %				
			5	3	2	1	0,5
1	Tauragės	Lauko špatai, kvarcas	0–0,073	–	–	0–0,004	0,002–0,004
		Karbonatai	0,001	–	0–0,004	0–0,002	0–0,002
2	Ukmergės	Lauko špatai, kvarcas ir kt.	0,019–3,7258	–	1,706	0,0533–1,3554	0,0927–0,633
		Karbonatai	0–3,7258	–	1,4968	0,0033–0,6769	0,0018–0,482

Abiejų molių sukepimo intervalas yra siauras. Iš 3.5 lentelės matyti, kad bandinių iš Tauragės telkinio molio vandens įmirkis < 5 % pasiekimas 1 045 °C temperatūroje, bandinių iš Ukmergės telkinio molio – 1 055 °C temperatūroje. Degant aukštesnėje nei 1 100 °C temperatūroje bandiniai lydosi.

Atlikus Tauragės molio rentgenografinį tyrimą identifikuoti šie mineralai: hidrožėrutis (10,00; 4,98; 4,48; 2,56; 1,98; 1,50 Å), kaolinitas (7,14; 3,54; 1,98 Å), kvarcas (4,25; 3,35; 2,44; 2,28; 2,13; 1,82; 1,67; 1,62; 1,60; 1,54 Å), lauko špatas (3,23; 3,02 Å), dolomitas (2,88; 2,38; 2,20; 1,79 Å), kalcitas (2,48; 2,09; 1,91; 1,87 Å) ir chloritai (14,0; 3,54; 1,50 Å). Ukmergės molyje identifikuoti šie mineralai: hidrožėrutis (10,00; 4,98; 4,48; 2,56; 1,50 Å), kaolinitas (7,14; 3,54; 1,50 Å), kvarcas (4,25; 3,35; 2,44; 2,28; 2,24; 2,20; 2,13; 1,99; 1,82; 1,67; 1,66; 1,54; 1,47; 1,45 Å), lauko špatas (3,23; 3,02; 1,80 Å) ir dolomitas (3,70; 2,88; 2,38; 1,79 Å).

3.5 lentelė. Molio sukepimo intervalas

Eil. Nr.	Molio pavadinimas	Didžiausia degimo temperatūra, °C	Bendras susitraukimas, %	Vandens įmirksis, %	Tankis, g/cm ³
1	Tauragės	900	9,40	14,65	1,77
		950	8,58	14,93	1,76
		1 000	10,50	11,47	1,84
		1 050	11,78	5,84	2,04
		1 100	16,21	0,72	2,26
2	Ukmergės	900	10,06	9,38	2,02
		950	10,16	7,52	2,07
		1 000	10,22	7,47	2,08
		1 050	11,46	4,73	2,17
		1 100	12,49	2,56	2,25

Atliekinių priedų – naftos pramonės technogeninės žaliavos ir stiklo cheminė sudėtis pateikta 3.6 lentelėje. Gamintojo duomenimis katalizatorius tai granulių pavidalo kompozicinė bekvėpė medžiaga. Katalizatoriaus piltnis tankis (0,8–1,0) g/cm³; granulių diametras (1,3–1,5) mm. Ši technogeninė žaliava priskiriama pavojingoms katalizatorių rūšims, ji būna rudai rausvos spalvos. Malto langų stiklo savitasis paviršius > 7 000 cm²/g.

„Giraitės“ karjero smėlio charakteristikos pateiktos 3.7 ir 3.8 lentelėse.

3.6 lentelė. Atliekinių priedų cheminė sudėtis

Pavadinimas	Cheminė sudėtis, %						Reti žemės elementų oksidai
	Al ₂ O ₃	NiO	MoO ₃	P ₂ O ₅	ZnO ₂	Na ₂ O	
Katalizatorius	68,85–85,25	2–4	10–13	2–6	0,1–4	0,15	0,5–4
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	R ₂ O	Fe ₂ O ₃	–
Stiklas	73,50	1,50	3,55	7,00	13,46	0,33	–

3.7 lentelė. Smėlio frakcinė sudėtis, stambumo modulis, dulkių ir molio dalelių kiekis

Pavadinimas	Likučiai ant sieto	Sieto numeris ir likučiai ant sietų, %							Stambumo modulis	Molio ir dulkių dalelių kiekis, %
		5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,14	< 0,14		
„Giraitės“ karjero smėlis	Daliniai	–	–	0,53	3,86	30,01	53,92	11,68	1,28	0,2
	Pilni	–	–	0,53	4,39	34,40	88,32	–		

3.8 lentelė. Smėlio cheminė sudėtis

Pavadinimas	Cheminė sudėtis, %						
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	R ₂ O	Kaitmenys
„Giraitės“ karjero smėlis	90,4	4,0	0,65	2,05	0,49	1,39	1,02

3.2. Žaliavų paruošimas ir bandinių formavimas

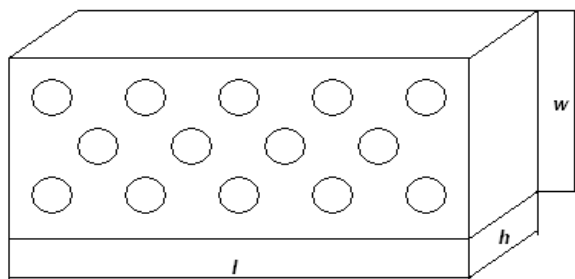
Tyrimams bandiniai buvo gaminami plastiniu būdu, formuojant rankomis ir artimomis gamybinėms sąlygomis naudojant įrangą, modeliuojančią statybinės keramikos pramonėje naudojamus svarbiausius įrenginius: diskinių išcentrinį aktyvatorių, Z tipo dvivelenį maišytuvą, juostinį vakuuminį presą, elektrinę krosnį. Naudotų įrenginių techniniai duomenys pateikti 3.9 lentelėje.

3.9 lentelė. Įrenginių techniniai duomenys

Eil. Nr.	Įrenginio pavadinimas	Techniniai duomenys	
1	Diskinis išcentrinis aktyvatorius	Našumas, kg/h	100–120
		Gabaritiniai matmenys, mm	380×380×720
		Asinchroninio el. variklio galia, kW	2,2
		Asinchroninių el. variklių skaičius, vnt.	2
2	Z tipo dvivelenis maišytuvas	Darbiniai matmenys, mm	1200×420
		Mentelių aukštis, mm	80
		Velenų sukimosi greitis, r/min	19,2
		Elektros variklio galingumas, kW	3
3	Juostinis vakuuminis presas	Cilindro skersmuo, mm	200
		Presavimo sraigto ilgis, mm	680
		Presavimo sraigto sukimosi greitis, r/min	20
		Variklio galingumas, kW	4,5
		Presavimo galvutės ilgis, mm	100
4	Elektrinė krosnis	Kameros tūris, m ³	0,8
		Aukščiausia degimo temperatūra, °C	1100
		Galingumas, kW	28

Žaliavų kondicionavimas, paruošimas ir formavimas. Tyrimams naudotas Tauragės ir Ukmergės vietovių molis buvo išaldytas, t. y. buvo supurentas ir sudrėkintas bei metus laikomas ore, vanduo esantis molyje daug kartų užšalo ir atšilo. Taip suardomi ryšiai tarp atskirų molio grūdelių, kurie savaime susmulkėja iki elementarių dalelių, dėl to pagerėja molio technologinės savybės [59]. Kitos žaliavos kondicionuotos normaliomis sąlygomis.

Smėlis buvo sijojamas per 1 mm sieta, išdegta bandinių skaldelė buvo trupinama žiauniniu trupintuvu ir sijojama per 2,5 mm sieta, antracitas sijotas per 2 mm sieta, stiklas sumaltas diskiniu išcentrinu aktyvatoriumi ir sijotas per 1 mm sieta, katalizatorius panaudotas nemaltų granulių pavidalu (1,3...1,5) mm. Formavimo mišinio komponentai buvo dozuojami pagal masę, sumaišyti dviveleniu Z tipo sraigtinu maišytuvu, sudrėkinti iki formavimui reikalingo drėgnio. Paruošta formavimo masė buvo išlaikyta 4 paras. Juostiniu vakuuminiu presu formuotos (120×60×40) mm dydžio plytelės su 14 ertmių (3.1 pav.). Keraminių bandinių vidutinis formavimo drėgnis pateiktas 3.10 ir 3.11 lentelėje.



3.1 pav. Juostiniu vakuuminiu presu formuotos (120×60×40) mm dydžio plytelės

3.10 lentelė. Keraminių bandinių formuotų rankiniu būdu vidutinis formavimo drėgnis

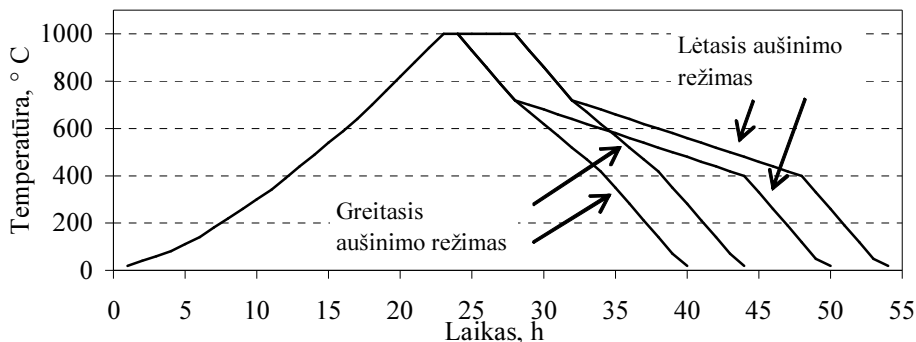
Partijos Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	Min	Max
Formavimo drėgnis, %	16	15	16	21	17	20	22	22	17	19	19	12	18	21	18	18	15	22

3.11 lentelė. Keraminių bandinių formuotų juostiniu vakuuminiu presu vidutinis formavimo drėgnis

Partijos Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	Min	Max
Formavimo drėgnis, %	20	18	16	20	17	17	21	20	17	20	19	18	19	21	19	18	16	21

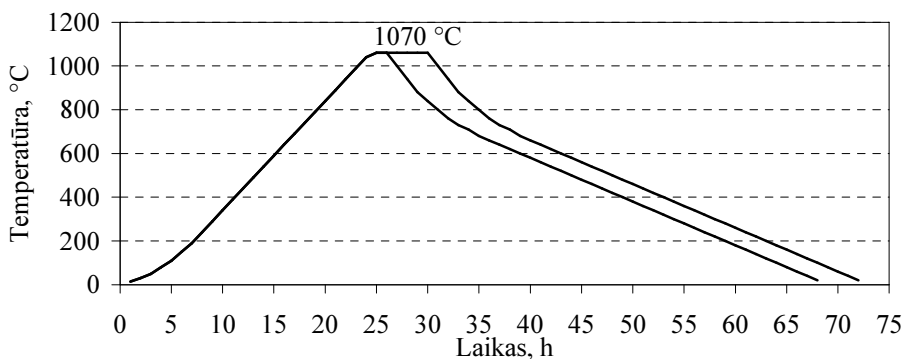
Bandinių džiovinimas. Plytelės džiovintos natūraliomis sąlygomis, o bandiniai formuoti rankiniu būdu iš pradžių džiovinti natūraliai, po to 2 paras džiovinti džiovykloje SNOL. Pirmą parą temperatūra buvo pakelta iki 50 °C, antra iki 105 °C temperatūros.

Bandinių degimas. Bandiniai formuoti rankiniu būdu buvo degami elektrinėje krosnelėje pagal specialius degimo–aušinimo režimus išlaikant aukščiausioje degimo temperatūroje 1 h ir 5 h bei aušinti lėtu arba greitu aušinimo režimu (3.2 pav.).



3.2 pav. *Keraminių bandinių suformuotų rankiniu būdu degimo–aušinimo grafikas*

Išdžiovintos plytelės buvo degamos elektrinėje krosnyje pagal specialius degimo–aušinimo režimus išlaikant aukščiausioje degimo temperatūroje 1 h ir 5 h (3.3 pav.).



3.3 pav. *Keraminių bandinių suformuotų juostiniu vakuumo presu degimo–aušinimo grafikas*

3.3. Tyrimų metodika

Laboratoriniuose tyrimuose pagrindinių žaliavų ir priedų cheminės sudėties buvo nustatytos klasikiniiais silikatinų medžiagų cheminės analizės metodais [110–112].

Džiūstamajam, degamajam ir bendrajam susitraukimui nustatyti vienoje suformuotų bandinių pusėje smailiomis slankmačio kojėlėmis buvo išpaustos duobelės. Išmatavus atstumus tarp duobelių išdžiovintame ir išdegtame bandinyje, buvo apskaičiuotas džiūstamasis (S_{dz}), degamasis (S_d) ir bendrasis (S_b) susitraukimas pagal formules:

$$S_{dz} = \frac{l_0 - l_1}{l_0} \cdot 100, \% , \quad (3.1)$$

$$S_d = \frac{l_1 - l_2}{l_1} \cdot 100, \% , \quad (3.2)$$

$$S_b = \frac{l_0 - l_2}{l_0} \cdot 100, \% , \quad (3.3)$$

čia l_0 – atstumas tarp išpaudų nedžiovintame bandinyje, mm;

l_1 – atstumas tarp išpaudų išdžiovintame bandinyje, mm;

l_2 – atstumas tarp išpaudų išdegtame bandinyje, mm.

Bandinių gniuždomasis stipris (R_{gn}) nustatytas pagal LST EN 772-1 „*Mūro gaminių bandymo metodai. 1 dalis. Stiprio gniuždant nustatymas*“. Gniuždomasis stipris apskaičiuojamas pagal formulę:

$$R_{gn} = \frac{F}{A}, \text{ N/mm}^2 \text{ (MPa)}, \quad (3.4)$$

čia F – didžiausia pasiekta apkrova, N;

A – bandinio gniuždomas plotas, mm².

Bandinių neto sausasis tankis (ρ) nustatytas pagal LST EN 772-13 „*Mūro gaminių bandymo metodai. 13 dalis. Mūro gaminių (išskyrus gamtinio akmens) neto ir (bruto) sausojo tankio nustatymas*“. Bandinių neto sausasis tankis (ρ) apskaičiuojamas pagal formulę:

$$\rho = \frac{m_{\text{dry.u}}}{V} \cdot 10^6, \text{ kg/m}^3, \quad (3.5)$$

čia ρ – neto sausasis tankis, kg/m^3 ;
 $m_{\text{dry.u}}$ – išdžiovinto bandinio masė, g;
 V – neto tūris, mm^3 .

Pradinis vandens įgerties greitis ($c_{w,s}$) nustatytas pagal LST EN 772-11 „Mūro gaminių bandymo metodai. 11 dalis. Betoninių, dirbtinio bei gamtinio akmens mūro gaminių kapiliarinės vandens įgerties ir keraminių mūro gaminių pradinės vandens įgerties greičio nustatymas“.

Bandinių vandens įmirkis (W_h) buvo nustatomas pagal LST EN 771-1+A1 „Mūro gaminių techniniai reikalavimai. 1 dalis. Keraminiai mūro gaminiai“ C priedą. Vandens įmirkis apskaičiuojamas pagal formulę:

$$W_h = \frac{m_s - m_d}{m_d} \cdot 100, \%, \quad (3.6)$$

čia m_s – įmirkusio vandenyje bandinio masė, g;
 m_d – sauso bandinio masė, g.

Vandens įmirkis vakuumuojant buvo nustatomas pagal specialią metodiką [113]. Išdžiovinti iki pastovios masės bandiniai buvo 60 min vakuumuojami sandariame eksikatoriuje esant 1 kgf/cm^2 liekamajam slėgiui. Po to bandiniai užpilami $(20-30)^\circ\text{C}$ vandeniu taip, kad būtų visiškai apsemti. Praėjus 30 min į sistemą įleidžiamas oras ir sistema vėl 30 min vakuumuojama. Procesas kartojamas keletą kartų. Po vakuumavimo bandiniai paliekami 24 h panardinti vonioje su vandeniu.

Efektyvusis poringumas iš esmės charakterizuoja keraminio bandinio efektyvųjų porų ir kapiliarų potencialą, t. y. tas poras ir kapiliarus, kurie lengvai užsipildo vandeniu. Bandinio efektyvusis poringumas (W_E) buvo apskaičiuojamas pagal formulę:

$$W_E = \left(\frac{m_1 - m}{m} \right) \cdot \rho \cdot 100, \%, \quad (3.7)$$

čia m_1 – normaliomis sąlygomis įmirkusio bandinio masė, g;
 m – išdžiovinto bandinio masė, g;
 ρ – bandinio tankis, g/cm^3 .

Bendrasis atviro poringumo rodiklis charakterizuoja visą atvirą susisiekiančią keraminio bandinio poringąją erdvę makrostruktūros ir mikrostruktūros požiūriu. Bendrasis bandinio poringumas (W_R) buvo apskaičiuojamas pagal formulę:

$$W_R = \left(\frac{m_2 - m}{m} \right) \cdot \rho \cdot 100, \% , \quad (3.8)$$

čia m_2 – vakuume įmirkyto pagal specialią metodiką bandinio masė, g;
 m – išdžiovinto bandinio masė, g;
 ρ – bandinio tankis, g/cm³.

Poringosios erdvės rezervas charakterizuoja rezervinių porų ir kapiliarų kieki, į kurios labai sunkiai įsiskverbia vanduo ar plastiškas ledas. Poringosios erdvės rezervas (R) buvo apskaičiuojamas pagal formulę:

$$R = \left(1 - \frac{W_E}{W_R} \right) \cdot 100, \% . \quad (3.9)$$

Sąlyginis porų ir kapiliarų sienelės storis (D) apskaičiuotas pagal formulę:

$$D = \frac{100 - W_R}{W_R}, \% . \quad (3.10)$$

Struktūros nevienalytiškumo laipsnis leidžia įvertinti efektyviųjų kapiliarų netolygumą pagal jų ekvivalentinį ilgį. Struktūros nevienalytiškumo laipsnis (N) buvo apskaičiuojamas pagal formulę:

$$N = \frac{h_{\max} - h_{\min}}{h_{\min}}, \quad (3.11)$$

čia $h_{\max}$ – didžiausia kapiliarinio pakilimo pagal sudrėkimo frontą reikšmė, mm;
 $h_{\min}$ – mažiausia kapiliarinio pakilimo pagal sudrėkimo frontą reikšmė, mm.

Kapiliarinis masės srauto greitis normaliomis sąlygomis šaldymo kryptimi (g_2) buvo apskaičiuojamas pagal formulę:

$$g_2 = \frac{m_3 - m}{S}, \text{ g/cm}^2 \cdot \text{h}, \quad (3.12)$$

čia m_3 – bandinio masė po jos pasiurbimo normaliomis sąlygomis šaldymo kryptimi, g;

m – išdžiovinto bandinio masė, g;
 S – bandinio darbinio paviršiaus plotas, cm^2 .

Kapiliarinis masės srauto greitis vakuume šaldymo kryptimi (G_2) ir jai statmena kryptimi (G_1) buvo apskaičiuojamas pagal formulę:

$$G_1(G_2) = \frac{m'_3(m'_4) - m}{S}, \text{ g/cm}^2 \cdot \text{h}, \quad (3.13)$$

čia $m'_3(m'_4)$ – bandinio masė po jos pasiurbimo vakuume šaldymo ir jai statmena kryptimis, g;

m – išdžiovinto bandinio masė, g;
 S – bandinio darbinio paviršiaus plotas, cm^2 .

Keraminių bandinių tyrimai neardomuoju metodu, pagal ultragarso sklidimo greitį, atlikti impulso greičio nustatymo prietaisu YK-14Π. Priešpriešinio perdavimo impulso greitis (V) apskaičiuotas pagal formulę:

$$V = \frac{L}{T}, \text{ m/s}, \quad (3.14)$$

čia L – kelio ilgis, mm;
 T – impulso sklidimo laikas, μs .

Bandinių atsparumas šalčiui nustatytas pagal LST 1272-92 „*Keraminės plytos. Techninės sąlygos*“, 3.8.2 p. tūrinio ir 3.8.3 p. vienpusio šaldymo–atšildymo būdais ir pagal LST 1985:2006 „*Keraminių mūro gaminių atsparumo šalčiui nustatymas*“ 6 p. vienpusio šaldymo–atšildymo būdu.

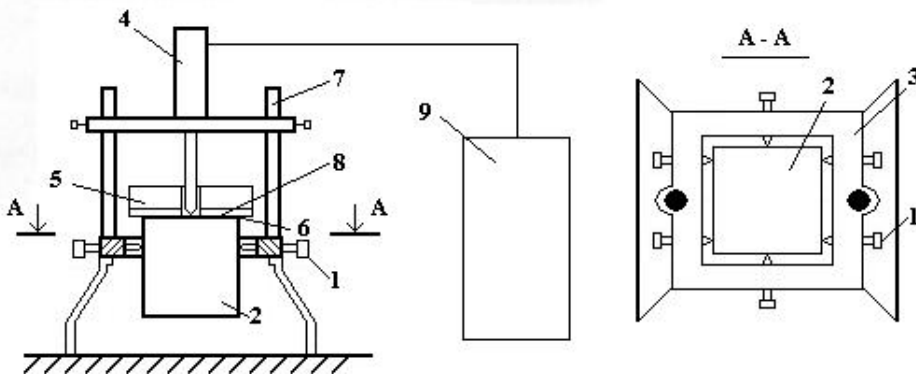
Keraminių bandinių deformacijos šaldant ir atšildant specialiu režimu [114] vienpusio šaldymo–atšildymo būdu buvo matuojamos dilatometriniu prietaisu DUM-01 (3.4 pav.). Keraminiai bandiniai buvo įmirkomi vandenyje 48 h, paskui iš šonų fiksuojami šešiais srieginiais laikikliais dilatometriniame prietaise, kuriame tiriamos plokštumos centre atremiamas deformacijų matavimo daviklis ir ant paviršiaus nuleidžiamas šaldytuvas. Šaldymo–atšildymo ciklai buvo atliekami pagal specialų režimą (3 šaldymo ir atšildymo ciklai per (7–8) h). Bandymo metu buvo matuojamas bandinio linijinis pailgėjimas ar susitraukimas (linijinė deformacija) bei nustatyti absoliutieji deformaciniai rodikliai.

Rentgenografinių tyrimų metodu buvo atlikta išdegtų bandinių fazinė analizė. Naudoti difraktometrai DRON-2 ir DRON-7 (Rusija) (Cu anodas ir Ni

filtras). Užrašytos difraktogramos buvo šifruojamos lyginant gautas eksperimentines tarplokštuminių atstumų d ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$) ir linijų santykinio intensyvumo I/I_0 reikšmes su atitinkamomis reikšmėmis PDC kartotekoje bei mokslinėje literatūroje [115, 116].

Bandinių porų tūris ir skersmuo matuoti gyvsidabrinio porų matuokliu su programine įranga „Poremaster 33“.

Eksperimentų rezultatai apdoroti programiniu paketu „Microsoft Excel“, „Derive 5“ ir „STATISTICA 6.0“.



3.4 pav. Vienpusio šaldymo ir atšildymo dilatometrinio prietaiso schema:

- 1 – srieginiai laikikliai; 2 – tiriamasis bandinys su šilumos izoliacija aplink;
- 3 – pagrindas, 4 – deformacijos matavimo daviklis; 5 – šaldytuvas;
- 6 – temperatūros daviklis; 7 – kreipiamosios; 8 – bandinio šaldomas paviršius; 9 – deformacijų matavimo ir užrašymo įrenginys

3.4. Formavimo masių sudėtys ir eksperimentų planas

Keraminių mūro gaminių gamybos procesas susideda iš daugelio technologinių operacijų, kurių kiekviena turi tam tikrą poveikį galutinei gaminių kokybei. Išnagrinėti visų technologinių veiksmų poveikį gaminių savybėms bei jų tarpusavio sąveiką yra sudėtinga, brangi ir daug darbo sąnaudų reikalaujanti operacija. Tam tikslui galima naudoti specialius statistinius metodus ir priemones, kurie leidžia labai sumažinus eksperimentų skaičių, pakankamai skaidriai ir objektyviai išnagrinėti technologinių veiksmų

tarpusavio sąveiką ir poveikį gaminių kokybinėms charakteristikoms ir surasti jų geriausias vertes [117–119].

Keraminiai bandiniai pagaminti pagal dviejų lygių daugiafaktorinius eksperimentų planus. Pasirinkti 6 technologiniai veiksniai, kai aukščiausia degimo temperatūra 1000 °C, ir 8 technologiniai veiksniai, kai aukščiausia degimo temperatūra 1070 °C, kintantys dviejuose lygiuose (3.12 ir 3.13 lentelės), kurie sąlyginai užkoduoti: –1 (sąlyginai blogas) ir 1 (sąlyginai geras). Pilno plano atveju eksperimentų, kurie leistų ištirti visų veiksnų sąveiką, skaičius būtų $N = 2^6 = 64$ ir $N = 2^8 = 256$, o pasinaudojant daliniu planu [117, 118] eksperimentų skaičius buvo sumažintas abiem planams iki 16 bandymų.

3.12 lentelė. Laboratorinių bandymų veiksnų kodavimo lentelė

Žymuo	Veiksny	Sąlyginai blogas lygis (–1)	Sąlyginai geras lygis (+1)
x_1	Molis (Tauragės arba Tauragės + Ukmergės)	Tauragės ($P^* = 19,2$)	Tauragės + Ukmergės (20 % nuo Tauragės molio masės) ($P^* = 9,9$)
x_2	Liesinantieji priedai (smėlis + skaldelė)	8 % (5 % smėlio + 3 % skaldelės)	26 % (18 % smėlio + 8 % skaldelės)
x_3	Išdegantysis priedas (antracitas)	0 %	1,2 %
x_4	Atliekiniai priedai (katalizatorius + stiklas)	0 %	22,8 % (6 % katalizatoriaus + 16,8 % stiklo)
x_8	Išlaikymo aukščiausioje degimo temperatūroje (1 000 °C) trukmė	1 h	5 h
x_9	Aušinimo režimas	Greitasis (0,83–1,17 °C/min) (3.2 pav.)	Lėtasis (0,33–0,83 °C/min) (3.2 pav.)

* P – vidutinis plastiškumo skaičius.

3.13 lentelė. *Artimų gamybinėms sąlygoms bandymų veiksnų kodavimo lentelė*

Žymuo	Veiksny	Sąlyginai blogas lygis (–1)	Sąlyginai geras lygis (+1)
x_1	Molis (Tauragės arba Tauragės + Ukmergės)	Tauragės (P* = 19,2)	Tauragės + Ukmergės (20 % nuo Tauragės molio masės) (P* = 9,9)
x_2	Liesinantieji priedai (smėlis + skaldelė)	8 % (5 % smėlio + 3 % skaldelės)	26 % (18 % smėlio + 8 % skaldelės)
x_3	Išdegantysis priedas (antracitas)	0 %	1,2 %
x_4	Atliekiniai priedai (katalizatorius + stiklas)	0 %	22,8 % (6 % katalizatoriaus + 16,8 % stiklo)
x_5	Sumaišymo trukmė Z tipo maišyklėje	5 min	15 min
x_6	Išretinimo gylis juostinio preso vakuumo kameroje	0,065 MPa	0,090 MPa
x_7	Suspaudimo laipsnis formavimo galvutėje	Trumpa formavimo galvutė suspaudimo laipsnis (12 kg/cm ²)	Ilgą formavimo galvutę suspaudimo laipsnis (18 kg/cm ²)
x_8	Išlaikymo aukščiausioje degimo temperatūroje (1070 °C) trukmė	1 h	5 h

* P – vidutinis plastiškumo skaičius.

Parenkant technologinius veiksnus ir jų lygius, buvo remtasi literatūros šaltiniais ir eksperimentų planavimo dviejų lygių daugiafaktorinio plano ypatumais [31].

Tauragės telkinio molis pasirinktas kaip vienas iš dispersiškiausių ir plastiškiausių molių, jis yra šiuo metu eksploatuojamas. Ukmergės molio priedas pasirinktas kaip vienas iš mažiausiai dispersiškų ir plastiškų molių.

Liesinančiųjų, išdegančiojo ir atliekinių priedų kiekiai parinkti atsižvelgiant į ankstesnį Termoizoliacijos instituto mokslininkų sukaupą gamybinį patyrimą [31].

Ilginant sumaišymo trukmės laiką nuo 5 min iki 15 min, didėja formavimo mišinio homogeniškumo laipsnis. Tai atitinka papildomos technologinės

įrangos (molio purentuvų, drožtuvų, valcų ir kt.) panaudojimui gamybinėmis sąlygomis siekiant kuo geriau paruošti žaliavas formavimui.

Išretinimo gylio juostinio vakuumo preso kameroje ir suspaudimo laipsnio formavimo galvutėje veiksmų lygiai pasirinkti siekiant įvertinti jų poveikį gaminių savybėms ir jų įtakos dydį palyginti su kitais veiksniais.

Aukščiausia degimo temperatūra pasirinkta atsižvelgiant į pasirinktų molio savybes, šiuo metu Lietuvos keramikos įmonėse naudojamą ir įmanomą pasiekti bei į reikiamą gaminti aukštų eksploatacinių savybių keraminius mūro gaminius pagal Lietuvos mokslininkų patyrimą kuriant „sukepusiąją“ keramiką [35–37].

Pagal sudarytas randomizuotas eksperimentų matricas (3.14 ir 3.15 lentelės) buvo pagaminti keraminiai bandiniai bei nustatytos jų fizikinės ir mechaninės savybės. Eksperimentų rezultatai apdoroti naudojant eksperimentų planavimo programinį paketą [120], taikant atsitiktinio balanso metodą [121].

Daugiafaktorinio eksperimento regresijos lygtys pateiktos dažniausiai pasitaikančios nepilnos kvadratinės lygties pavidalu:

$$y = b_0 + b_1x_1 + \dots + b_nx_n + \dots + b_{12}x_1x_2 + \dots + b_{mn}x_mx_n, \quad (3.15)$$

čia y – rodiklis;

b_0 – bendrasis vidutinis koeficientas;

$b_1, \dots, b_n, \dots, b_{12}, \dots, b_{mn}$ – pirmosios ir antrosios eilės poveikio koeficientai;

$x_1, \dots, x_n, x_1, \dots, x_m$ – užkoduoto veiksnio lygis (–1 arba 1).

Sudarytose regresijos modelio lygtyse, kurios aprašo nagrinėtųjų technologinių veiksmų ir kokybinių rodiklių ryšį, esantys koeficientai atrinkti, kai statistinio reikšmingumo lygmuo $p \leq 0,05$ (t. y. galimybę suklysti $\leq 5\%$).

Atrankinių dispersijų vienaarūšiškumas buvo tikrinamas pagal Kohreno kriterijų [122]. Jeigu apskaičiuotas Kohreno kriterijus mažesnis už lentelės – dispersijos vienaarūšės.

$$G = \frac{s_{\max}^2}{\sum_{i=1}^N s_i^2}, \quad (3.16)$$

čia G – Kohreno kriterijus;

s – dispersija.

3.14 lentelė. *Laboratorinių bandymų eksperimentų matrica*

Bandinių partijos Nr.	Molis (x_1)	Liesinantieji priedai, % (x_2)	Išdegantysis priedas, % (x_3)	Atliekiniai priedai, % (x_4)	Išlaikymo aukščiausioje degimo temperatūroje trukmė, h (x_8)	Aušinimo režimas (lėtasis/greitis) (x_9)
1	Tauragės	8	0	22,8	1	Lėtasis
2	Tauragės	26	0	22,8	5	Greitis
3	Tauragės + Ukmergės	26	0	22,8	1	Greitis
4	Tauragės + Ukmergės	8	0	0	5	Greitis
5	Tauragės	26	1,2	22,8	1	Lėtasis
6	Tauragės	26	0	0	5	Lėtasis
7	Tauragės	8	0	0	1	Greitis
8	Tauragės	8	1,2	0	5	Lėtasis
9	Tauragės + Ukmergės	26	0	0	1	Lėtasis
10	Tauragės + Ukmergės	8	0	22,8	5	Lėtasis
11	Tauragės + Ukmergės	26	1,2	0	5	Greitis
12	Tauragės + Ukmergės	26	1,2	22,8	5	Lėtasis
13	Tauragės + Ukmergės	8	1,2	22,8	1	Greitis
14	Tauragės + Ukmergės	8	1,2	0	1	Lėtasis
15	Tauragės	8	1,2	22,8	5	Greitis
16	Tauragės	26	1,2	0	1	Greitis

3.15 lentelė. *Artimų gamybinėms sąlygoms bandymų eksperimentų matrica*

Bandinių partijos Nr.	Molis (x_1)	Liesinantieji priedai, % (x_2)	Išdegantysis priedas, % (x_3)	Atliekiniai priedai, % (x_4)	Sumaišymo trukmė, min (x_5)	Išretinimo gylio presu vakuumo kameroje, MPa (x_6)	Suspaudimo laipsnis formavimo galvutėje, kg/cm ² (x_7)	Išlaikymo aukščiausioje degimo temperatūroje trukmė, h (x_8)
1	Tauragės	8	0	22,8	15	0,065	18	5
2	Tauragės	26	0	22,8	15	0,09	12	1
3	Tauragės + Ukmergės	26	0	22,8	15	0,09	18	1
4	Tauragės + Ukmergės	8	0	0	15	0,065	12	5
5	Tauragės	26	1,2	22,8	15	0,065	18	1
6	Tauragės	26	0	0	5	0,065	12	5
7	Tauragės	8	0	0	15	0,09	12	5
8	Tauragės	8	1,2	0	5	0,09	18	5
9	Tauragės + Ukmergės	26	0	0	5	0,065	18	5
10	Tauragės + Ukmergės	8	0	22,8	5	0,065	12	1
11	Tauragės + Ukmergės	26	1,2	0	5	0,09	12	1
12	Tauragės + Ukmergės	26	1,2	22,8	5	0,065	18	1
13	Tauragės + Ukmergės	8	1,2	22,8	5	0,09	18	1
14	Tauragės + Ukmergės	8	1,2	0	15	0,065	12	1
15	Tauragės	8	1,2	22,8	5	0,09	12	5
16	Tauragės	26	1,2	0	15	0,09	18	5

Eksperimentinių bei apskaičiuotų duomenų adekvatumas buvo lyginamas pagal Fišerio kriterijų, esant reikšmingumo lygiui $\alpha = 5\%$ [122].

$$F = \frac{s_{ad}^2}{s_{reprod}^2}, \quad (3.17)$$

čia s_{ad}^2 – adekvatumo dispersija;

s_{reprod}^2 – reproduktyviškumo (atkuriamumo) dispersija.

Koduotos (bematės) lygtys, naudojamos veiksnių, matuojamų skirtingais vienetais, lygties koeficientų tarpusavio palyginimui ir analizei, iškoduojamos į natūrines lygtis. Šiose natūrinėse lygtyse veiksniai įgauna tas reikšmes, kuriomis ir matuojami, išskyrus veiksnius, kurie išreiškiami kokybiniais, o ne kiekybiniais vienetais. Užkoduotų veiksnių lygiams perskaičiuoti į natūrines reikšmes naudota lygtis:

$$x_i = \frac{(X_i - X_{i0})}{\Delta X_i}, \quad (3.18)$$

čia x_i – užkoduota i-ojo veiksnio reikšmė;

X_i – natūrinė veiksnio reikšmė;

X_{i0} – nulinis lygis;

ΔX_i – veiksnio variacijos intervalas.

i-tojo veiksnio įnašas PC_i parodo reikšminio veiksnio poveikio dydį procentais nuo bendrojo visų reikšminių veiksnių poveikio apskaičiuotas pagal [123]:

$$PC_i = \frac{100(MS_i - MS_{pkl})}{SS_T}, \quad (3.19)$$

čia MS_i – i-ojo veiksnio kvadratų vidurkis;

MS_{pkl} – kvadratų vidurkio paklaida;

SS_T – bandymo rezultatų bendroji kvadratų suma.

Taikant regresinę analizę, koreliacijos tarp kintamųjų stiprumas įvertintas pagal koreliacijos koeficiento R skaitines reikšmes. Modelio tinkamumas buvo įvertintas pagal determinacijos koeficientą R^2 . Didesnis determinacijos koeficientas reiškia, kad gautos nagrinėjamų savybių reikšmės labiau koncentruojasi apie mažiausių kvadratų metodą gautą tiesę. Praktiškai taikant

regresinę analizę, reikalaujama, kad $R^2 \geq 0,25$. Jeigu $R^2 < 0,25$ – labai abejotina, ar tiesinės regresijos modelis tinka [124].

Taip pat buvo vertinamas teorinių reikšmių nukrypimo matas nuo eksperimentinių reikšmių: vidutinis kvadratinis nuokrypis s_e apibrėžiamas kaip kvadratinė šaknis iš normuotos klaidų nuokrypio kvadratų sumos [125].

Technologinių veiksnių poveikio keraminių mūro gaminių fizikinėms ir mechaninėms savybėms tyrimai

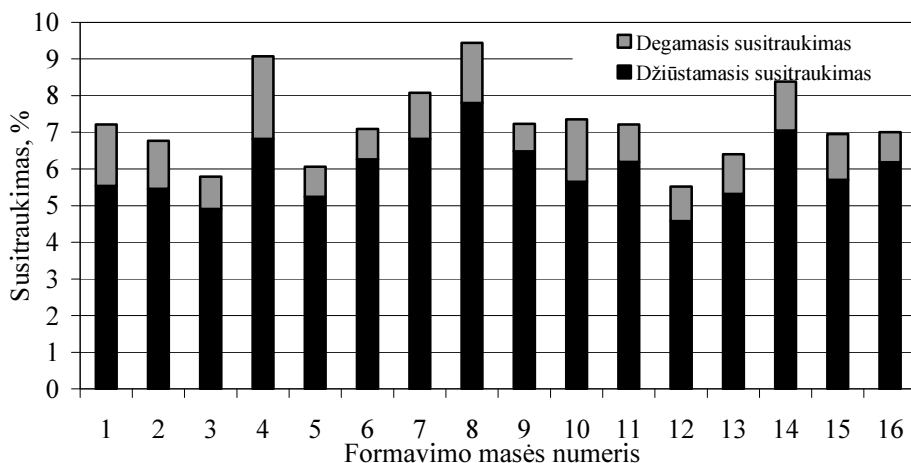
4.1. Keraminių bandinių, išdegtų 1 000 °C temperatūroje, tyrimai

Džiūstamasis ir degamasis susitraukimas. Gaminio tūrio sumažėjimo pasišalinant drėgniui priežastis – paviršutinių įtempių jėgos, kurios priverčia suartėti masės daleles pasišalinant vandens plėvelėms esančioms tarp jų. Be to, susitraukimas gali vykti ir dėl paties molingojo mineralo dalelių tūrio mažėjimo. Susitraukimo reiškiniai vyksta pasišalinant ne visam išgaruojančio vandens tūriui, todėl yra išskiriami du vandens tipai drėgname pusgaminyje: laisvas ir higroskopinis. Laisvas vanduo džiovinant pašalinama pirmiausiai ir šis procesas lydimas pusgaminio tūrio sumažėjimu, higroskopinis vanduo pašalinamas iš gaminio adsorbcinėmis ir kapiliarinėmis jėgomis vėliausiai ir nesukelia pusgaminio tūrio sumažėjimo. Kiekvienam gaminio tipui saugus džiovinimo režimas priklauso nuo džiovinamos masės savybių (liesinančiųjų priedų kiekio, jų dispersiškumo, molio jautrio džiovinimui), keraminės masės formavimo

būdo, gaminių matmenų ir džiovinimo tipo. Statybinės keramikos gaminiams žymaus džiūstamojo susitraukimo riba yra 8–12 % [59].

Degamasis susitraukimas vyksta dėl fizikinių ir cheminių procesų, vykstančių keraminėje masėje jai degant. Todėl, ji sukepa, atskiri grūdėliai susilieja į monolitą ir išdegtas gaminys susitraukia.

Pagal eksperimentų planą (3.14 lentelė) pagamintų keraminių bandinių vidutinis džiūstamasis susitraukimas kinta 4,6–7,8 %, o degamasis susitraukimas 0,8–2,3 % ribose (4.1 pav.).



4.1 pav. Vidutinis keraminių šukių džiūstamasis ir degamasis susitraukimas

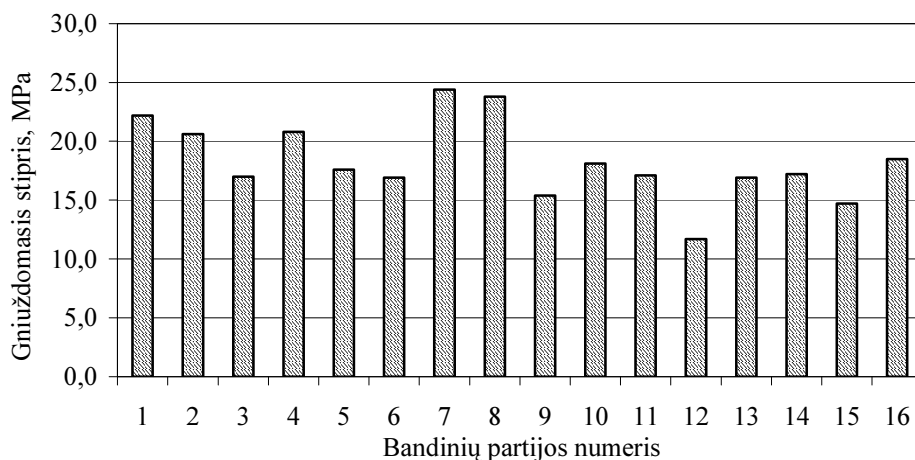
Nustatyta, kad didžiausią poveikį džiūstamajam susitraukimui turi liesinančiųjų ir atliekinių priedų kiekiai. Didinant formavimo masėje minėtųjų priedų kiekius, mažėja susitraukimas (2, 3, 5, 12 partija), ir atvirkščiai, mažas jų kiekis didina susitraukimą (4, 7, 8 ir 14 partijos). Degamajam susitraukimui didžiausią poveikį turėjo liesinančiųjų priedų kiekis ir išlaikymo aukščiausioje degimo temperatūroje trukmė. Didinant liesinančiųjų priedų kiekį, degamasis susitraukimas mažėja. Ilginant išlaikymo trukmę nuo 1 h iki 5 h, degamasis susitraukimas mažėja. Didžiausias degamasis susitraukimas nustatytas 4 formavimo masei – 2,25 %, o mažiausias 16 formavimo masei – 0,82 %.

Vertinant pagal bendrąjį susitraukimą, labiausiai po džiovinimo susitraukė 8 partijos – 9,3 %, o mažiausiai 12 partijos bandiniai – 5,5 %.

Vertindami džiūstamojo ir degamojo susitraukimo ryšį su nagrinėtais technologiniais veiksniais, išskyrėme veiksmingiausius veiksnius, tačiau

adekvačių lygčių, esant statistinio reikšmingumo lygmeniui $p \leq 0,05$, nesudarėme.

Gniuždomasis stipris. Pagal eksperimentų planą (3.14 lentelė) pagamintų keraminių bandinių vidutinis gniuždomasis stipris (R_{gn}) kinta 11,7–24,4 MPa ribose (4.2 pav.). Keisdami šešių technologinių veiksnių lygius, gavome 12,7 MPa gniuždomojo stiprio kitimo intervalą.



4.2 pav. Keraminių bandinių, išdegtų 1 000 °C temperatūroje, vidutinis gniuždomasis stipris

Atlikę nustatytų keraminių bandinių gniuždomojo stiprio reikšmių analizę, sudarėme regresijos lygtį 4.1, kuri aprašo nagrinėtų technologinių veiksnių poveikį keraminių bandinių gniuždomajam stipriui. Eksperimentinių ir apskaičiuotų duomenų adekvatumą palyginus pagal Fišerio kriterijų, kai reikšmingumo lygis $\alpha = 5 \%$, nustatyta, kad regresijos lygtis yra adekvati. 4.1 lygties natūrinė išraiška pateikiama 4.2 lygtyje.

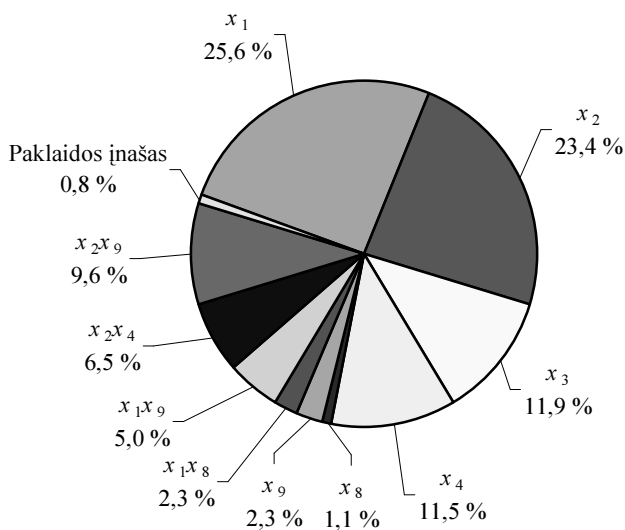
$$R_{gn} = 18,3 - 1,53 x_1 - 1,46 x_2 - 1,12 x_3 - 0,96 x_4 - 0,34 x_8 - 0,44 x_9 + 0,49 x_1 x_8 - 0,73 x_1 x_9 + 0,83 x_2 x_4 - 1,01 x_2 x_9; \quad (4.1)$$

$$R_{gn} = 25,22 - 2,27 X_1 - 0,25 X_2 - 1,87 X_3 - 0,22 X_4 - 0,17 X_8 + 0,57 X_9 + 0,25 X_1 X_8 - 0,73 X_1 X_9 + 0,0081 X_2 X_4 - 0,089 X_4 X_9. \quad (4.2)$$

Pagal (4.1) lygties bendrojo vidutinio koeficiento reikšmę matyti, kad keraminių bandinių, išdegtų 1 000 °C degimo temperatūroje, vidutinis

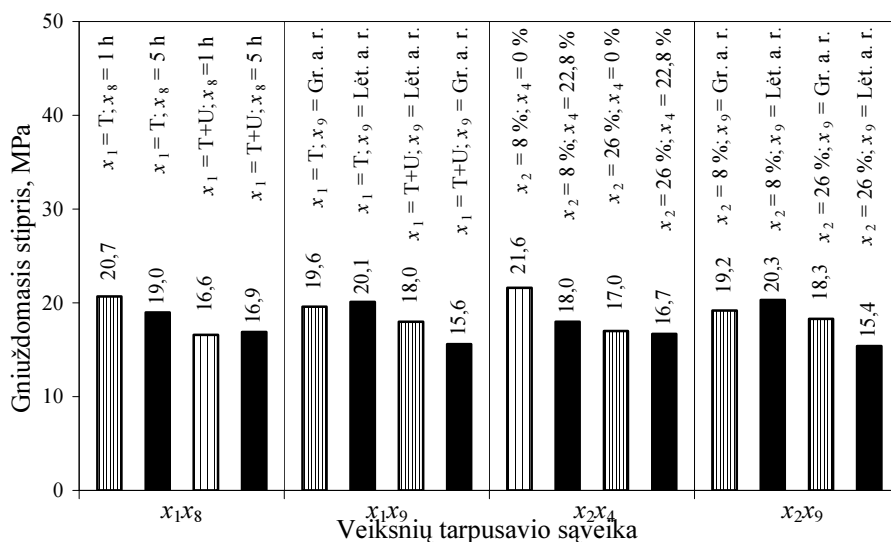
gniuždomasis stipris – 18,3 MPa. Atsižvelgiant į naudojamų technologinių veiksnių lygius jį galima padidinti arba sumažinti. Didžiausias vidutinis gniuždomasis stipris – 24,4 MPa nustatytas 7 partijos bandiniams suformuotiems iš Tauragės telkinio molio su 8 % liesinančiuoju priedu, išlaikius aukščiausioje degimo temperatūroje 1 h, aušinant greituoju aušinimo režimu. Mažiausias gniuždomasis stipris – 11,7 MPa nustatytas 12 partijos bandiniams, suformuotiems iš Tauragės telkinio molio su 20 % Ukmergės telkinio molio priedu, 26 % liesinančiojo priedo, 1,2 % išdegančiojo priedo, 22,8 % atliekinio priedo, išlaikius aukščiausioje degimo temperatūroje 5 h, aušinant lėtuoju aušinimo režimu.

Gniuždomojo stiprio kitimą reikšmingai veikė visi nagrinėtieji technologiniai veiksniai, tačiau didžiausią įnašą darė formavimo masės komponentai (4.3 pav.). Išlaikymo aukščiausioje degimo temperatūroje trukmė ir aušinimo režimas veikia nedaug.



4.3 pav. Technologinių veiksnių įnašas gniuždomajam stipriui: x_1 – molis; x_2 – liesinantieji priedai; x_3 – išdegantysis priedas; x_4 – atliekiniai priedai; x_8 – išlaikymo aukščiausioje degimo temperatūroje trukmė; x_9 – aušinimo režimas

Panaudoto mažiau plastiško 20 % Ukmergės molio priedo neigiamas įnašas gniuždomajam stipriui – 25,6 %. Iš molio ir išlaikymo aukščiausioje degimo temperatūroje trukmės (x_1x_8) bei aušinimo režimų (x_1x_9) sąveikos matyti (4.4 pav.), kad išlaikymo aukščiausioje degimo temperatūroje trukmė ir aušinimo režimas gniuždomąjį stiprį veikia nedaug, didesnis yra molio žaliavos poveikis.



4.4 pav. Lygties 4.1 veiksnių tarpusavio sąveikos poveikis gniuždomajam stipriui: x_1 – molis (T – Tauragės; T+U – Tauragės + Ukmergės); x_2 – liesinantys priedai, %; x_4 – atliekiniai priedai, %; x_8 – išlaikymo aukščiausioje degimo temperatūroje trukmė, h; x_9 – aušinimo režimas (Gr.a.r. – greitas aušinimo režimas; Lėt.a.r. – lėtas aušinimo režimas)

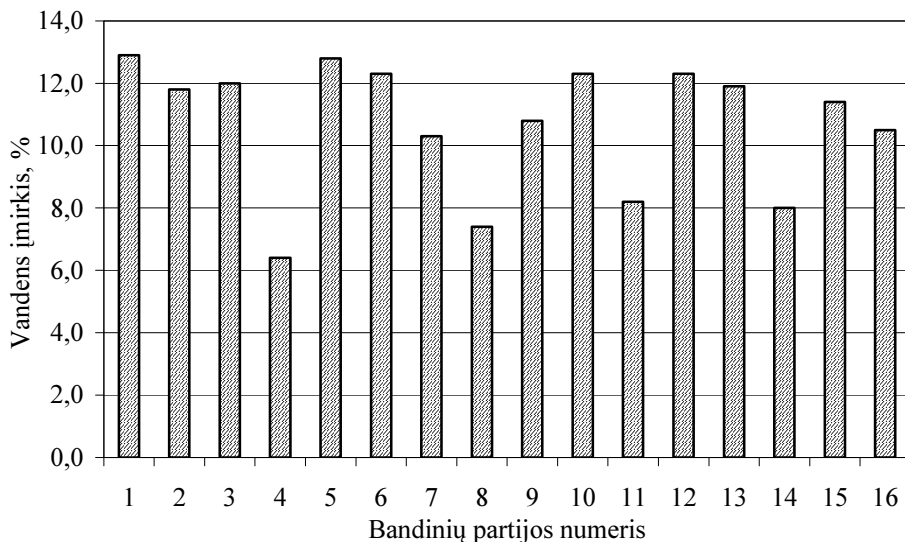
Liesinančiųjų priedų (x_2) kiekio formavimo mišinyje didinimas nuo 8 % iki 26 % neigiamai veikia gniuždomąjį stiprį. Jų įnašas gniuždomajam stipriui – 23,4 %. Kai į formavimo masę dedama 8 % liesinančiojo priedo, tai vidutinis gniuždomasis stipris – 19,8 MPa, kai 95 % pasikliautinis intervalas – [16,8; 22,7] MPa, o su 26 % liesinančiojo priedo vidutinis gniuždomasis stipris – 16,8 MPa, kai 95 % pasikliautinimo intervalas – [14,7; 18,9] MPa. Iš liesinančiųjų priedų ir aušinimo režimo (x_2x_9) veiksnių sąveikos, kurios įnašas gniuždomajam stipriui $\pm 9,6$ %, matyti, kad su 8 % liesinančiojo priedo

aušinimo režimo poveikis nedidelis, o su 26 % liesinančiojo priedo aušinimo režimo poveikis padidėja (4.4 pav.).

Didinant išdegančiojo priedo (x_3) kiekį nuo 0 % iki 1,2 %, gniuždomasis stipris sumažėja 11,9 %. Šio priedo neigiamo poveikio priežastys gniuždomajam stipriui yra aiškos, išdegantieji priedai dėl makro- ir mikrostruktūros pokyčių daugeliu atveju mažina gaminių mechanines savybes.

Atliekiniai priedai neigiamai veikia gniuždomąjį stiprį, jų įnašas $\pm 11,5\%$. 22,8 % šių priedų kiekis formavimo mišinyje sumažino vidutinę gniuždomojo stiprio reikšmę nuo 19,3 MPa iki 17,3 MPa, tačiau šių reikšmių pasikliautinieji intervalai gana platūs, kas parodo kitų veiksnių didelį poveikį naudojant juos su atliekiniais priedais. Atliekinų priedų sąveikos su kitais veiksniais (4.4 pav.) parodo, kad esant dideliame liesinančiųjų priedų kiekiui ir naudojant plastiškesnę molį galima sumažinti neigiamą atliekinų priedų poveikį, tai leistų juos utilizuoti nebloginant keraminių gaminių savybių.

Vandens įmirkis. Pagal eksperimentų planą (3.14 lentelė) pagamintų keraminių bandinių vidutinis įmirkis po 24 h (W_{24}) kinta 6,4–12,9 % ribose (4.5 pav.). Keisdami šešių technologinių veiksnių lygius, gavome 6,5 % vidutinio įmerkio kitimo intervalą.



4.5 pav. Keraminių bandinių, išdegtų 1 000 °C temperatūroje, vidutinis vandens įmirkis

Atlikę nustatytų keraminių bandinių vandens įmirkio reikšmių analizę, sudarėme regresijos lygtį 4.3, kuri aprašo nagrinėtų technologinių veiksnių poveikį keraminių bandinių vandens įmirkiui. Eksperimentinių ir apskaičiuotų duomenų adekvatumą palyginus pagal Fišerio kriterijų, kai reikšmingumo lygis $\alpha = 5\%$, nustatyta, kad regresijos lygtis yra adekvati. 4.3 lygties natūrinė išraiška pateikiama 4.4 lygtyje.

$$W_{24} = 10,71 - 0,47 x_1 + 0,63 x_2 - 0,39 x_3 + 1,47 x_4 - 0,44 x_8 + 0,39 x_9 - 0,26 x_1 x_3 + 0,42 x_1 x_4 - 0,22 x_1 x_9 - 0,58 x_2 x_4 + 0,32 x_2 x_9; \quad (4.3)$$

$$W_{24} = 8,00 - 0,63 X_1 + 0,13 X_2 - 0,65 X_3 + 0,23 X_4 - 0,22 X_8 - 0,21 X_9 - 0,43 X_1 X_3 + 0,037 X_1 X_4 - 0,22 X_1 X_9 - 0,0057 X_2 X_4 + 0,036 X_2 X_9. \quad (4.4)$$

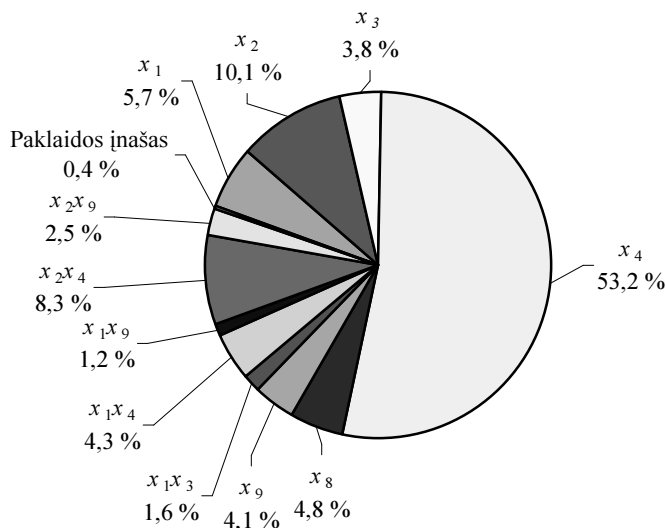
Pagal (4.3) lygties bendrojo vidutinio koeficiento reikšmę matyti, kad keraminių bandinių, išdegtų aukščiausioje 1 000 °C degimo temperatūroje, vidutinis vandens įmirkis – 10,71 %. Tačiau, atsižvelgiant į naudojamų technologinių veiksnių lygius, jį galima padidinti arba sumažinti. Mažiausias vidutinis vandens įmirkis – 6,4 % nustatytas 4 partijos bandiniams, suformuotiems iš Tauragės telkinio molio su 20 % Ukmergės telkinio molio priedu, 8 % liesinančiojo priedo, išlaikant aukščiausioje degimo temperatūroje 5 h, aušinant greituju aušinimo režimu. Didžiausias vandens įmirkis – 12,9 % nustatytas 1 partijos bandiniams, suformuotiems iš Tauragės telkinio molio su 8 % liesinančiuoju priedu, 22,8 % atliekinio priedo, degimas vyko išlaikant aukščiausioje degimo temperatūroje 1 h, aušinant lėtuju aušinimo režimu.

Įmirkio kitimui reikšmingą poveikį daro visi nagrinėtieji technologiniai veiksniai. Didžiausią įnašą – 53,2 % (4.6 pav.) daro atliekiniai priedai, tą patvirtino ir [128] darbo autorė. Minėtame darbe nurodyta, kad neigiamas naftos pramonės technogeninės žaliavos priedo poveikis vandens įmirkiui paaiškinamas jo mažu sukepimo laipsniu žemose temperatūrose.

Su atliekiniais priedais pagamintų keraminių bandinių vidutinis vandens įmirkis – 12,2 %, kai 95 % pasikliautinis intervalas – [11,8; 12,6] % yra labai siauras, o tai parodo, kad net naudojant teigiamai veikiančius technologinių veiksnių lygius 1 000 °C temperatūroje neįmanoma pagaminti gaminių su mažu vandens įmirkiu.

Nenaudojant atliekinų priedų sumažinti vandens įmirki galima mažinant liesinančių priedų kiekį formavimo mišinyje. Liesinančių priedų (x_2) kiekio nuo 26 % iki 8 % mažinimo įnašas vandens įmirkiui – 10,1 %. Panaudotas Tauragės telkinio molis su mažiau plastiško 20 % Ukmergės molio priedu mažina

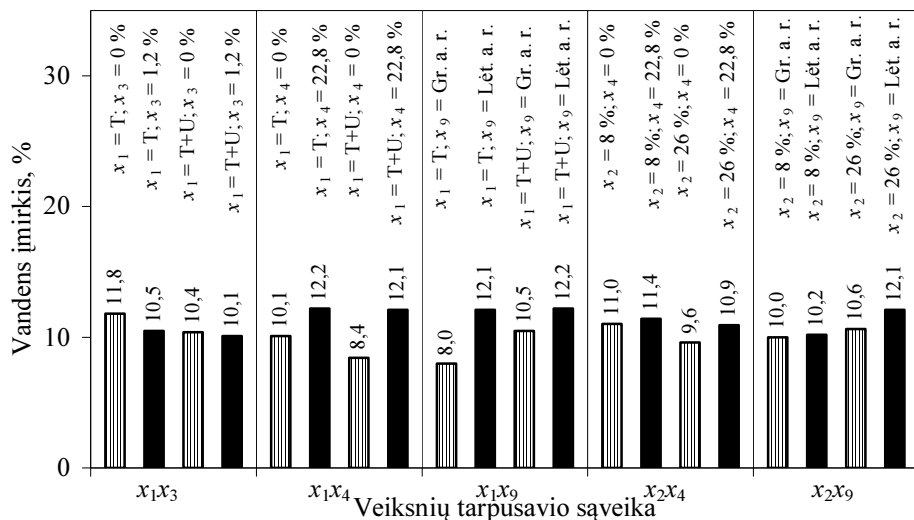
vandens įmirkį daugiau, nei vien tik Tauragės telkinio molis. Tai galima paaiškinti skirtingomis molių savybėmis: Ukmergės molio vandens įmirkis mažesnis už Tauragės molio, degant tose pačiose temperatūrose.



4.6 pav. *Technologinių veiksnių įnašas vandens įmirkiui: x_1 – molis; x_2 – liesinantieji priedai; x_3 – išdegantysis priedas; x_4 – atliekiniai priedai; x_8 – išlaikymo aukščiausioje degimo temperatūroje trukmė; x_9 – aušinimo režimas.*

Išdegančiojo priedo kiekio (x_3) didinimas nuo 0 % iki 1,2 %, nedaug sumažina vandens įmirkį. Tai matyti, ir iš (x_1x_3) veiksnių tarpusavio sąveikos (4.7 pav.). Manome, kad šis poveikis pasireiškė degimo metu susidarius redukcinei-oksidacinei aplinkai sudegant antracitui, todėl bandiniai su šiuo priedu daugiau sukepė, bet kadangi minėtojo priedo nedaug – tai ir poveikis nedidelis.

Išlaikymo aukščiausioje degimo temperatūroje trukmės (x_8) nuo 1 h iki 5 h didinimas teigiamai veikia vandens įmirkį ir sumažina jį 4,8 %.



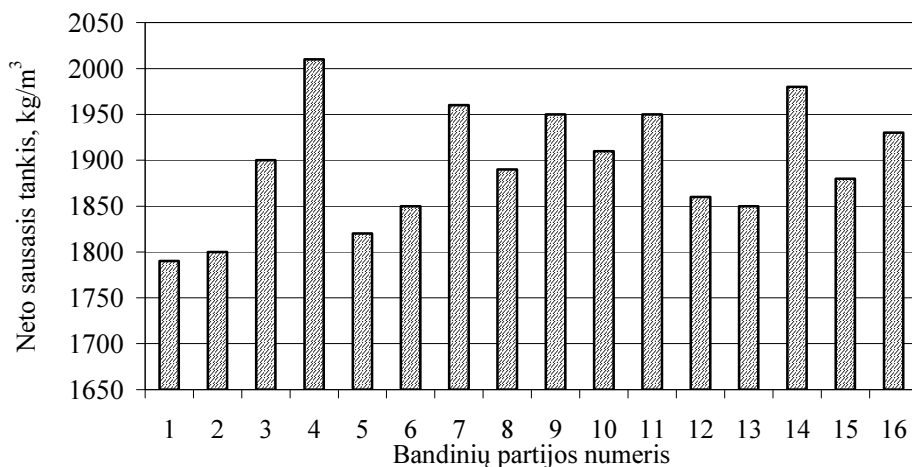
4.7 pav. Lygties 4.2 veiksnių tarpusavio sąveikos poveikis įmirkiui: x_1 – molis (T – Tauragės; $T + U$ – Tauragės + Ukmergės); x_2 – liesinantieji priedai, %; x_3 – išdegantysis priedas, %; x_4 – atliekiniai priedai, %; x_9 – aušinimo režimas (Gr.a.r. – greitis aušinimo režimas; Lėt.a.r. – lėtas aušinimo režimas)

Neto sausasis tankis. Pagal eksperimentų planą (3.14 lentelė) pagamintų keraminių bandinių vidutinis neto sausasis tankis (ρ) kinta 1 790–2 010 kg/m³ ribose (4.8 pav.) Keisdami šešių technologinių veiksnių lygius, gavome 220 kg/m³ vidutinio neto sausojo tankio kitimo intervalą.

Atlikę nustatytų keraminių bandinių neto sausojo tankio reikšmių analizę, sudarėme regresijos lygtį 4.5, kuri aprašo nagrinėtų technologinių veiksnių poveikį keraminių bandinių neto sausajam tankiui. Eksperimentinių ir apskaičiuotų duomenų adekvatumą palyginus pagal Fišerio kriterijų, kai reikšmingumo lygis $\alpha = 5\%$, nustatyta, kad regresijos lygtis yra adekvati. 4.5 lygties natūrinė išraiška pateikiama 4.6 lygtyje.

$$\rho = 1895,63 + 30,62 x_1 - 13,12 x_2 - 44,38 x_4 - 14,37 x_9 - 15,63 x_1x_3 + 8,13 x_1x_8 + 13,12 x_1x_9 + 6,88 x_2x_4; \quad (4.5)$$

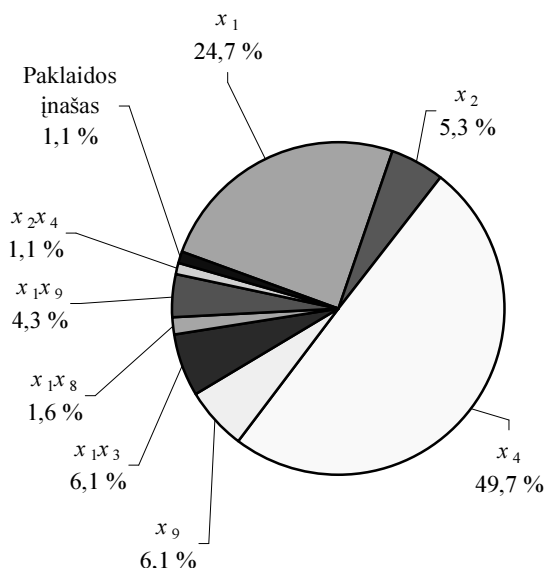
$$\rho = 1977,79 + 34,06 X_1 - 2,22 X_2 - 5,03 X_4 - 14,37 X_9 - 26,05 X_1 X_3 + 4,07 X_1 X_8 + 13,12 X_1 X_9 + 0,067 X_2 X_4. \quad (4.6)$$



4.8 pav. Keraminių bandinių, išdegtų 1 000 °C temperatūroje, vidutinis neto sausasis tankis

Pagal (4.5) lygties bendrojo vidutinio koeficiento reikšmę matyti, kad keraminių bandinių, išdegtų 1 000 °C degimo temperatūroje, vidutinis neto sausasis tankis 1 895,63 kg/m³. Tačiau priklausomai nuo naudojamų technologinių veiksnių lygių jis gali padidėti arba sumažėti. Didžiausias vidutinis neto tankis 2 010 kg/m³ nustatytas 4 partijos bandiniams suformuotiems iš Tauragės telkinio molio su 20 % Ukmergės telkinio molio priedu, 8 % liesinančiojo priedo, išlaikant aukščiausioje degimo temperatūroje 5 h, aušinant greituoju aušinimo režimu. Mažiausias vidutinis neto tankis 1 790 kg/m³ nustatytas 1 partijos bandiniams, suformuotiems iš Tauragės telkinio molio su 8 % liesinančiuoju priedu, 22,8 % atliekinio priedo, išlaikant aukščiausioje degimo temperatūroje 1 h, aušinant lėtuoju aušinimo režimu.

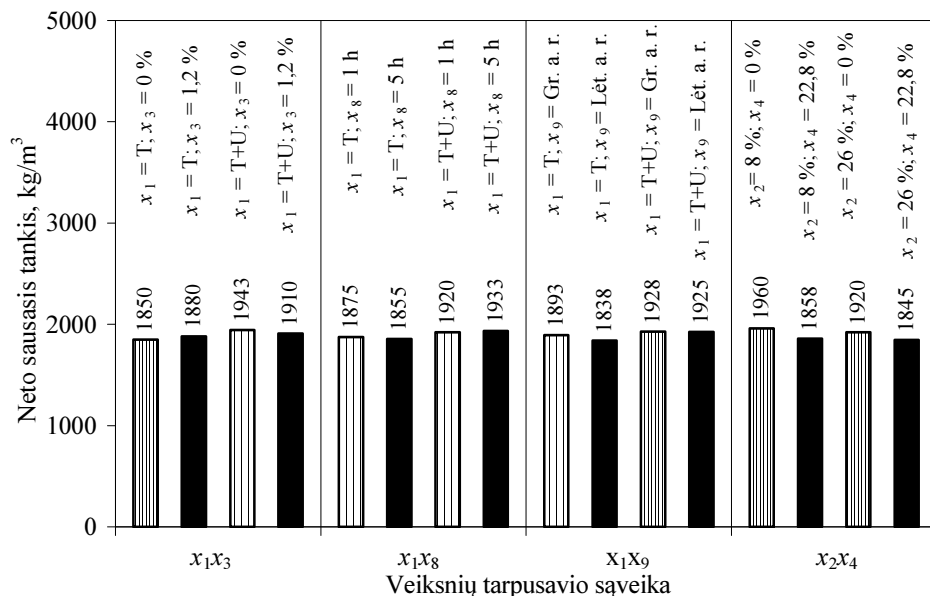
Neto sausojo tankio kitimą reikšmingai veikė visi nagrinėtieji technologiniai veiksniai. Didžiausią įnašą – 49,7 % (4.9 pav.) daro atliekiniai priedai. Su atliekiniais priedais pagamintų keraminių bandinių vidutinis neto sausasis tankis – 1 851,2 kg/m³, o be jų – 1 940 kg/m³.



4.9 pav. Technologinių veiksnių įnašas neto sausajam tankiui: x_1 – molis; x_2 – liesinantieji priedai; x_3 – išdegantysis priedas; x_4 – atliekiniai priedai; x_8 – išlaikymo aukščiausioje degimo temperatūroje trukmė; x_9 – aušinimo režimas

Panaudoto 20 % Ukmergės molio priedo teigiamas įnašas neto sausajam tankiui – 24,7 %. Molio veiksnio poveikis pasireiškia ir per tarpusavio sąveikas. Molio ir išdegančio priedo (x_1x_3) sąveikos įnašas neto sausajam tankiui – $\pm 6,1$ %. Naudojant Ukmergės telkinio molį didžiausias teigiamas poveikis gaunamas nenaudojant išdegančio priedo (4.10 pav.). Molio ir išlaikymo aukščiausioje degimo temperatūroje trukmės (x_1x_8) sąveikos įnašas neto sausajam tankiui – $\pm 1,6$ %. Norint didinti neto sausąjį tankį reikia naudoti 20 % Ukmergės molio priedą ir ilginti išlaikymo aukščiausioje degimo temperatūroje trukmę (4.10 pav.). Molio ir aušinimo režimo (x_1x_9) veiksnių sąveikos įnašas neto sausajam tankiui – $\pm 4,3$ %.

Liesinančių priedų (x_2) nuo 8 % iki 26 % kiekio didinimas neigiamai veikia neto sausąjį tankį. Didžiausias neto sausasis tankis gaunamas naudojant 8 % liesinančių priedų kiekį, Ukmergės molio priedą ir greitą aušinimo režimą bei nenaudojant atliekinių priedų (4.10 pav.).



4.10 pav. Lygties 4.3 veiksnių tarpusavio sąveikos poveikis neto sausajam tankiui: x_1 – molis (T – Tauragės; T + U – Tauragės + Ukmergės);

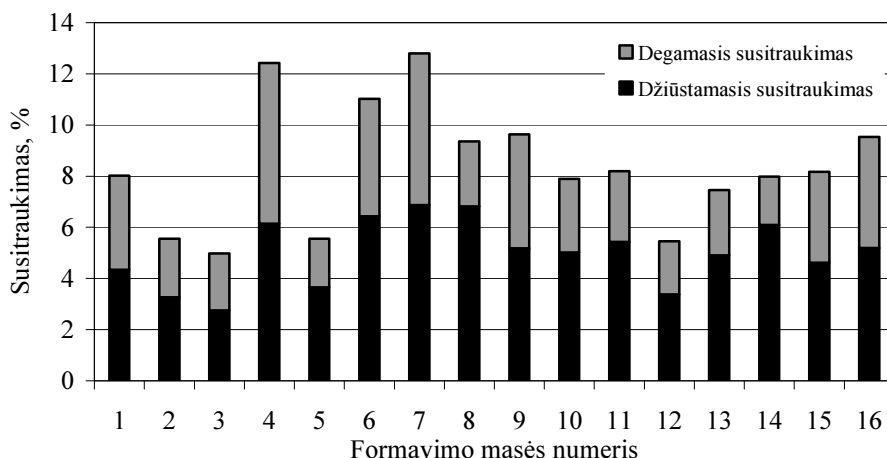
x_2 – liesinantieji priedai, %; x_3 – išdegantysis priedas, %; x_4 – atliekiniai priedai, %; x_8 – išlaikymo aukščiausioje degimo temperatūroje trukmė, h; x_9 – aušinimo režimas (Gr.a.r. – greitasis aušinimo režimas; Lėt.a.r. – lėtasis aušinimo režimas)

4.2. Keraminių bandinių, išdegtų 1 070 °C temperatūroje, tyrimai

Džiūstamasis ir degamasis susitraukimas. Pagal eksperimentų planą (3.15 lentelė) pusiau gamybinėmis sąlygomis pagamintų keraminių bandinių vidutinis džiūstamasis susitraukimas kinta 2,8–6,9 %, degamasis susitraukimas – 1,9–6,3 % ribose (4.11 pav.).

Nustatyta, kad didžiausią poveikį džiūstamajam susitraukimui turi liesinančių ir atliekinių priedų kiekiai. Didinant formavimo masėje minėtųjų priedų kiekius, mažėja susitraukimas (2, 3, 5, 12 partija), ir atvirkščiai, mažas jų kiekis didina susitraukimą (4, 7, 8 ir 14 partijos). Degamajam susitraukimui didžiausią poveikį turi išlaikymo aukščiausioje degimo temperatūroje trukmė.

Didinat išlaikymo trukmę nuo 1 h iki 5 h, degamasis susitraukimas sumažėja nuo 2,3 % iki 4,4 %. Didžiausias degamasis susitraukimas nustatytas 4 formavimo masei – 6,3 %, o mažiausias 5 ir 14 formavimo masei – 1,9 %.



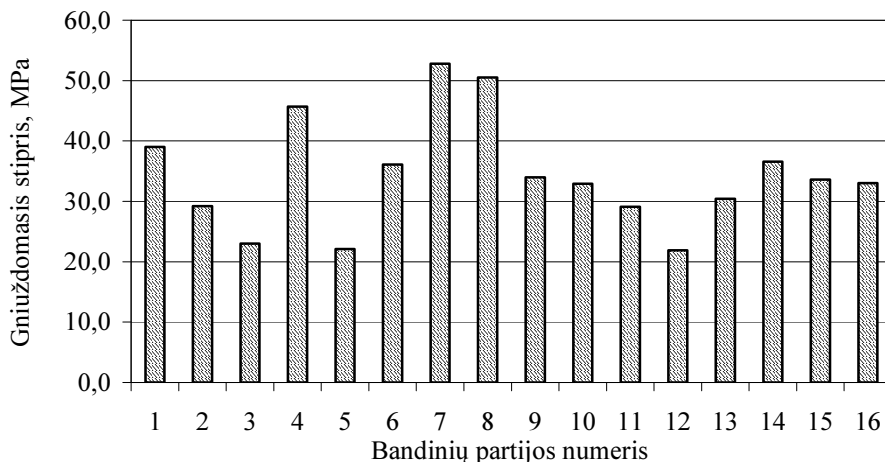
4.11 pav. Vidutinis keraminių šukių džiūstamasis ir degamasis susitraukimas

Vertinant pagal bendrąjį susitraukimą, labiausiai po džiovinimo susitraukė 7 partijos – 12,4 %, o mažiausiai 3 partijos bandiniai – 4,9 %.

Vertindami džiūstamojo ir degamojo susitraukimo ryšį su nagrinėtais technologiniais veiksniais, išskyrėme veiksmingiausius veiksnius, tačiau adekvačių lygčių, esant statistinio reikšmingumo lygmeniui $p \leq 0,05$, nesudarėme.

Gniuždomasis stipris. Pagal eksperimentų planą (3.15 lentelė) pagamintų keraminių bandinių vidutinis gniuždomasis stipris (R_{gn}) kinta 21,9–52,8 MPa ribose (4.2 pav.). Keisdami aštuonių technologinių veiksnių lygius, gavome 30,9 MPa gniuždomojo stiprio kitimo intervalą.

Atlikę nustatytų keraminių bandinių gniuždomojo stiprio reikšmių analizę, sudarėme regresijos lygtį 4.7, kuri aprašo nagrinėtųjų technologinių veiksnių poveikį keraminių bandinių gniuždomajam stipriui. Eksperimentinių ir apskaičiuotų duomenų adekvatumą palyginus pagal Fišerio kriterijų, kai reikšmingumo lygis $\alpha = 5 \%$, nustatyta, kad regresijos lygtis yra adekvati. 4.7 lygties natūrinė išraiška pateikiama 4.8 lygtyje.



4.12 pav. Keraminių bandinių, išdegtų 1 070 °C temperatūroje, vidutinis gniuždomasis stipris

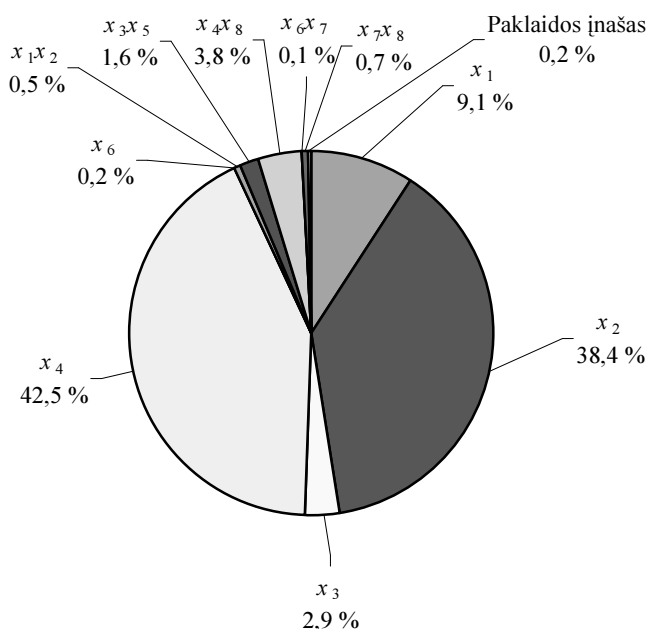
$$R_{gn} = 32,80 - 2,71 x_1 - 6,05 x_2 - 1,52 x_3 - 5,68 x_4 - 0,51 x_6 + 0,80 x_1 x_2 - 1,69 x_3 x_5 - 2,29 x_4 x_8 - 0,35 x_6 x_7 + 0,74 x_7 x_8, \quad (4.7)$$

$$R_{gn} = 42,47 - 4,22 X_1 - 0,67 X_2 + 3,10 X_3 - 0,20 X_4 + 0,34 X_5 + 99,20 X_6 + 0,35 X_7 - 0,71 X_8 + 0,089 X_1 X_2 - 0,56 X_3 X_5 - 0,10 X_4 X_8 - 9,33 X_6 X_7 + 0,12 X_7 X_8. \quad (4.8)$$

Pagal (4.7) lygties bendrojo vidutinio koeficiento reikšmę matyti, kad keraminių bandinių, išdegtų aukščiausioje 1 070 °C degimo temperatūroje, vidutinis gniuždomasis stipris – 32,80 MPa. Tačiau atsižvelgiant į naudojamų technologinių veiksnių lygius jį galima padidinti arba sumažinti. Didžiausias vidutinis gniuždomasis stipris 52,8 MPa nustatytas 7 partijos bandiniams, suformuotiems iš Tauragės telkinio molio su 8 % liesinančiuoju priedu, formavimo mišinį maišant maišyklėje 15 min, kai juostinio preso vakuumo kameroje išretinimo gylis yra 0,09 MPa, suspaudimo laipsnis formavimo galvutėje – 12 kg/cm², ir išlaikius aukščiausioje degimo temperatūroje 5 h. Mažiausias gniuždomasis stipris 21,9 MPa nustatytas 12 partijos bandiniams, suformuotiems iš Tauragės telkinio molio su 20 % Ukmergės telkinio molio priedu, 26 % liesinančiojo priedo, 1,2 % išdegančiojo priedo, 22,8 % atliekinio priedo, formavimo mišinį maišant maišyklėje 5 min, kai juostinio preso vakuumo kameroje išretinimo gylis yra 0,065 MPa ir suspaudimo laipsnis

formavimo galvutėje 18 kg/cm^2 , išlaikius aukščiausioje degimo temperatūroje 1 h.

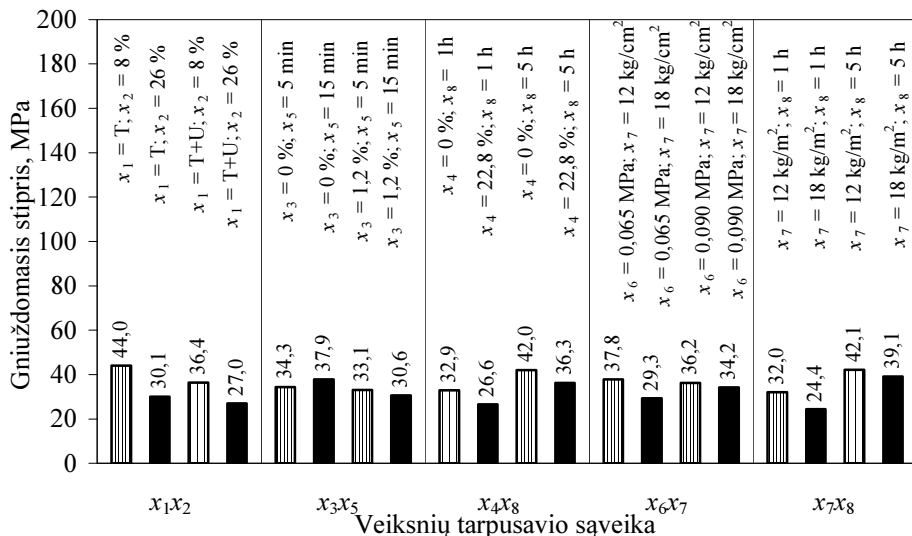
Gniuždomojo stiprio kitimą reikšmingai veikė visi nagrinėtieji technologiniai veiksniai, tačiau didžiausią įnašą darė formavimo masės komponentai, ypač atliekiniai ir liesinantieji priedai (4.13 pav.).



4.13 pav. Technologinių veiksnių įnašas gniuždomajam stipriui: x_1 – molis; x_2 – liesinantieji priedai; x_3 – išdegantysis priedas; x_4 – atliekiniai priedai; x_5 – sumaišymo trukmė; x_6 – išretinimo gylis juostinio preso vakuumo kameroje; x_7 – suspaudimo laipsnis formavimo galvutėje; x_8 – išlaikymo aukščiausioje degimo temperatūroje trukmė

Didžiausią neigiamą poveikį gniuždomajam stipriui daro atliekiniai priedai (x_4). Dedant į formavimo mišinį 22,8 % atliekinių priedų, neigiamas įnašas gniuždomajam stipriui sudaro net 42,5 %. Bandinių su atliekiniais priedais vidutinis gniuždomasis stipris yra 29,0 MPa. Sumažinti neigiamą atliekinių priedų poveikį galima didinant išlaikymo aukščiausioje degimo temperatūroje trukmę. Iš atliekinių priedų ir išlaikymo aukščiausioje degimo temperatūroje

trukmės (x_4x_8) sąveikos matyti, kad nepriklausomai nuo atliekinių priedų kiekio, ilginant išlaikymo aukščiausioje degimo temperatūroje trukmę, didėja ir gniuždomasis stipris (4.14 pav.).



4.14 pav. Lygties 4.4 veiksnių tarpusavio sąveikos poveikis gniuždomajam

stipriui: x_1 – molis (T – Tauragės; $T + U$ – Tauragės + Ukmergės);

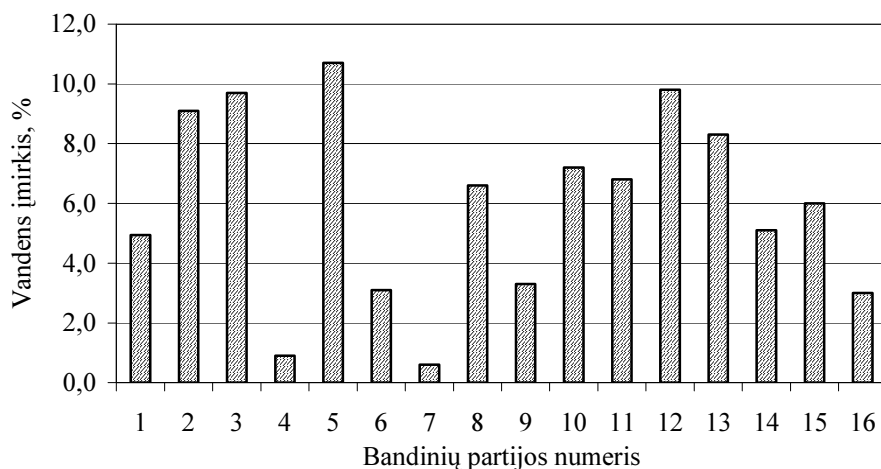
x_2 – liesinantieji priedai, %; x_3 – išdegantysis priedas, %; x_4 – atliekiniai priedai, %; x_5 – sumaišymo trukmė, min; x_6 – išretinimo gylis juostinio preso vakuumo kameroje, MPa; x_7 – suspaudimo laipsnis formavimo galvutėje, kg/cm^2 ; x_8 – išlaikymo aukščiausioje degimo temperatūroje trukmė, h

Formavimo mišinio liesinimo neigiamas poveikis matyti iš molio (x_1), liesinančiųjų priedų (x_2) bei jų tarpusavio sąveikos (x_1x_2) veiksnių (4.4 lygtis ir 4.14 pav.). Liesesnio 20 % Ukmergės molio priedo neigiamas įnašas gniuždomajam stipriui – 9,1 %, o liesinančiųjų priedų – net 38,4 %.

Kitų veiksnių poveikis – gerokai mažesnis, tačiau, siekiant pagaminti aukščiausių eksploatacinių savybių gaminius, būtina atsižvelgti ir į juos. Išdegančiojo priedo kiekio (x_3) didinimas nuo 0 % iki 1,2 % neigiamai veikia gniuždomąjį stiprį ir 2,9 % mažina jo reikšmę. Išretinimo gylio preso vakuumo kameroje ir suspaudimo laipsnio formavimo galvutėje poveikis matomas iš jų tarpusavio sąveikos (x_6x_7) (4.14 pav.). Naudojant mažesnį suspaudimo laipsnį, gniuždomojo stiprio reikšmės mažai priklauso nuo išretinimo gylio, o naudojant didesnį suspaudimo laipsnį (0,090 MPa), išretinimo gylis labiau veikia

gniuždomąją stiprį. Iš suspaudimo laipsnio formavimo galvutėje ir išlaikymo aukščiausioje degimo temperatūroje trukmės veiksnių (x_7x_8) sąveikos matyti, kad geriausiai formuoti gaminius su mažesniu 12 kg/cm^2 suspaudimo laipsniu, neatsižvelgiant į išlaikymo aukščiausioje degimo temperatūroje trukmę.

Vandens įmirkis. Pagal eksperimentų planą (3.15 lentelė) pagamintų keraminių bandinių vidutinis įmirkis po 24 h (W_{24}) kinta 0,6–10,7 % ribose (4.15 pav.) Keisdami aštuonių technologinių veiksnių lygius, gavome 10,1 % vidutinio įmirkio kitimo intervalą.



4.15 pav. Keraminių bandinių, išdegtų 1070°C temperatūroje, vidutinis vandens įmirkis

Atlikę nustatytų keraminių bandinių vandens įmirkio reikšmių analizę, sudarėme regresijos lygtį 4.9, kuri aprašo nagrinėtų technologinių veiksnių poveikį keraminių bandinių vandens įmirkiui. Eksperimentinių ir apskaičiuotų duomenų adekvatumą palyginus pagal Fišerio kriterijų, kai reikšmingumo lygis $\alpha = 5\%$, nustatyta, kad regresijos lygtis yra adekvati. 4.9 lygties natūrinė išraiška pateikiama 4.10 lygtyje.

$$W_{24} = 5,36 + 0,22 x_1 + 1,25 x_3 + 1,82 x_4 - 1,30 x_8 + 0,27 x_1x_5 - 0,66 x_1x_6 - 0,35 x_1x_8 + 0,08 x_2x_3 + 1,65 x_4x_5 - 0,61 x_4x_8 + 0,05 x_5x_7 - 0,10 x_7x_8; \quad (4.9)$$

$$W_{24} = 6,53 + 4,30 X_1 - 0,0089 X_2 + 1,83 X_3 - 0,05 X_4 - 0,38 X_5 + 0,017 X_7 - 0,0095 X_8 + 0,054 X_1 X_5 - 52,80 X_1 X_6 - 0,18 X_1 X_8 + 0,015 X_2 X_3 + 0,029 X_4 X_5 - 0,027 X_4 X_8 + 0,0033 X_5 X_7 - 0,017 X_7 X_8. \quad (4.10)$$

Pagal (4.9) lygties bendrojo vidutinio koeficiento reikšmę matyti, kad keraminių bandinių, išdegtų aukščiausioje 1 070 °C degimo temperatūroje, vidutinis įmirkis – 5,36 %. Tačiau, atsižvelgiant į naudojamų technologinių veiksnių lygius, jis gali padidėti arba sumažėti. Mažiausias vidutinis vandens įmirkis – 0,6 % nustatytas 7 partijos bandiniams, suformuotiems iš Tauragės telkinio molio su 8 % liesinančiuoju priedu, formavimo mišinį maišant maišyklėje 15 min, kai juostinio preso vakuumo kameroje išretinimo gylis yra 0,090 MPa, suspaudimo laipsnis formavimo galvutėje 12 kg/cm², išlaikymas aukščiausioje degimo temperatūroje – 5 h. Didžiausias vandens įmirkis – 10,7 % nustatytas 5 partijos bandiniams, suformuotiems iš Tauragės telkinio molio su 26 % liesinančiuoju priedu, 1,2 % išdegančiojo priedo, 22,8 % atliekinio priedo, formavimo mišinį maišant maišyklėje 15 min, kai juostinio preso vakuumo kameroje išretinimo gylis – 0,065 MPa, suspaudimo laipsnis formavimo galvutėje – 18 kg/cm², išlaikymas aukščiausioje degimo temperatūroje – 1 h.

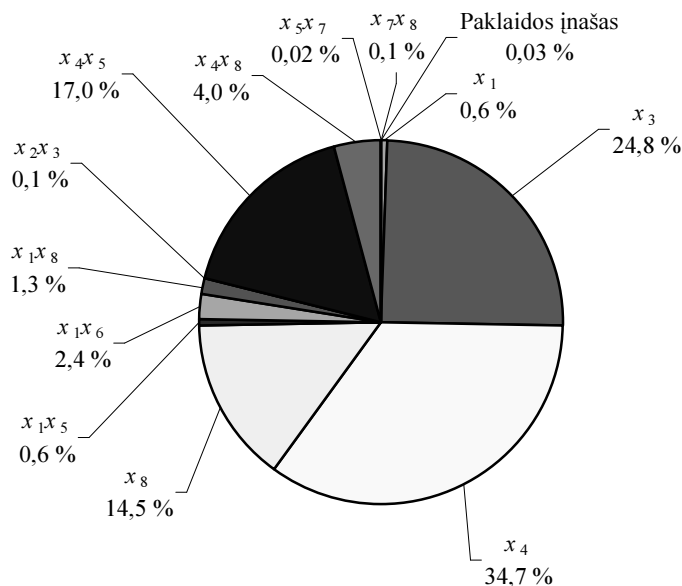
Įmirkio kitimui reikšmingą poveikį daro visi nagrinėtieji technologiniai veiksniai. Didžiausią įnašą – 34,7 % (4.16 pav.) daro atliekiniai priedai. Atliekinių priedų 22,8 % kiekis padidina įmirkį nuo 3,7 % iki 8,2 %. Šio veiksnio poveikis pasireiškia ir per atliekinių priedų bei sumaišymo trukmės ($x_4 x_5$) veiksnių sąveiką, kurios įnašas vandens įmirkiui $\pm 17,0$ %, bei per atliekinių priedų ir išlaikymo aukščiausioje degimo temperatūroje trukmės ($x_4 x_8$) veiksnių tarpusavio sąveiką, kurios įnašas $\pm 4,0$ %. Kaip matyti (4.17 pav.), nenaudojant atliekinių priedų, nepriklausomai nuo sumaišymo trukmės ir išlaikymo aukščiausioje degimo temperatūroje trukmės gerokai sumažinamas vandens įmirkis.

Didinant išdegančiojo priedo (x_3) kiekį nuo 0 % iki 1,2 %, vandens įmirkis labai padidėja. 1,2 % išdegančiojo priedo kiekis didina vidutinį įmirkį 24,8 %. Šio veiksnio neigiamas poveikis matomas ir iš sąveikos su liesinančiaisiais priedais ($x_2 x_3$) (4.17 pav.).

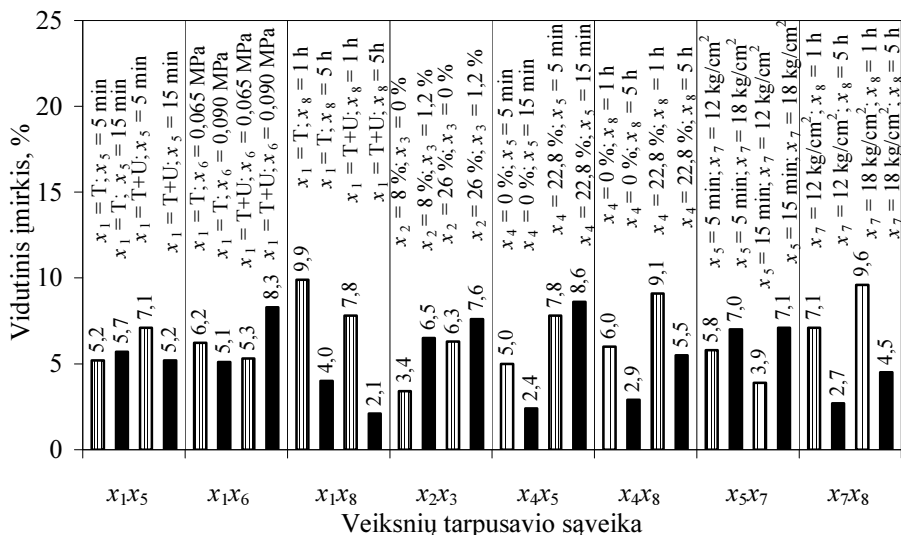
Išlaikymo aukščiausioje degimo temperatūroje trukmės (x_8) nuo 1 h iki 5 h didinimo įnašas vandens įmirkiui – 14,5 %. Didinant išlaikymą aukščiausioje degimo temperatūroje nuo 1 h iki 5 h, įmirkis sumažinamas nuo 8,3 % iki 3,6 %.

Molio (x_1) veiksnio poveikis vandens įmirkiui (4.16 pav.) labai sumažėjęs. Naudojant 20 % Ukmergės molio priedą, vidutinis vandens įmirkis – 6,4 % o be šio priedo – 5,5 %. Manome, kad tai lemia skirtingos molio savybės, nes naudotų molio, išdegtų 1 000 °C temperatūroje, savybės gerokai skyrėsi vertinant pagal vandens įmirkį, o molio degtų 1 070 °C temperatūroje šis skirtumas nedidelis.

Sumaišymo trukmės (x_5), išretinimo gylio juostinio preso vakuumo kameroje (x_6), suspaudimo laipsnio formavimo galvutėje (x_7) veiksniai, pasireiškiantys per tarpusavio sąveikas, turi nedidelį poveikį.



4.16 pav. Technologinių veiksnių įnašas vandens įmirkiui: x_1 – molis; x_2 – liesinantieji priedai; x_3 – išdegantysis priedas; x_4 – atliekiniai priedai; x_5 – sumaišymo trukmė; x_6 – išretinimo gylio juostinio preso vakuumo kameroje; x_7 – suspaudimo laipsnis formavimo galvutėje; x_8 – išlaikymo aukščiausioje degimo temperatūroje trukmė



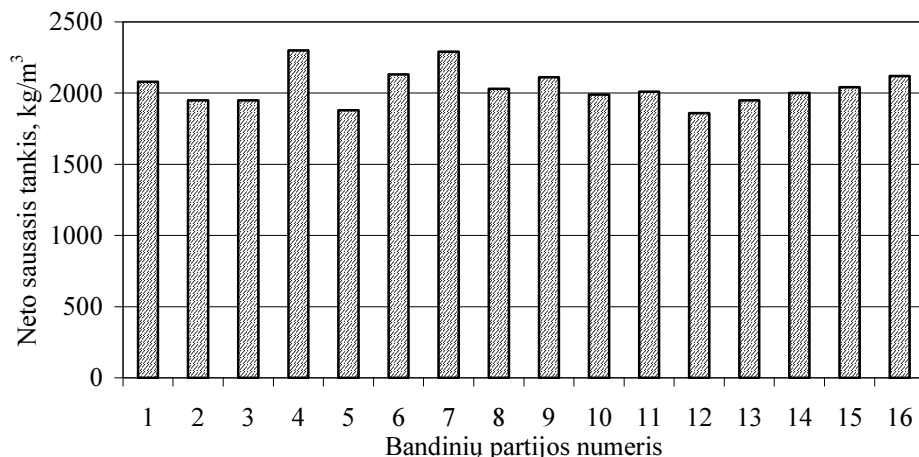
4.17 pav. Lygties 4.9 veiksnių tarpusavio sąveikos poveikis įmirkiui: x_1 – molis (T – Tauragės; $T + U$ – Tauragės + Ukmergės); x_2 – liesinantieji priedai, %; x_3 – išdegantysis priedas, %; x_4 – atliekiniai priedai, %; x_5 – sumaišymo trukmė, min; x_6 – išretinimo gylis juostinio preso vakuomo kameroje, MPa; x_7 – suspaudimo laipsnis formavimo galvutėje, kg/cm^2 ; x_8 – išlaikymo aukščiausioje degimo temperatūroje trukmė, h

Neto sausasis tankis. Pagal eksperimentų planą (3.15 lentelė) pagamintų keraminių bandinių vidutinis neto sausasis tankis (ρ) kinta 1880–2300 kg/m^3 ribose (4.18 pav.) Keisdami aštuonių technologinių veiksnių lygius, gavome 420 kg/m^3 vidutinio neto sausojo tankio kitimo intervalą.

Atlikę nustatytų keraminių bandinių neto sausojo tankio reikšmių analizę, sudarėme regresijos lygtį 4.11, kuri aprašo nagrinėtų technologinių veiksnių poveikį keraminių bandinių neto sausajam tankiui. Eksperimentinių ir apskaičiuotų duomenų adekvatumą palyginus pagal Fišerio kriterijų, kai reikšmingumo lygis $\alpha = 5\%$, nustatyta, kad regresijos lygtis yra adekvati. 4.11 lygties natūrinė išraiška pateikiama 4.12 lygyje.

$$\rho = 2043,13 - 69,22 x_3 - 56,12 x_4 + 49,01 x_8 - 42,93 x_4x_5 - 27,74 x_5x_6; \quad (4.11)$$

$$\rho = 1665,12 - 115,37 X_3 + 2,61 X_4 + 42,98 X_5 + 4438,40 X_6 + 24,51 X_8 - 0,75 X_4X_5 - 443,84 X_5X_6. \quad (4.12)$$

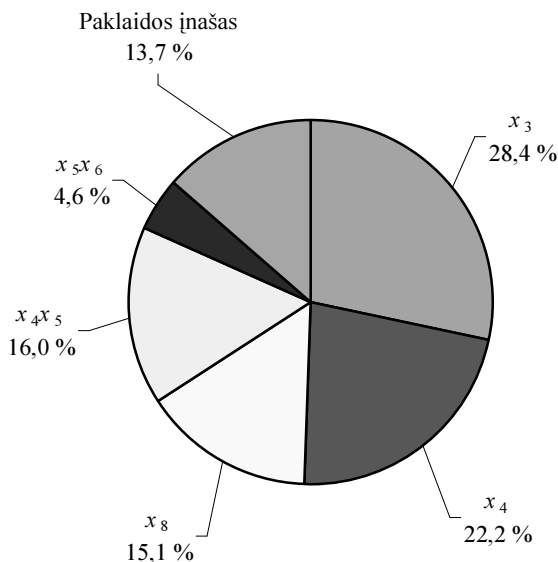


4.18 pav. Keraminių bandinių, išdegtų 1 070 °C temperatūroje, vidutinis neto sausasis tankis

Pagal (4.11) lygties bendrojo vidutinio koeficiento reikšmę matyti, kad keraminių bandinių, išdegtų 1 070 °C degimo temperatūroje, vidutinis neto sausasis tankis 2 043,13 kg/m³. Tačiau priklausomai nuo naudojamų technologinių veiksnių lygių jis gali padidėti arba sumažėti. Didžiausias vidutinis neto tankis – 2 300 kg/m³ nustatytas 4 partijos bandiniams, suformuotiems iš Tauragės telkinio molio su 20 % Ukmergės telkinio molio, 8 % liesinančiojo priedo, formavimo mišinį maišant maišyklėje 15 min, kai juostinio preso vakuumo kameroje išretinimo gylis – 0,065 MPa, suspaudimo laipsnis formavimo galvutėje – 12 kg/cm², išlaikymas aukščiausioje degimo temperatūroje – 5 h. Mažiausias vidutinis neto tankis – 1 860 kg/m³ nustatytas 12 partijos bandiniams, suformuotiems iš Tauragės telkinio molio su 20 % Ukmergės telkinio molio, 26 % liesinančiojo priedo, 1,2 % išdegančiojo priedo, 22,8 % atliekinio priedo, formavimo mišinį maišant maišyklėje 5 min, kai juostinio preso vakuumo kameroje išretinimo gylis – 0,065 MPa, suspaudimo laipsnis formavimo galvutėje – 18 kg/cm², išlaikymas aukščiausioje degimo temperatūroje – 1 h.

Neigiamą poveikį neto sausajam tankiui daro išdegančiojo priedo kiekio didinimas. 1,2 % išdegančiojo priedo kiekis mažina vidutinį neto sausąjį tankį 28,4 % (4.19 pav.). Be išdegančiojo priedo vidutinis neto sausasis tankis – 2 100,0 kg/m³, o su šiuo priedu – 1 986,2 kg/m³. Atliekiniai priedai taip pat

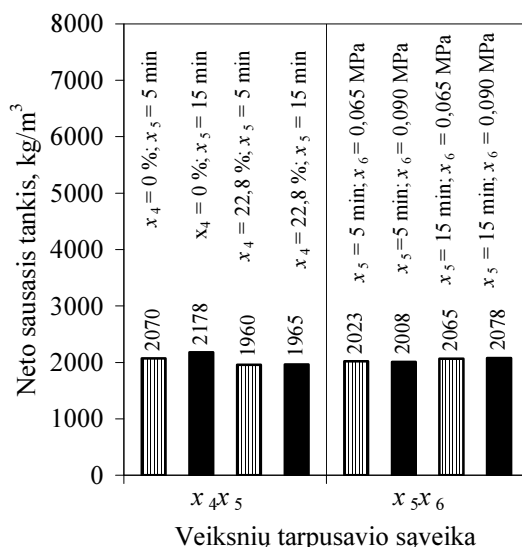
neigiamai veikia ir 22,2 % mažina vidutinį neto sausąjį tankį, tai matyti iš atliekinių priedų ir sumaišymo trukmės (x_4x_5) veiksnių sąveikos, kurios įnašas neto sausajam tankiui $\pm 16,0$ %. Didžiausias vidutinis neto sausasis tankis gaunamas nenaudojant atliekinių priedų ir esant 15 min sumaišymo trukmei, su atliekiniais priedais sumaišymo trukmės poveikis nedidelis (4.20 pav.).



4.19 pav. *Technologinių veiksnių įnašas neto sausajam tankiui: x_1 – molis; x_2 – liesinantieji priedai; x_3 – išdegantysis priedas; x_4 – atliekiniai priedai; x_5 – sumaišymo trukmė; x_6 – išretinimo gylis juostinio preso vakuumo kameroje; x_7 – suspaudimo laipsnis formavimo galvutėje; x_8 – išlaikymo aukščiausioje degimo temperatūroje trukmė*

Išlaikymo aukščiausioje degimo temperatūroje trukmės ilginimas nuo 1 h iki 5 h veikia teigiamai. Išdegtų ir išlaikytų aukščiausioje degimo temperatūroje 1 h bandinių vidutinis neto tankis yra $1\,948,8 \text{ kg/m}^3$, o išdegtų ir išlaikytų aukščiausioje degimo temperatūroje 5 h – $2\,137,5 \text{ kg/m}^3$.

Sumaišymo trukmės ir išretinimo gylio preso vakuumo kameroje (x_5x_6) veiksnių sąveikos įnašas neto sausajam tankiui $\pm 4,6$ %. Maišant 15 min ir išretinant 0,090 MPa vakuumu gaunama didžiausia vidutinė neto sausojo tankio reikšmė, tačiau didžiausią poveikį turi sumaišymo trukmė (4.20 pav.).



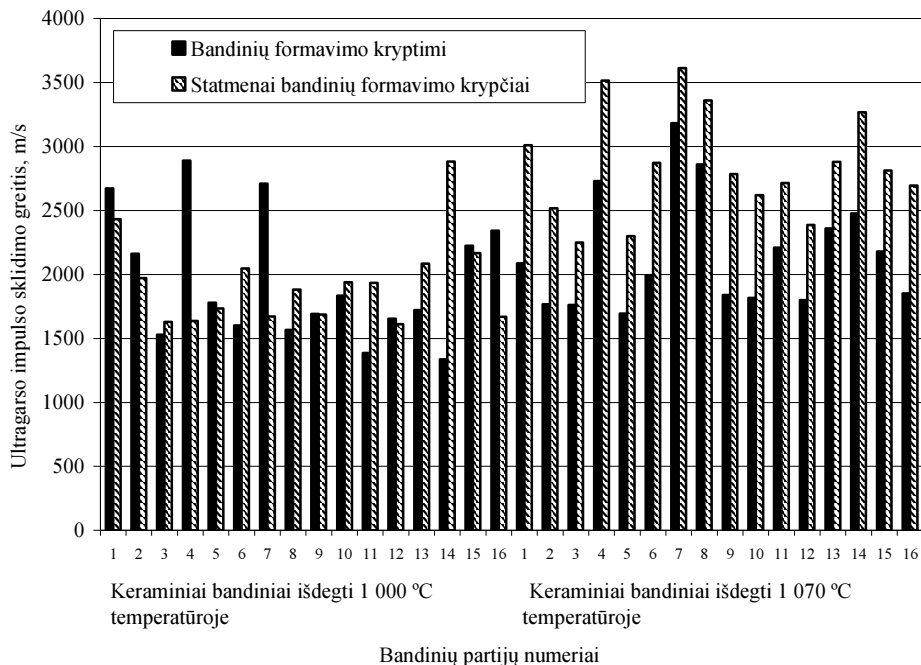
4.20 pav. Lygties 4.11 veiksnių tarpusavio sąveikos poveikis neto sausajam tankiui: x_4 – atliekiniai priedai, %; x_5 – sumaišymo trukmė, min; x_6 – išretinimo gylis juostinio preso vakuumo kameroje, MPa

4.3. Ultragarso impulso sklaidimo greičio keraminiuose bandiniuose tyrimai

Keraminių bandinių savybės gali būti vertinamos naudojant ultragarsą [107-109], tačiau dėl mažo tikslumo tokie metodai gali būti naudojami tik kaip papildomi. Autorė [36] nustatė, kad naudojant ultragarsą galima pakankamai objektyviai prognozuoti gniuždomąjį stiprį. Todėl mes siekdami įvertinti minėtojo metodo tikslumą vertinom tokias keraminių bandinių charakteristikas: atsparumą šalčiui, nustatyta būdais ir vienpusio šaldymo–atšildymo būdais, neto sausąjį tankį, vandens įmirklį, gniuždomąjį stiprį.

Nagrinėjant ultragarso impulso sklaidimo greičio (4.21 pav.) ir keraminių bandinių savybių ryšį buvo naudojama grupinė regresinė analizė. Matematiniam ryšiui nusakyti buvo parinkta ta funkcija, kuriai esant determinacijos koeficiento reikšmė artimesnė vienetui, modelio tinkamumas vertinamas pagal koreliacijos

koeficientą, standartinę įvertinimo klaidą s_e parodo nuokrypį nuo regresijos kreivės, rodiklių reikšmingumas įvertintas pagal Stjudento kriterijų [125].



4.21 pav. Vidutinis ultragarso impulso sklidimo greitis keraminiuose bandiniuose

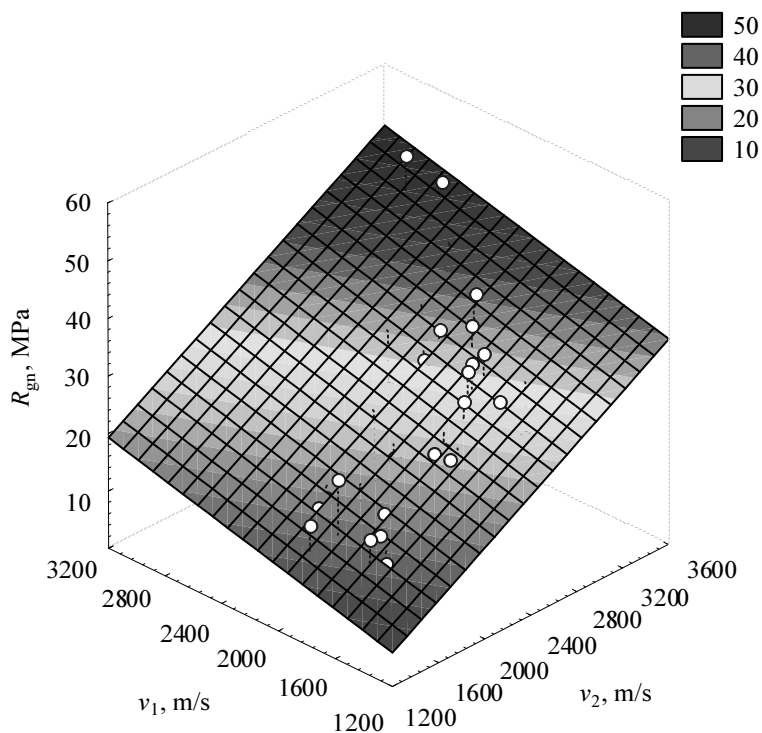
Remiantis eksperimentiniais duomenimis nustatyta, kad parinkti regresijos lygčių modeliai daugumoje atveju patenkinamai paaiškina nagrinėtų rodiklių (įmirkio, neto sausojo tankio, atsparumo šalčiui) ir ultragarso impulso sklidimo greičio ryšį.

Pačios tiksliausios prognozavimo galimybės yra vertinant gniuždomąjį stiprį pagal ultragarso impulso sklidimo greitį 4.1 lentelė. Lygties 4.12 determinacijos koeficientas $R^2 = 0,811$, t. y. 81,1 % variacijos paaiškinama nepriklausomu kintamuoju. Koreliacijos koeficientas parodo gan stiprų tiesinį ryšį siejantį kintamuosius, standartinė įvertinimo klaida $s_e = 4,77$ MPa nėra didelė palyginti su nustatytomis reikšmėmis. Lygties 4.12 grafinė išraiška pateikiama 4.22 pav.

4.1 lentelė. Lygties 4.12 koreliacijos, determinacijos koeficientų, vidutinio nuokrypio mato reikšmės

Lygties Nr.	Lygtis	R	R^2	s_e
4.12	$R_{gn} = 0,012 v_1 + 0,007 v_2 - 17,13$	0,901	0,811	4,77

čia R_{gn} – gniuždomasis stipris, MPa; v_1 – ultragarso impulso sklaidimo greitis gniuždymo kryptimi, m/s (sutampa su ultragarso impulso sklaidimo greičiu bandinių formavimo kryptimi); v_2 – ultragarso impulso sklaidimo greitis statmenai gniuždymo kryptčiai (sutampa su ultragarso impulso sklaidimo greičiu statmenai bandinių formavimo kryptčiai), m/s.



4.22 pav. Gniuždomojo stiprio (R_{gn}) ir ultragarso impulso sklaidimo greičio gniuždymo kryptimi (v_1) ir statmena gniuždynui kryptimi (v_2) ryšys

4.4. Ketvirtojo skyriaus išvados

1. Tyrimo duomenų analizė parodė, kad didžiausias gniuždomasis stipris gautas kai:
 - keraminiai bandiniai pagaminti iš Tauragės molio, 8 % liesinančiųjų priedų, išdegti 1 000 °C degimo temperatūroje, išlaikyti joje 1 h ir aušinti greituoju aušinimo režimu (0,83–1,17 °C/min). Taip pagamintų bandinių gniuždomasis stipris siekia 24,4 MPa. Didžiausią poveikį gniuždomajam stipriui daro molio plastiškumas, kurio įnašas – 25,6 %, liesinantieji priedai, kurių įnašas – 23,4 %, išdegantysis priedas, kurio įnašas – 11,9 %, atliekiniai priedai, kurių įnašas – 11,5 %;
 - keraminiai bandiniai pagaminti iš Tauragės molio, 8 % liesinančiųjų priedų, formavimo mišinys homogenizuotas ne mažiau kaip 15 min, esant 0,090 MPa išretinimo gyliui juostinio preso vakuumo kameroje ir 12 kg/cm² suspaudimo laipsniui formavimo galvutėje, išlaikytas 5 h 1 070 °C temperatūroje. Taip pagamintų bandinių gniuždomasis stipris – 52,8 MPa. Didžiausią poveikį gniuždomajam stipriui daro molio plastiškumas, kurio įnašas – 9,1 %, liesinantieji priedai, kurių įnašas – 38,4 %, atliekiniai priedai, kurių įnašas – 42,5 %.
2. Tyrimo duomenų analizė parodė, kad mažiausias vandens įmirkis gaunamas kai:
 - keraminiai bandiniai pagaminti iš Tauragės molio ir 20 % Ukmergės molio mišinio, 8 % liesinančiųjų priedų, išdegti 1 000 °C temperatūroje, išlaikyti joje 5 h ir aušinti greituoju aušinimo režimu (0,83–1,17 °C/min). Taip pagamintų bandinių vandens įmirkis – 6,4 %. Didžiausią poveikį vandens įmirkiui daro nesukepantys žemoje temperatūroje atliekiniai priedai, kurių įnašas – 53,2 %;
 - keraminiai bandiniai pagaminti iš Tauragės molio, 8 % liesinančiųjų priedų, formavimo mišinį homogenizuojant ne mažiau kaip 15 min, esant 0,090 MPa išretinimo gyliui juostinio preso vakuumo kameroje ir 12 kg/cm² suspaudimo laipsniui formavimo galvutėje, išlaikant 5 h 1 070 °C temperatūroje. Taip pagamintų bandinių vandens įmirkis – 0,6 %. Didžiausią poveikį vandens įmirkiui daro nesukepantis žemoje temperatūroje atliekiniai priedai, kurių įnašas – 34,7 %, išdegantysis priedas, kurio įnašas – 24,8 %, išlaikymo aukščiausioje degimo temperatūroje trukmė, kurios įnašas – 19,9 %, ir formavimo mišinio homogenizavimo laipsnis, kurio įnašas – 17,6 %.

3. Tyrimo duomenų analizė parodė, kad didžiausias neto sausasis tankis gaunamas kai:
- keraminiai bandiniai pagaminti iš Tauragės molio ir 20 % Ukmergės molio mišinio, 8 % liesinančiųjų priedų, išdegti 1 000 °C temperatūroje, išlaikant joje 5 h ir aušinant greituoju aušinimo režimu (0,83–1,17 °C/min). Taip pagamintų bandinių neto sausasis tankis siekia – 2 010 kg/m³. Didžiausią poveikį neto sausajam tankiui daro molio plastiškumas, kurio įnašas – 24,7 % ir atliekiniai priedai, kurių įnašas – 49,7 %;
 - keraminiai bandiniai pagaminti iš Tauragės molio ir 20 % Ukmergės molio mišinio, 8 % liesinančiųjų priedų, homogenizuojant formavimo mišinį ne mažiau kaip 15 min, esant 0,065 MPa išretinimo gyliui juostinio preso vakuumo kameroje ir 12 kg/cm² suspaudimo laipsniui formavimo galvutėje, išlaikant 5 h 1 070 °C temperatūroje. Taip pagamintų bandinių neto sausasis tankis – 2300 kg/m³. Didžiausią poveikį neto sausajam tankiui daro atliekiniai priedai, kurių įnašas – 22,2 %, išdegantysis priedas, kurio įnašas – 28,4 %, išlaikymo aukščiausioje degimo temperatūroje trukmė, kurios įnašas – 15,1 %.
4. Ultragarso impulso sklidimo greičio tyrimas parodė, kad kuo didesnis bandinių gniuždomasis stipris, tuo didesnis ultragarso impulso sklidimo greitis bandiniuose. Sudaryta lygtis, išreiškianti jų tarpusavio ryšį
- $$R_{gn} = 0,012 v_1 + 0,007 v_2 - 17,13 \quad (R = 0,901; s_e = \pm 4,77 \text{ MPa}).$$

Technologinių veiksnių poveikio keraminių mūro gaminių atsparumo šalčiui tyrimai

5.1. Keraminių bandinių eksploatacinio atsparumo šalčiui prognozė pagal struktūros rodiklius

Keraminių mūro gaminių atsparumą šalčiui galima nustatyti tiesioginiais būdais (tūrinio arba vienpusio šaldymo–atšildymo būdu), tačiau tai užtrunka nuo kelių savaičių iki keliolikos mėnesių, ir įvertinti sparčiaisiais prognozavimo būdais (pagal porų ir kapiliarų dydį bei jų pasiskirstymą, struktūrinius ir deformacinius rodiklius, fizikines ir mechanines bei struktūrines charakteristikas) [92, 93, 100, 102, 105]. R. Mačiulaitis [92, 93] pasiūlė lygtys prognozuoti keraminių mūro gaminių atsparumą šalčiui pagal suirimo pradžią (F_{RE1}) ir pabaigą (F_{RE2}), kai bandinių efektyvus poringumas $W_E \leq 26\%$ (lygtys buvo kalibruojamos pagal specialų vienpusio šaldymo ir šildymo režimą):

$$F_{RE1} = 0,231 \frac{R^{1,068} D^{1,345} G_1^{0,275} G_2^{0,663}}{N_H^{0,285} g_2^{0,830}}, \text{ ciklai}, \quad (5.1)$$

ir

$$F_{RE2} = 0,223 \frac{R^{1,465} D^{0,759} G_1^{0,383} G_2^{0,852}}{N_H^{0,168} g_2^{1,034}}, \text{ ciklai}, \quad (5.2)$$

čia R – poringosios erdvės rezervas, %; D – sąlyginis porų ir kapiliarų sienelės storis, %; G_2 – kapiliarinis masės srauto greitis vakuume šaldymo kryptimi, $\text{g/cm}^2 \cdot \text{h}$; G_1 – kapiliarinis masės srauto greitis vakuume statmenai šaldymo kryptčiai, $\text{g/cm}^2 \cdot \text{h}$; N_H – struktūros nevienalytiškumo laipsnis, sąl. vnt.; g_2 – kapiliarinis masės srauto greitis šaldymo kryptimi, $\text{g/cm}^2 \cdot \text{h}$.

Iš lygčių (5.1 ir 5.2) matyti, kad siekiant padidinti keraminių mūro gaminių atsparumą šalčiui reikia didinti struktūrinių rodiklių R , D , G_1 , G_2 ir mažinti N_H , g_2 rodiklių reikšmes. Žinoma, šiuos rodiklius galima padidinti arba sumažinti tam tikrose ribose. Taip pat galimi atvejai, kai didinant vieną rodiklį mažės kiti rodikliai, kuriuos reikia didinti, ir atvirkščiai.

Pasinaudojus metodika [113] nustatytos pagamintų keraminių bandinių vidutinės efektyvaus poringumo (W_E), bendrojo poringumo (W_B), poringosios erdvės rezervo (R), sąlyginio porų ir kapiliarų sienelės storio (D), kapiliarinio masės srauto greičio vakuume statmenai šaldymo kryptčiai (G_1), kapiliarinio masės srauto greičio vakuume šaldymo kryptimi (G_2), struktūros nevienalytiškumo laipsnio (N_H) bei kapiliarinio masės srauto greičio šaldymo kryptimi (g_2) reikšmės ir apskaičiuotas eksploatacinis atsparumas šalčiui (F_{RE1} ir F_{RE2}) pateikti 5.1 lentelėje. Keisdami technologinių veiksnių lygius, gavome gana plačias struktūrinių rodiklių reikšmių kitimo ribas, tai savo ruožtu leidžia gauti skirtingų savybių gaminius.

Keraminių bandinių, išdegtų 1 000 °C temperatūroje, vidutinės struktūrinių rodiklių reikšmės kinta šiose ribose (5.1 lentelė): efektyvusis poringumas 13,7–26,0 %, bendrasis poringumas 19,7–30,2 %, poringosios erdvės rezervas 5,6–30,5 %, sąlyginis porų ir kapiliarų sienelės storis 2,3–4,1 %, kapiliarinio masės srauto greitis vakuume statmenai šaldymo kryptčiai 0,127–0,687 $\text{g/cm}^2 \cdot \text{h}$, kapiliarinio masės srauto greitis vakuume šaldymo kryptimi 0,160–0,952 $\text{g/cm}^2 \cdot \text{h}$, struktūros nevienalytiškumo laipsnis 0,23–5,00 sąl. vnt., kapiliarinis masės srauto greitis šaldymo kryptimi 0,239–0,672 $\text{g/cm}^2 \cdot \text{h}$.

Keraminių bandinių, išdegtų 1 070 °C temperatūroje, vidutinės struktūrinių rodiklių reikšmės kinta šiose ribose (5.1 lentelė): efektyvusis poringumas 2,2–23,7 %, bendrasis poringumas 4,8–30,8 %, poringosios erdvės rezervas 15,9–70,8 %, sąlyginis porų ir kapiliarų sienelės storis 2,2–12,8 %, kapiliarinio masės srauto greitis vakuume statmenai šaldymo kryptčiai 0,062–0,724 g/cm²·h, kapiliarinio masės srauto greitis vakuume šaldymo krypttimi 0,025–0,423 g/cm²·h, struktūros nevienalytiškumo laipsnis 0,060–0,850 sąl. vnt., kapiliarinis masės srauto greitis šaldymo krypttimi 0,010–0,696 g/cm²·h.

Nustatyta (5.1 lentelė), kad, didinant visų formavimo masių išdegimo temperatūrą, efektyvusis ir bendrasis poringumai mažėja, o tai lemia atsparumo šalčiui didėjimą. Taigi degimo temperatūros dydis yra vienas iš pagrindinių technologinių veiksnių, lemiantis gaminių atsparumą šalčiui. Iš gautų struktūrinių rodiklių ir apskaičiuoto eksploatacinio atsparumo šalčiui reikšmių plataus intervalo galima teigti, kad kiti technologiniai veiksniai (formavimo mišinio sudėtis, formavimas, degimo ir aušinimo trukmė) taip pat lemia gaminių ilgalaikiškumą. Pakėlus gaminių degimo temperatūrą iki 1 070 °C, galima ir nepasiekti ženklaus keraminių gaminių atsparumo šalčiui padidėjimo, atsižvelgiant į kitų technologinių veiksnių kitimą gamybos metu.

Vertinant keraminių bandinių, išdegtų 1 000 °C temperatūroje, eksploatacinį atsparumą šalčiui pagal struktūrinius rodiklius, matyti, kad didžiausią atsparumą šalčiui galima prognozuoti 4 partijos bandiniams. 11 ir 14 partijos bandinių eksploatacinio atsparumo šalčiui reikšmės išsiskiria iš kitų bandinių partijų. Bandinių, išdegtų 1 070 °C temperatūroje, prognozuojamojo eksploatacinio atsparumo šalčiui reikšmės gerokai didesnės dėl minėtųjų makro- ir mikrostruktūros pokyčių, atsirandančių degimo metu sukepančiam keraminei šukei. Didžiausias eksploatacinis atsparumas šalčiui prognozuojamas 4 ir 7 partijos bandiniams. 6, 14 ir 16 bandinių partijos eksploatacinio atsparumo šalčiui reikšmės gana didelės (5.1 lentelė).

Atlikę apskaičiuotą eksploatacinio atsparumo šalčiui reikšmių analizę, sudarėme koduotas regresijos lygtis (5.3–5.6), kurios aprašo technologinių veiksnių ir prognozuojamojo eksploatacinio atsparumo šalčiui ryšį. Eksperimentinių bei apskaičiuotų duomenų adekvatumą palyginę pagal Fišerio kriterijų, kai reikšmingumo lygis $\alpha = 5\%$, nustatėme, kad regresijos lygtys yra adekvačios. Sudarytos regresijos lygtys, aprašančios nagrinėtųjų technologinių veiksnių ryšį su prognozuojamuoju eksploaciniu atsparumu šalčiui, pateikiamos 5.2 lentelėje.

5.1 lentelė. Keraminių bandinių vidutinės struktūrinių rodiklių ir apskaičiuoto eksploatacinio atsparumo šalčiui reikšmės

Partijos Nr.	W_E , %	W_R , %	R , %	D , %	G_1 , g/cm ² ·h	G_2 , g/cm ² ·h	N , sąl. vnt.	g_2 , g/cm ² ·h	Ekspl. atsparumas šalčiui (apskaičiuotas pagal 4.1 ir 4.2 lygtį [92, 93]), ciklai	
									F_{RE1}	F_{RE2}
Keraminiai bandiniai, išdegti 1 000 °C temperatūroje										
1	25,8	29,8	9,7	2,4	0,390	0,469	0,33	0,593	8,4	9,0
2	24,1	28,0	13,9	2,6	0,453	0,569	0,43	0,525	16,7	21,8
3	25,9	29,4	11,2	2,4	0,630	0,657	0,31	0,612	13,8	17,3
4	13,7	19,7	30,5	4,1	0,578	0,673	3,79	0,463	50,8	96,6
5	26,0	30,0	11,0	2,3	0,672	0,536	0,23	0,608	12,5	14,9
6	25,9	28,7	9,8	2,5	0,347	0,365	0,37	0,305	15,8	16,2
7	22,6	26,1	13,4	2,8	0,161	0,219	1,56	0,439	5,7	6,3
8	15,1	20,7	27,1	3,8	0,202	0,187	4,00	0,325	17,1	24,6
9	23,8	25,2	5,6	3,0	0,329	0,351	2,99	0,396	3,7	3,7
10	25,6	29,3	8,2	2,4	0,427	0,160	0,41	0,244	6,9	7,0
11	17,7	21,9	19,2	3,6	0,254	0,272	0,40	0,239	37,4	43,5
12	25,7	30,2	11,9	2,3	0,687	0,718	0,33	0,672	13,8	18,3
13	25,3	28,2	10,3	2,5	0,428	0,437	0,74	0,478	8,8	10,7
14	17,4	24,9	30,1	3,0	0,127	0,952	5,00	0,463	25,2	53,6
15	24,6	27,3	9,9	2,7	0,334	0,348	0,37	0,373	11,2	11,7
16	22,6	26,8	15,7	2,7	0,346	0,261	2,22	0,540	6,8	9,2
Keraminiai bandiniai, išdegti 1 070 °C temperatūroje										
1	12,2	17,8	31,5	4,6	0,098	0,039	0,40	0,061	58,3	58,7
2	21,1	25,1	15,9	3,0	0,381	0,243	0,45	0,354	17,3	19,9
3	22,8	28,2	19,1	2,5	0,611	0,281	0,24	0,613	15,7	19,4
4	2,6	8,9	70,8	10,2	0,062	0,025	0,53	0,017	721,9	735,5
5	23,7	30,8	23,1	2,2	0,666	0,330	0,18	0,696	18,0	25,3
6	7,5	14,5	48,3	5,9	0,091	0,040	0,37	0,051	152,2	160,2
7	2,2	4,8	54,2	12,8	0,104	0,030	0,85	0,010	1234,2	1263,3
8	16,2	22,1	26,7	3,5	0,080	0,109	0,36	0,042	89,3	125,3
9	10,6	16,0	33,8	5,3	0,207	0,105	0,50	0,170	72,2	74,8
10	14,6	25,3	42,3	3,0	0,322	0,109	0,47	0,101	77,4	142,5
11	16,4	22,5	27,1	3,4	0,642	0,417	0,60	0,217	82,8	145,7
12	20,9	28,3	26,1	2,5	0,724	0,423	0,34	0,545	30,1	49,2
13	17,8	26,2	32,1	2,8	0,415	0,205	0,50	0,198	48,2	84,4
14	11,7	19,4	39,7	4,2	0,148	0,136	0,47	0,046	204,0	338,6
15	15,2	22,2	31,5	3,5	0,650	0,339	0,26	0,187	126,8	209,5
16	9,7	19,6	50,5	4,1	0,230	0,205	0,06	0,081	424,3	622,0

5.2 lentelė. *Eksplatacinio atsparumo šalčiui ryšio su technologiniais veiksniais regresijos lygtys*

Lygties Nr.	Regresijos lygtis
Keraminių bandinių išdegtų 1 000 °C temperatūroje	
5.3	$F_{RE1} = 15,91 + 4,14 x_1 - 4,40 x_4 + 5,30 x_8 - 2,99 x_9 - 2,02 x_1x_2 - 4,83 x_1x_4 + 1,87 x_1x_8 - 4,66 x_1x_9 + 3,54 x_2x_4$
5.4	$F_{RE2} = 22,77 + 8,56 x_1 - 4,66 x_2 - 8,94 x_4 + 7,19 x_8 - 4,36 x_9 - 5,97 x_1x_2 - 9,08 x_1x_4 + 2,83 x_1x_8 - 6,33 x_1x_9 + 8,90 x_2x_4$
Keraminių bandinių išdegtų 1 070 °C temperatūroje	
5.5	$F_{RE1} = 202,63 - 41,40 x_2 - 143,77 x_3 - 153,94 x_4 + 117,24 x_5 + 123,56 x_6 - 31,50 x_7 + 141,69 x_3x_4 + 32,65 x_4x_7 + 105,34 x_5x_8 + 134,41 x_6x_8$
5.6	$F_{RE1} = 254,64 - 39,41 x_2 - 106,15 x_3 - 167,54 x_4 + 137,71 x_5 + 116,64 x_6 - 43,98 x_7 + 134,22 x_3x_4 + 123,17 x_5x_8 + 135,54 x_6x_8$

Iš sudarytų lygčių, įvertinus technologinių veiksnių poveikį eksploataciniam atsparumui šalčiui, galima prognozuoti, kad bandinių, išdegtų 1 000 °C temperatūroje, atsparumą šalčiui labiausiai lems molio plastiškumas. Tai matyti iš 5.3 ir 5.4 lygčių pavienio (x_1) veiksnio ir jo tarpusavio sąveikos su kitais veiksniais. Bandiniams, išdegtiems 1 070 °C temperatūroje, molio plastiškumo poveikis neaiškus, kadangi sudarytose 5.5 ir 5.6 lygtyse šio veiksnio nėra. Bandiniams, išdegtiems 1 000 °C temperatūroje, išdegančiojo priedo (x_3) poveikis neaiškus, kadangi lygtyse 5.3 ir 5.4 reikšminių šio priedo veiksnių negauta. Neigiamą poveikį atsparumui šalčiui daro naudoti atliekiniai priedai, todėl manome, kad didžiausias atsparumas šalčiui turėtų būti bandinių, pagamintų be minėtųjų priedų.

Formavimo masės sumaišymo (x_5) ir išlaikymo aukščiausioje degimo temperatūroje (x_8) trukmės ilginimas veiks teigiamai, o šių veiksnių poveikis bandinių atsparumui šalčiui bus vienas iš didžiausių. Sprendžiant pagal nustatytų koeficientų dydį ir ženklus, išretinimo gylio preso vakuumo kameroje (x_6) didinimas turėtų veikti teigiamai, o padidintas suspaudimo laipsnis formavimo galvutėje (x_7) yra nebūtinasis. Aušinimo režimo (x_9) poveikis nedidelis, todėl galima aušinti pagal greitąjį aušinimo režimą.

Atlikus tyrimus, galima prognozuoti, kad bandiniai, pagaminti su 20 % Ukmergės molio priedu, 8 % liesinančiuoju priedu, be atliekinių priedų, degant 1 000 °C temperatūroje, išlaikant joje 5 h ir aušinant greituoju aušinimo režimu (4 bandinių partija), įgaus didžiausias atsparumo šalčiui reikšmes.

Taip pat didžiausią atsparumą šalčiui įgaus bandiniai, pagaminti su 8 % liesinančiuoju priedu, be išdegančiųjų ir atliekinių priedų, homogenizuojant formavimo mišinį ne trumpiau kaip 15 min maišymo įrenginiuose, esant

0,090 MPa išretinimo gyliui juostinio preso vakuomo kameroje ir ne mažiau kaip 12 kg/cm^2 suspaudimui formavimo galvutėje (formuojant su trumpa formavimo galvute), degant 1070°C temperatūroje ir išlaikant joje 5 h (7 bandinių partija).

Minėtųjų 4 ir 7 bandinių partijos struktūrinių rodiklių reikšmės iš kitų bandinių, degtų tose pačiose temperatūrose, išsiskiria tuo, kad poringosios erdvės rezervo, lemiančio tą poringosios erdvės dalį, kuri užsipildo vandeniu ne iš karto, o cikliškai šaldymo–atšildymo metu, reikšmės – pačios didžiausios (5.1 lentelė). Taip pat didelės minėtųjų partijų sąlyginio porų ir kapiliarų sienelės storio bei struktūros nevienalytiškumo laipsnio reikšmės.

Rodiklių G_1 , G_1 , g_2 derinys, apibūdinantis porų ir kapiliarų anizotropiją, sunkiai paaiškinamas, bet labai svarbus. 8 partijos bandinių, išdegtų 1000°C temperatūroje, eksploatacinis atsparumas šalčiui nepaisant aukštų R , D ir N reikšmių, prognozuojamas nedidelis (5.1 lentelė).

5.2. Keraminių bandinių eksploatacinio atsparumo šalčiui prognozė pagal deformacinius rodiklius

Vertinant atsparumą šalčiui pagal deformacinius rodiklius, buvo pasinaudota autorių [102] lygtimis. Keraminių mūro gaminių atsparumas šalčiui buvo prognozuojamas pagal suirimo pradžią (M_1) ir pabaigą (M_2):

$$M_1 = \exp(6,4314 - 0,2058 W_{48} - 0,02443 \Delta h_1 - 0,01976 \Delta h_3 + 0,009608 \Delta h_{11} + 0,021045 \Delta h_{31}), \text{ cikl.}, \quad (5.7)$$

ir

$$M_2 = \exp(7,0834 - 0,2049 W_{48} - 0,03275 \Delta h_1 - 0,01226 \Delta h_3 - 0,004285 \Delta h_{11} + 0,011584 \Delta h_{31}), \text{ cikl.}, \quad (5.8)$$

čia Δh_1 – didžiausia bendroji linijinė deformacija 1-ame cikle šaldant, μm ; Δh_3 – didžiausia bendroji linijinė deformacija 3-ame cikle šaldant, μm ; Δh_{11} – didžiausia liekamoji deformacija 1-ame cikle šildant, μm ; Δh_{31} – didžiausia liekamoji deformacija 3-ame cikle šildant, μm ; W_{48} – vandens įmirkis po 48 h.

Išmatuotų keraminių bandinių vidutinių deformacijų reikšmės ir apskaičiuotas prognozuojamas atsparumas šalčiui pateikiami 5.3 lentelėje.

5.3 lentelė. *Keraminių bandinių vidutinių deformacijų ir apskaičiuoto atsparumo šalčiui reikšmės*

Partijos Nr.	Δh_1 , μm	Δh_{11} , μm	Δh_3 , μm	Δh_{31} , μm	W_{48} , %	Atsparumo šalčiui rodiklis (apskaičiuotas pagal 3.7 ir 3.8 lygtį [102]), ciklai	
						M_1	M_2
Keraminiai bandiniai, išdegti 1 000 °C temperatūroje							
1	20,0	2,5	30,0	4,0	12,9	16,5	31,6
2	13,4	1,8	22,9	3,6	11,8	27,6	53,5
3	15,6	2,4	25,3	3,8	12,0	24,1	46,4
4	3,0	0,5	4,2	1,5	6,4	147,6	280,8
5	14,8	2,2	21,5	3,4	12,8	22,3	42,2
6	10,5	1,6	15,8	2,5	12,3	29,9	57,3
7	14,3	3,4	19,1	5,0	10,3	41,4	74,7
8	15,9	4,8	25,9	7,9	7,4	68,1	121,5
9	19,7	4,8	28,6	7,9	10,8	29,2	51,7
10	18,6	4,3	27,3	6,1	12,3	21,7	39,3
11	6,8	1,8	14,6	3,4	8,2	79,7	153,4
12	22,7	7,9	35,4	10,4	12,3	18,9	32,2
13	26,8	8,0	36,8	14,9	11,9	19,9	31,7
14	5,0	1,8	16,6	6,9	8,0	89,8	172,3
15	23,5	6,2	30,8	8,6	11,4	23,2	39,4
16	16,8	3,6	25,1	5,1	10,5	33,3	61,4
Keraminiai bandiniai, išdegti 1 070 °C temperatūroje							
1	5,8	2,5	10,3	3,4	4,9	176,5	327,6
2	4,8	1,5	5,8	2,3	9,1	80,6	150,0
3	7,5	3,5	16,3	4,8	9,7	58,2	109,0
4	− 0,4	− 0,2	− 1,0	− 0,4	0,9	526,0	1012,9
5	10,9	1,1	18,7	3,6	10,7	39,6	76,8
6	0,9	0,2	1,4	0,5	3,1	316,1	605,8
7	− 0,4	− 0,1	− 0,8	− 0,3	0,6	559,0	1075,3
8	3,0	0,5	7,8	2,0	6,6	133,3	259,4
9	0,3	0,1	0,9	0,3	3,3	309,3	595,5
10	15,6	2,5	25,6	5,5	7,2	66,8	126,0
11	4,8	1,1	12,7	2,5	6,8	112,9	221,7
12	12,6	2,4	26,4	4,1	9,8	40,2	79,5
13	4,5	0,7	8,9	2,5	8,3	89,7	172,8
14	5,4	1,1	12,4	2,9	5,1	160,2	310,6
15	13,7	2,5	24,7	4,4	6,0	89,2	171,2
16	− 1,5	− 2,0	− 2,3	− 3,0	3,0	334,9	678,4

Keraminių bandinių, išdegtų 1 000 °C temperatūroje, vidutinės deformacinių rodiklių reikšmės kinta šiose ribose: Δh_1 (3,0–26,8) μm , Δh_3 (4,2–36,8) μm , Δh_{11} (0,5–8,0) μm , Δh_{31} (1,5–14,9) μm , o atsparumo šalčiui rodikliai – M_1 (16,5–147,6) ciklai, M_2 (31,6–280,8) ciklai. Keraminių bandinių, išdegtų 1 070 °C temperatūroje, vidutinės deformacinių rodiklių reikšmės kinta šiose ribose: Δh_1 (– 1,5–15,6) μm , Δh_3 (– 2,3–26,4) μm , Δh_{11} (– 2,0–3,5) μm , Δh_{31} (– 3,0–5,5) μm , o atsparumo šalčiui rodikliai – M_1 (39,6–559,0) ciklai, M_2 (76,8–1075,3) ciklai.

Nustatyta, kad (5.3 lentelė) didžiausias prognozuojamas atsparumas šalčiui turėtų būti 4 partijos keraminių bandinių, išdegtų 1 000 °C temperatūroje. Šios partijos išmatuotos linijinės deformacijos, parodančios šaldomo paviršinio sluoksnio mikrostruktūros destruktijos laipsnį, yra pačios mažiausios, taip pat liekamosios deformacijos, parodančios atsiradusius negrįžtamus vidinius struktūros pokyčius, mažos, palyginti su kitų bandinių deformaciniais rodikliais. Taip pat aukšto atsparumo šalčiui reikšmės turėtų būti nustatytos 8, 11 ir 14 bandinių partijoms. Prognozuojant minėtąją charakteristiką pagal keraminių bandinių struktūros rodiklius, buvo nustatyta, kad 4, 11 ir 14 partijos keraminiai bandiniai bus aukšto eksploatacinio atsparumo šalčiui.

Vertinant 8 partijos keraminius bandinius pagal deformacinius rodiklius, matyti, kad nors nustatytos deformacijos gana didelės, tačiau vandens įmirkio reikšmė tos pačios eilės kaip ir atsparių šalčiui bandinių, kas tikriausiai ir lėmė aukštesnę prognozuojamąją atsparumo šalčiui reikšmę. Iš 5.7 ir 5.8 lygčių matyti, kad vandens įmirkis atlieka svarbų vaidmenį, o jo koeficiento ženklas yra didžiausias.

Keliant degimo temperatūrą, keraminių bandinių deformacinių rodiklių reikšmės mažėja, o kai kuriais atvejais įgauna net neigiamus dydžius (5.3 lentelė), kas buvo pastebėta [102] darbe. Keraminių bandinių su neigiamomis deformacinių rodiklių reikšmėmis prognozuojamas atsparumas šalčiui pats didžiausias, tai patvirtina ir eksploatacinio atsparumo šalčiui prognozavimo rezultatai pagal struktūros rodiklius (5.1 lentelė). 4, 7 ir 16 partijų keraminių bandinių, išdegtų 1 070 °C temperatūroje, šie rodikliai patys didžiausi.

Autoriai [102] skirtingo ženklo deformacijas aiškina tuo, kad keraminių gaminių makro- ir mikrostruktūros skiriasi, nevienodai vyksta vandens migracijos ir fazinių virsmų procesai šaldant ir atšildant. Kai fiksuojamos deformacinių rodiklių reikšmės yra teigiamos ir didelės, vyrauja vandens migracija, kaupimasis ir vandens virsmas į ledą paviršinių sluoksnių pažaidų vietose arba didesnėse pavojingose porose. Kai deformacinių rodiklių reikšmės neigiamos ir didelės, vyksta priešingi procesai. Vanduo, ciklinio poveikio metu

iš pavojingos paviršiaus vietos pamažu pašalinamas dėl migracijos, garavimo, desorbcijos ir sublimacijos procesų.

Taip pat didelis atsparumas šalčiui prognozuojamas 6 ir 14 partijos bandiniams, išdegtiems 1 070 °C temperatūroje. Šią prognozę patvirtina keraminių bandinių struktūros rodikliai. Kaip jau minėta, vertinant atsparumą šalčiui pagal 5.7 ir 5.8 lygtis, svarbu vaidmenį atlieka vandens įmirksis, kadangi jo koeficiento ženklas pats didžiausias.

Įvertinus prognozuojamąjį atsparumą šalčiui pagal deformacinius rodiklius, matyti, kad didžiausią atsparumo šalčiui reikšmę įgaus tarp bandinių, išdegtų 1 000 °C temperatūroje, bandiniai, pagaminti su 20 % Ukmergės molio priedu, 8 % liesinančiuoju priedu, be atliekinių priedų, išlaikyti aukščiausioje degimo temperatūroje 5 h ir aušinti greituoju aušinimo režimu (4 bandinių partija).

Tarp bandinių, išdegtų 1 070 °C temperatūroje, didžiausią atsparumo šalčiui reikšmę įgaus bandiniai, pagaminti iš Tauragės telkinio molio su 8 % liesinančiuoju priedu, homogenizuojant formavimo mišinį maišymo įrenginiuose ne trumpiau kaip 15 min, kai išretinimo gylis juostinio preso vakuumo kameroje 0,090 MPa, suspaudimas formavimo galvutėje ne mažesnis kaip 12 kg/cm² (formuojant su trumpa formavimo galvute), išlaikant aukščiausioje degimo temperatūroje 5 h (7 bandinių partija).

Kitų partijų bandinių atsparumo šalčiui pagal deformacinius ir struktūros rodiklius prognozavimo rezultatai sutampa, išskyrus kelis atvejus, reikalaujančius tiesioginių atsparumo šalčiui nustatymo bandymų.

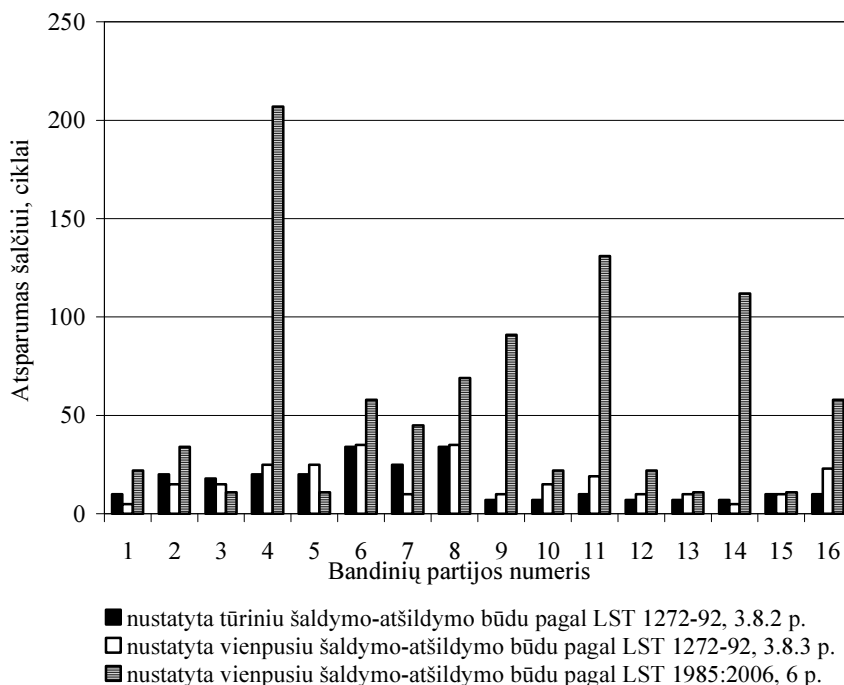
5.3. Keraminių bandinių atsparumo šalčiui tyrimai tūrinio ir vienpusio šaldymo–atšildymo būdais

5.3.1. Keraminių bandinių, išdegtų 1 000 °C temperatūroje, tyrimai

Pagal eksperimentų planą (3.14 lentelė) pagamintų keraminių bandinių atsparumas šalčiui, nustatytas pagal LST 1272-92, 3.8.2 p. tūrinio šaldymo–atšildymo būdu (F_T), kinta 7–34 ciklų ribose, 3.8.3 p. vienpusio šaldymo–atšildymo būdu (F_{V1}), kinta 5–35 ciklų ribose, o atsparumas šalčiui nustatytas pagal LST 1985:2006, 6 p. vienpusio šaldymo–atšildymo būdu (F_{V2}), kinta 11–207 ciklų ribose (5.1 pav.).

Atlikę nustatytų atsparumo šalčiui reikšmių analizę, sudarėme regresijos modelio lygtis (5.9–5.11), kurios aprašo nagrinėtųjų technologinių veiksnių poveikį keraminių bandinių atsparumui šalčiui, nustatytam skirtingais

šaldymo–atšildymo būdais [9, 126, 127]. Eksperimentinių ir apskaičiuotų duomenų adekvatumą palyginę pagal Fišerio kriterijų, esant reikšmingumo lygiui $\alpha = 5\%$ nustatėme, kad regresijos lygtys yra adekvačios. Sudarytos regresijos lygtys su koduotomis reikšmėmis pateikiamos 5.4 lentelėje.



5.1 pav. Keraminių bandinių, išdegtų 1 000 °C temperatūroje, atsparumo šalčiui reikšmės

5.4 lentelė. Atsparumo šalčiui ryšio su technologiniais veiksniais regresijos lygtys

Lygties Nr.	Regresijos lygtis
5.9	$F_T = 15,38 - 5,00 x_1 - 2,25 x_3 - 3,00 x_4 + 2,38 x_8 + 2,37 x_1 x_4 - 1,75 x_1 x_8 - 3,75 x_1 x_9 + 3,50 x_2 x_4$
5.10	$F_{V1} = 16,69 - 3,06 x_1 + 2,31 x_2 - 3,56 x_4 + 3,81 x_8 - 2,44 x_1 x_2 - 3,06 x_1 x_3 + 2,44 x_1 x_4 - 4,44 x_1 x_9$
5.11	$F_{V2} = 57,19 + 18,69 x_1 - 5,19 x_2 - 4,06 x_3 - 39,19 x_4 + 12,06 x_8 - 6,31 x_9 - 6,94 x_1 x_2 - 2,81 x_1 x_3 - 20,19 x_1 x_4 + 7,56 x_1 x_8 - 7,81 x_1 x_9 + 6,69 x_2 x_4$
Pastaba. $x_1, \dots, x_9$ – koduotos veiksmų reikšmės (–1 arba +1).	

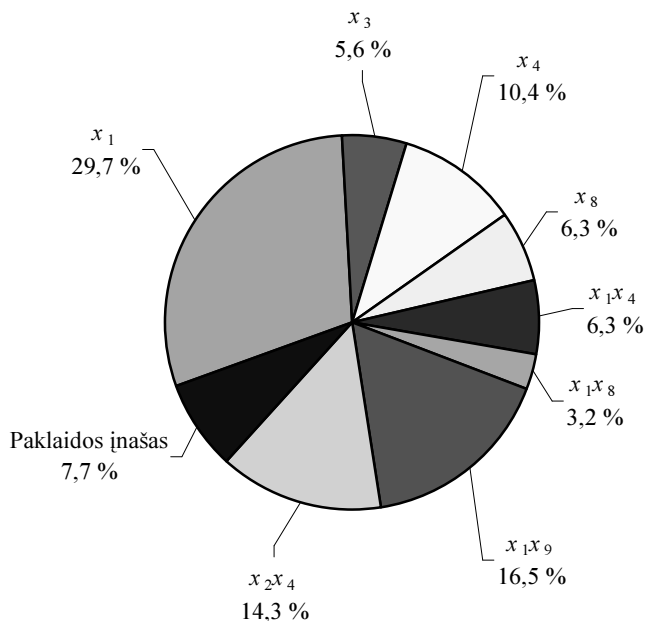
Kaip matyti iš sudarytų lygčių (3.9–3.11) koeficientų, visi nagrinėti technologiniai veiksniai vienaip ar kitaip veikia atsparumą šalčiui, tačiau ne visų veiksmų poveikis yra adityvus, t. y. pasireiškia tiesiogiai per pavienius veiksmus. Dažnai šis poveikis yra sudėtingas ir regresijos lygtyje matome antros eilės veiksmų tarpusavio sąveikas. Iš 3.9–3.11 lygčių bendrų vidutinių koeficientų reikšmių matyti, kad keraminių bandinių vidutinis atsparumas šalčiui nustatytas pagal LST 1272-92, 3.8.2 p. tūrinio šaldymo–šildymo būdu yra 15,38 ciklai, 3.8.3 p. vienpusio šaldymo–šildymo būdu – 16,69 ciklai, o vienpusio šaldymo–šildymo būdu pagal LST 1985:2006, 6 p. – 57,19 ciklų. Tačiau, žinant technologinių veiksmų poveikį ir dydį bei atitinkamai juos parinkus, galima padidinti arba sumažinti atsparumą šalčiui. Sudarytos regresijos lygtys leidžia kompleksiskai pažvelgti į keraminių mūro gaminių technologinio proceso operacijų modeliavimą ir savybių prognozavimą, atsižvelgiant į technologinių veiksmų lygių kitimo ribas.

Didžiausio atsparumo šalčiui, nustatyto tūriniu šaldymo–šildymo būdu, yra 6 ir 8 partijos bandiniai. 6 partijos bandiniai, formuoti iš Tauragės molio su 26 % liesinančiuoju priedu, išlaikyti aukščiausioje degimo temperatūroje 5 h ir aušinti lėtuju aušinimo režimu. 8 partijos bandiniai, formuoti iš Tauragės molio su 8 % liesinančiuoju priedu, 1,2 % išdegančiojo priedo, išlaikyti aukščiausioje degimo temperatūroje 5 h ir aušinti lėtuju aušinimo režimu. Jų atsparumas šalčiui $F_T = 34$ ciklai.

Iš 3.9 lygties ir 5.2 pav. matyti, kad keraminių bandinių atsparumui šalčiui, nustatytam tūrinio šaldymo–šildymo būdu, didžiausią poveikį daro molio žaliavos kokybė. Panaudoto mažiau plastiško Ukmergės molio 20 % priedo neigiamas įnašas atsparumui šalčiui – 29,7 %. Bandinių partijų, pagamintų su Ukmergės molio priedu, vidutinis atsparumas šalčiui – 10,4 ciklus. 22,8 % atliekinių priedų kiekio formavimo mišinyje neigiamas įnašas atsparumui šalčiui – 10,4 %. Taip pat šių veiksmų poveikis pasireiškia per tarpusavio sąveiką (x_1x_4), kurios įnašas atsparumui šalčiui – $\pm 6,3$ %. Kaip matyti (5.3 pav.), norint pagaminti atsparesnius šalčiui gaminius geriausiai naudoti Tauragės telkinio plastiškesnį molį be atliekinių priedų.

Išdegančiojo priedo – 1,2 % antracito kiekis atsparumą šalčiui veikia neigiamai. Šio priedo neigiamas įnašas atsparumui šalčiui sudaro 5,6 %. Literatūroje [20] nurodoma, kad išdegantieji priedai padidina keraminių mūro gaminių atsparumą šalčiui, tačiau yra ir darbų [31], kur nurodoma, kad panaudotas išdegantysis priedas veikė neigiamai. Tiriant pagamintų bandinių makrostruktūrą matome, kad bandinio su antracito priedu (5.4 pav. a) viduje susidarė „juoda šerdis“ ir bandinio vidaus struktūra su kavernomis. Bandinio be antracito (5.4 pav. b) vidaus struktūra be didesnių pokyčių. Bandiniams su

išdegančiaisiais priedais būtina parinkti reikiamą degimo režimą. Šiuo atveju reikėtų jį pailginti ir, atsižvelgiant į antracito savybes, padidinti degimui reikalingo oro kiekį.

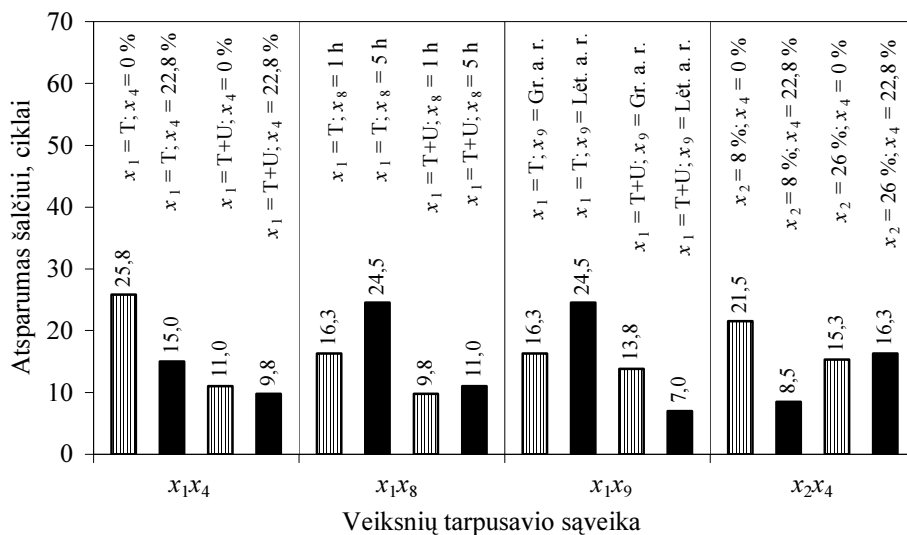


5.2 pav. Technologinių veiksnių įnašas atsparumui šalčiui, nustatytam tūrinio šaldymo–atšildymo būdu pagal LST 1272-92, 3.8.2 p., %: x_1 – molis; x_2 – liesinantieji priedai; x_3 – išdegantysis priedas; x_4 – atliekiniai priedai; x_8 – išlaikymo aukščiausioje degimo temperatūroje trukmė; x_9 – aušinimo režimas

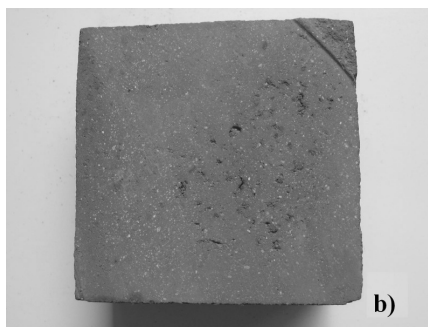
Išlaikymo aukščiausioje degimo temperatūroje trukmės (x_8) ilginimas nuo 1 h iki 5 h teigiamai veikia atsparumą šalčiui ir jos įnašas – 6,3 %. Taip pat teigiamas išlaikymo aukščiausioje degimo temperatūroje trukmės ilginimo poveikis, nepriklausomai nuo naudojamos molio rūšies, matomas iš x_1x_8 veiksnių tarpusavio sąveikos (5.3 pav.). Šios sąveikos įnašas atsparumui šalčiui – $\pm 3,2$ %.

Molio ir aušinimo režimo (x_1x_9) veiksnių tarpusavio sąveikos įnašas atsparumui šalčiui – $\pm 16,5$ %. Naudojant vien tik Tauragės telkinio molį didžiausias teigiamas poveikis gaunamas taikant lėtąjį aušinimo režimą. Formavimo mišinį iš Tauragės ir Ukmergės telkinių molio galima aušinti ir

greituoju aušinimo režimu. Liesinančiųjų priedų ir atliekinių priedų (x_2x_4) veiksmų tarpusavio sąveikos įnašas atsparumui šalčiui – $\pm 14,3$ %. Darbe panaudoti atliekiniai priedai (6 % katalizatoriaus ir 16,8 % stiklo) atsparumą šalčiui veikia neigiamai. Naudojant atliekinius priedus būtina didinti liesiančiųjų priedų kiekį iki 26 %.



5.3 pav. Lygties 5.9 veiksmų tarpusavio sąveikos poveikis atsparumui šalčiui: x_1 – molis (T – Tauragės; $T + U$ – Tauragės + Ukmergės); x_2 – liesinantieji priedai, %; x_4 – atliekiniai priedai, %; x_8 – išlaikymo aukščiausioje degimo temperatūroje trukmė, h; x_9 – aušinimo režimas (Gr.a.r. – greitas aušinimo režimas; Lėt.a.r. – lėtas aušinimo režimas)



5.4 pav. Keraminių bandinių pjūviai:
a) bandinys su antracito priedu; b) bandinys be antracito priedo

Didžiausią keraminių bandinių atsparumą šalčiui, nustatant jį tūriniu šaldymo–atšildymo būdu, galima gauti naudojant Tauragės molį su 8 % liesinančiuoju priedu, išlaikant aukščiausioje degimo temperatūroje 5 h ir aušinant bandinius lėtuju aušinimo režimu. Tokiu atveju apskaičiuotas pagal 5.9 lygtį atsparumas šalčiui $F_T = 39,4$ ciklai, kai 95 % pasikliautinasis intervalas – $[34,7; 44,0]$ ciklai. Kadangi bandiniai, degami 1 000 °C temperatūroje, aukštų atsparumo šalčiui rodiklių nesiekė, pagal minėtąją sudėtį ir degimo bei aušinimo režimą papildomai gaminami nebuvo. Vertinant pagal LST 1985:2006, šie keraminiai bandiniai tinka naudoti neardančioje (F.0) arba vidutiniškai ardančioje (F.1) aplinkoje.

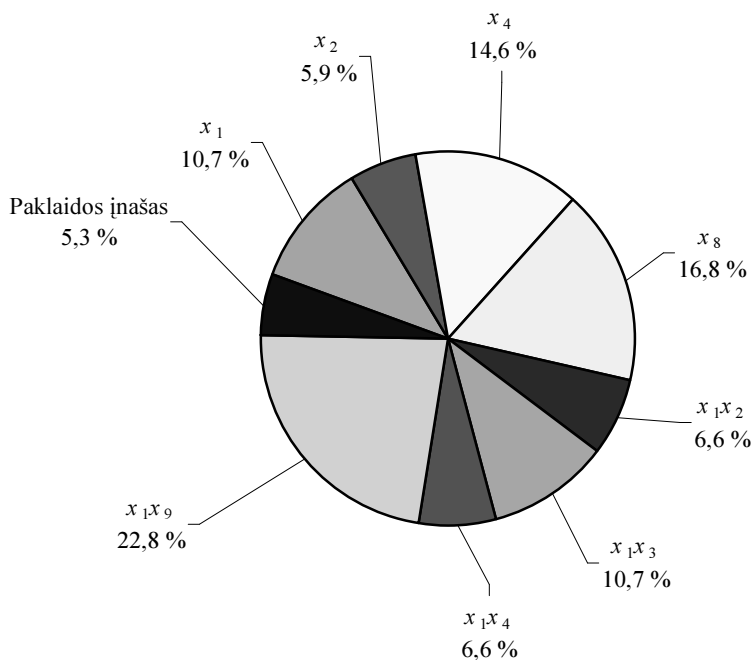
Didžiausio atsparumo šalčiui, nustatyto vienušiu šaldymo–šildymo būdu pagal LST 1272-92, 3.8.3 p., yra 6 ir 8 partijos bandiniai (5.1 pav.). Jų atsparumas šalčiui $F_{V1} = 35$ ciklai. Analizuojant technologinių veiksnių poveikį keraminių bandinių atsparumui šalčiui (F_{V1}) matome (5.10 lygtis, 5.5 pav.), kad didžiausią poveikį daro molio žaliavos kokybė ir degimo bei aušinimo parametrai. Daugiausiai veikiantis molio ir aušinimo režimo (x_1x_9) veiksnių tarpusavio sąveikos bendras įnašas atsparumui šalčiui $\pm 22,8$ %. Iš šios sąveikos matome, kad aušinimo režimas turi būti parenkamas, atsižvelgiant į naudojamos pagrindinės žaliavos, t. y. molio charakteristikas. Naudojant Tauragės telkinio molį, didžiausias teigiamas poveikis gautas taikant lėtąjį aušinimo režimą, pakeitus molio sudėtį, o tuo pačiu ir jo savybes, efektyvesnis greitis aušinimo režimas (5.6 pav.).

Molio veiksnio sąveika su kitais veiksniais labai veikia atsparumą šalčiui. Molio sąveikos su liesinančiais priedais (x_1x_2) įnašas atsparumui šalčiui – $\pm 6,6$ %. Didžiausias šios sąveikos poveikis gautas naudojant Tauragės telkinio molį ir 26 % liesinančiųjų priedų (5.6 pav.). Atskirai liesinančiųjų priedų (x_2) veiksnio įnašas atsparumui šalčiui – 5,9 %. Šio veiksnio koeficiento teigiamas ženklas (5.10 lygtis) patvirtina teigiamą liesinančiųjų priedų kiekio didinimo (iki 26 %) poveikį atsparumui šalčiui.

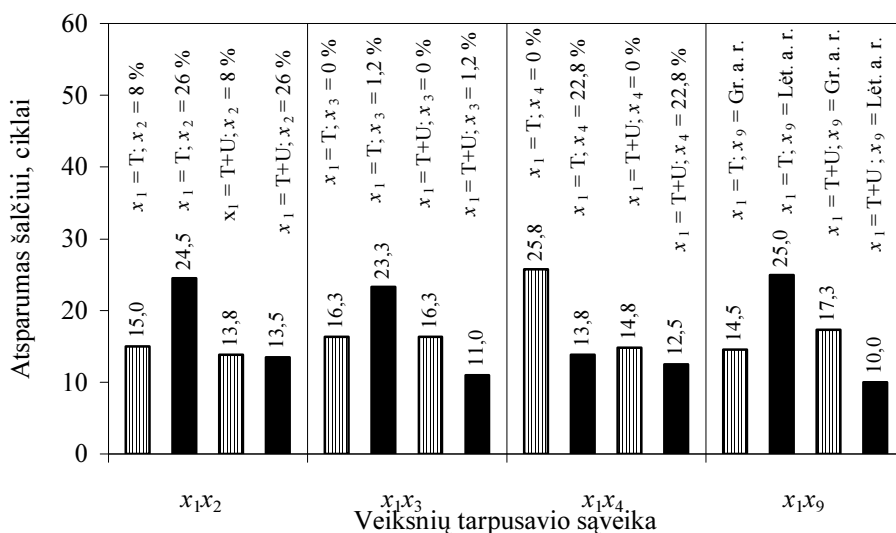
Molio sąveikos su išdegančiuoju priedu (x_1x_3) įnašas F_{1V} reikšmei – $\pm 10,7$ %. Nustatyta, kad geriausiai naudoti Tauragės telkinio molį su 1,2 % išdegančiojo priedo. Molio ir atliekinių priedų (x_1x_4) tarpusavio sąveikos įnašas F_{1V} reikšmei – $\pm 6,6$ %. Atskiras atliekinio priedo (x_4) veiksnio įnašas F_{1V} reikšmei – $\pm 14,6$ %. Atliekinųjų priedų kiekio didinimas mažina atsparumą šalčiui. Išlaikymo aukščiausioje degimo temperatūroje trukmės (x_8) didinimo iki 5 h teigiamas įnašas F_{V1} reikšmei – 16,8 %.

Didžiausią keraminių bandinių atsparumą šalčiui, nustatant jį vienušiu šaldymo–atšildymo būdu, galima gauti, kai bandiniai suformuoti iš Tauragės

molio su 26 % liesinančiuoju priedu, 1,2 % išdegančiojo priedo, išlaikant aukščiausioje degimo temperatūroje 5 h ir aušinant bandinius lėtuju aušinimo režimu. Taip apskaičiuotas $F_{IV} = 41,8$ ciklai, esant pasikliautinumo intervalui $\pm 95\%$ [38,0; 45,7] ciklai. Kadangi bandiniai, degami 1000 °C temperatūroje, aukštų atsparumo šalčiui rodiklių nesiekė, pagal minėtąją sudėtį ir degimo bei aušinimo režimą papildomai gaminami nebuvo. Vertinant pagal LST 1985:2006, šie keraminiai bandiniai tinka naudoti neardančioje (F.0) arba vidutiniškai ardančioje (F.1) aplinkoje.



5.5 pav. Technologinių veiksnių įnašas atsparumui šalčiui nustatytam vienusio šaldymo–atšildymo būdu pagal LST 1272-92, 3.8.3 p., %: x_1 – molis; x_2 – liesinantieji priedai; x_3 – išdegantysis priedas; x_4 – atliekiniai priedai; x_8 – išlaikymo aukščiausioje degimo temperatūroje trukmė; x_9 – aušinimo režimas

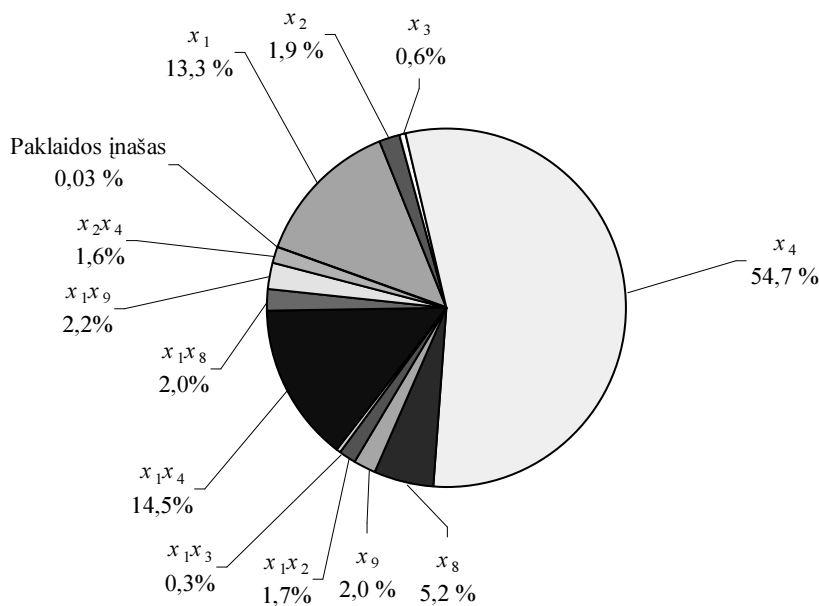


5.6 pav. Lygties 5.10 veiksnių tarpusavio sąveikos poveikis atsparumui šalčiui:
 x_1 – molis (T – Tauragės; $T + U$ – Tauragės + Ukmergės); x_2 – liesinantieji priedai, %; x_3 – išdegantysis priedas, %; x_4 – atliekiniai priedai, %;
 x_9 – aušinimo režimas ($Gr.a.r.$ – greitis aušinimo režimas; $Lët.a.r.$ – lėtas aušinimo režimas)

Atspariausi šalčiui, nustatytam vienpusiu šaldymo–šildymo būdu pagal LST 1985:2006, 6 p., yra 4 partijos bandiniai atlaikę 207 šaldymo–atšildymo ciklus. 4 partijos bandiniai suformuoti iš Tauragės molio su 20 % Ukmergės molio priedu, 8 % liesinančiųjų priedų, išlaikyti aukščiausioje degimo temperatūroje 5 h ir aušinti greituojau aušinimo režimu. 11 ir 14 partijos bandiniai taip pat išsiskiria aukštomis atsparumo šalčiui reikšmėmis, atitinkamai – 131 ir 112 ciklų, tai leidžia priskirti juos aukščiausiai F.2 šalčio atsparumo klasei ir naudoti stipriai ardančioje aplinkoje.

Iš 3.11 lygties ir 5.7 pav. matyti, kad keraminių bandinių atsparumui šalčiui, nustatytam vienpusio šaldymo–šildymo būdu didžiausią poveikį daro panaudoti atliekiniai priedai ir molio žaliavos kokybė. Formavimo mišinio su 22,8 % atliekiniu priedu kiekiu neigiamas įnašas F_{V2} reikšmei – 54,8 %. Keraminių bandinių su atliekiniais priedais vidutinis atsparumas šalčiui – 18,0 ciklų, o be jų – 96,4 ciklai. Panaudoto mažiau plastiško 20 % Ukmergės molio priedo kiekio teigiamas įnašas F_{V2} reikšmei – 13,3 %. Taip pat šių veiksnių poveikis pasireiškia per tarpusavio sąveiką (x_1x_4), kurios įnašas F_{V2} reikšmei –

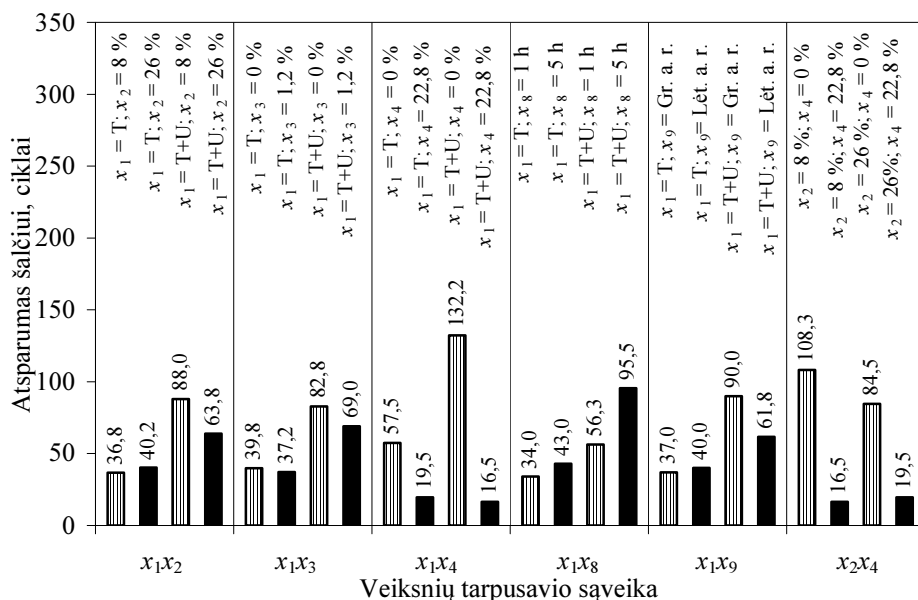
$\pm 14,5\%$. Kaip matome (5.8 pav.), norint pagaminti atsparesnius šalčiui gaminius geriausiai naudoti Tauragės molį su 20 % Ukmergės molio priedu be atliekinių priedų.



5.7 pav. Technologinių veiksnių įnašas atsparumui šalčiui nustatytam tūrinio šaldymo–atšildymo būdu pagal LST 1985:2006, 6 p., %: x_1 – molis; x_2 – liesinantieji priedai; x_3 – išdegantysis priedas; x_4 – atliekiniai priedai; x_8 – išlaikymo aukščiausioje degimo temperatūroje trukmė; x_9 – aušinimo režimas

Išlaikymo aukščiausioje degimo temperatūroje trukmės (x_8) įnašas atsparumui šalčiui – 5,2 %. Ilginant išlaikymą nuo 1 h iki 5 h, atsparumas šalčiui didėja. Kitų veiksnių įnašai nors ir gerokai mažesni (5.7 pav.), tačiau pakankamai reikšmingi, kadangi sąveikauja su didžiausią poveikį turinčiais veiksniais. Keraminių bandinių, pagamintų su didžiausią teigiamą įnašą turinčiais veiksniais, t. y. iš Tauragės telkinio molio su 20 % Ukmergės telkinio molio ir nenaudojant atliekinių priedų, atsparumas šalčiui – 91 ciklas (9 partija), o didžiausias – 207 ciklai (4 partija). Taigi 4 partijos bandinių atsparumo šalčiui padidėjimą lėmė mažą įnašą turintys veiksniai. Liesinančiųjų priedų kiekio mažinimas iki 8 % duoda teigiamą poveikį, o išdegančiųjų priedų kiekio

didinimas iki 1,2 % - neigiamą, tai aiškiai matyti iš regresijos lygties 5.11 ir veiksnių tarpusavio sąveikų (5.7 pav.). Aušinimo režimo (x_9) poveikį lemia naudojamo molio žaliava. Kaip matome iš (x_1x_9) veiksnių tarpusavio sąveikos (5.8 pav.), naudojant plastišką Tauragės telkinio molį, aušinimo režimo poveikis mažas, tačiau naudojant mažiau plastišką molį, greitas aušinimo režimas duoda didesnę atsparumo šalčiui padidėjimą nei lėtas aušinimo režimas.



5.8 pav. Lygties 5.11 veiksnių tarpusavio sąveikos poveikis atsparumui šalčiui:

x_1 – molis (T – Tauragės; T+U – Tauragės + Ukmergės); x_2 – liesinantieji priedai, %; x_3 – išdegantysis priedas, %; x_4 – atliekiniai priedai, %; x_8 – išlaikymo aukščiausioje degimo temperatūroje trukmė, h; x_9 – aušinimo režimas (Gr.a.r. – greitas aušinimo režimas; Lėt.a.r. – lėtas aušinimo režimas)

Įvertinus gautus rezultatus matome, kad didžiausią keraminių bandinių atsparumą šalčiui, nustatytą vienpusiu šaldymo–atšildymo būdu pagal LST 1985:2006, 6 p., galima gauti, kai keraminiai bandiniai suformuoti iš Tauragės molio su 20 % Ukmergės molio priedu, 8 % liesinančiojo priedo, išlaikant aukščiausioje degimo temperatūroje 5 h ir aušinant lėtuju aušinimo režimu. Šiuo atveju nustatyta atsparumo šalčiui reikšmė – 207 ciklai (4 partija).

Sudarytų regresijos lygčių (5.9–5.11) natūrinė išraiška pateikiama 5.5 lentelėje.

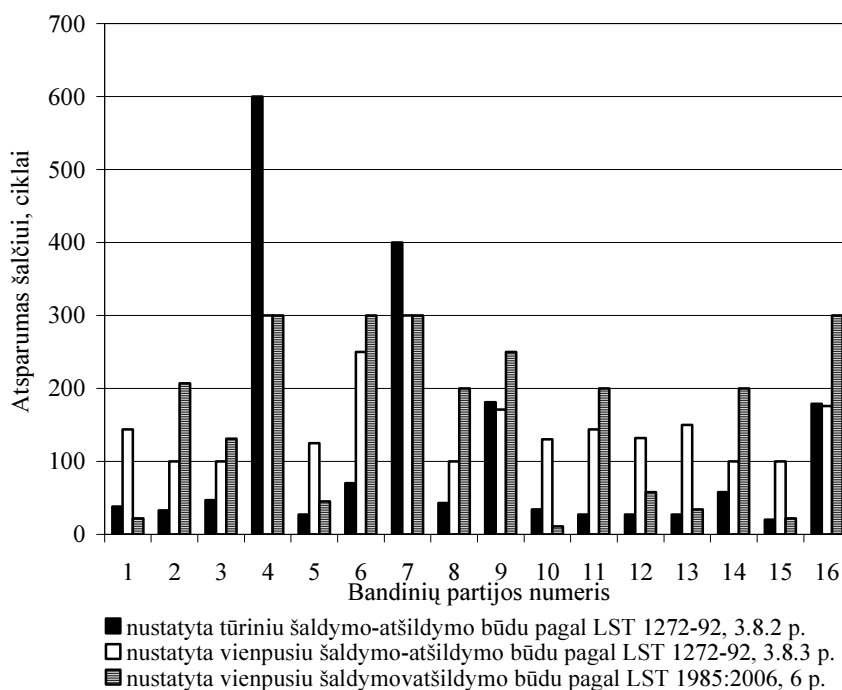
5.5 lentelė. *Atsparumo šalčiui ryšio su technologiniais veiksniais natūrinės regresijos lygtys*

Lygties Nr.	Regresijos lygtys
5.12	$F_T = 23,67 - 4,75 X_1 - 0,39 X_2 - 3,75 X_3 - 0,84 X_4 + 1,19 X_8 + 0,21 X_1 X_4 - 0,88 X_1 X_8 - 3,75 X_1 X_9 + 0,034 X_2 X_4$
5.13	$F_{V1} = 10,17 + 2,17 X_1 + 0,26 X_2 - 0,31 X_4 + 1,90 X_8 - 0,27 X_1 X_2 - 5,10 X_1 X_3 + 0,21 X_1 X_4 - 4,44 X_1 X_9$
5.14	$F_{V2} = 104,79 + 43,46 X_1 - 1,32 X_2 - 6,77 X_3 - 4,55 X_4 + 6,03 X_8 - 6,31 X_9 - 0,77 X_1 X_2 - 4,68 X_1 X_3 - 1,77 X_1 X_4 + 3,78 X_1 X_8 - 7,81 X_1 X_9 + 0,065 X_2 X_4$
Pastaba. X_1 – molis ($X_1 = -1$ (Tauragės molis), arba $X_1 = 1$ (Tauragės + Ukmergės molis); X_2 – liesinančiųjų priedų kiekis, %; X_3 – išdegančiųjų priedų kiekis, %; X_4 – atliekinių priedų kiekis, %; X_8 – išlaikymo aukščiausioje degimo temperatūroje trukmė, h.; X_9 – aušinimo režimas ($X_1 = -1$ (greitasis (0,83–1,17 °C/min)) arba $X_1 = 1$ (lėtasis (0,33–0,83 °C/min))	

5.3.2. Keraminių bandinių, išdegtų 1 070 °C temperatūroje, tyrimai

Pagal eksperimentų planą (3.15 lentelė) pagamintų keraminių bandinių atsparumas šalčiui, nustatytas pagal LST 1272-92, 3.8.2 p. tūrinio šaldymo–atšildymo būdu (F_T), kinta 20–600 ciklų ribose, 3.8.3 p. vienpusio šaldymo–atšildymo būdu (F_{V1}), kinta 100–300 ciklų ribose, o atsparumas šalčiui, nustatytas pagal LST 1985:2006, 6 p. vienpusio šaldymo–atšildymo būdu (F_{V2}), kinta 11–300 ciklų ribose (5.9 pav.).

Atlikę nustatytų keraminių bandinių atsparumo šalčiui reikšmių analizę, sudarėme regresijos lygtis (5.15–5.17), kurios išsamiai aprašo nagrinėtųjų technologinių veiksnių poveikį keraminių bandinių atsparumui šalčiui, nustatytam skirtingais šaldymo–atšildymo būdais [9, 126, 127]. Eksperimentinių ir apskaičiuotų duomenų adekvatumą palyginę pagal Fišerio kriterijų, kai reikšmingumo lygis $\alpha = 5\%$, nustatėme, kad regresijos lygtys yra adekvačios. Sudarytos regresijos lygtys su koduotomis reikšmėmis pateikiamos 5.6 lentelėje.



5.9 pav. Keraminių bandinių, išdegtų 1 070 °C temperatūroje, atsparumo šalčiui reikšmės

5.6 lentelė. Atsparumo šalčiui ryšio su technologiniais veiksniais regresijos lygtys

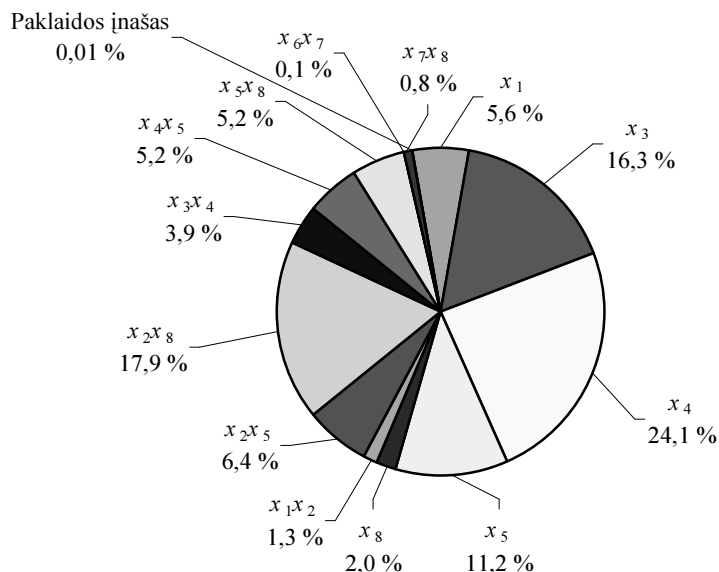
Lygties Nr.	Regresijos lygtys
5.15	$F_T = 92,42 + 60,18 x_1 - 57,44 x_3 - 90,82 x_4 + 54,58 x_5 + 44,47 x_8 - 28,96 x_1x_2 + 44,28 x_2x_5 - 83,09 x_2x_8 + 89,38 x_3x_4 - 35,79 x_4x_5 + 31,44 x_5x_8 + 10,71 x_6x_7 + 34,99 x_7x_8$
5.16	$F_{V1} = 148,22 + 12,26 x_2 - 41,65 x_3 - 40,65 x_4 + 12,35 x_8 - 19,63 x_1x_2 - 20,06 x_1x_8 + 11,24 x_2x_5 - 11,17 x_2x_8 + 38,11 x_3x_4 - 13,67 x_3x_6 - 15,33 x_5x_6 + 31,15 x_5x_8$
5.17	$F_{V2} = 166,88 + 10,09 x_1 + 33,28 x_2 - 21,88 x_3 - 54,11 x_4 - 51,40 x_6 + 37,93 x_8 - 41,00 x_1x_2 + 39,17 x_2x_4 - 41,45 x_2x_5 + 10,13 x_2x_8 - 12,39 x_4x_7 + 5,30 x_5x_7$
Pastaba. $x_1, \dots, x_8$ – koduotos veiksmų reikšmės (–1 arba +1).	

Iš sudarytų lygčių koeficientų matyti, kad visi nagrinėtieji technologiniai veiksniai vienaip ar kitaip veikia atsparumą šalčiui, tačiau ne visų veiksmų poveikis yra adityvus. Iš 5.15–5.17 lygčių bendrų vidutinių koeficientų reikšmių matyti, kad keraminių bandinių vidutinis atsparumas šalčiui nustatytas pagal LST 1272-92, 3.8.2 p. tūrinio šaldymo–šildymo būdu yra 92,42 ciklai, 3.8.3 p. vienpusio šaldymo–šildymo būdu – 148,22 ciklai, o vienpusio šaldymo–šildymo būdu pagal LST 1985:2006, 6 p. – 166,88 ciklai. Keliant degimo temperatūrą, keraminių bandinių atsparumas šalčiui labai padidėjo. Tačiau, kaip matyti iš gana plataus nustatytų atsparumo šalčiui reikšmių intervalo, išdegus bandinius net ir pakankamai aukštoje temperatūroje, galima gauti labai mažas atsparumo šalčiui reikšmes. Sudarytos regresijos lygtys leidžia kompleksiskai pažvelgti į keraminių mūro gaminių technologinio proceso operacijų modeliavimą ir savybių prognozavimą, atsižvelgiant į technologinių veiksmų lygius.

Nustatyta, kad 4 partijos bandiniai yra atspariausi šalčiui, nustatytam tūriniu šaldymo–šildymo būdu. Bandiniai suformuoti iš Tauragės molio su 20 % Ukmergės molio priedu ir 8 % liesinančiojo priedo, formavimo mišinį maišant maišyklėje 15 min, kai juostinio vakuumo preso kameros išretinimo gylis – 0,065 MPa, suspaudimo laipsnis formavimo galvutėje – 12 kg/cm², išlaikymas aukščiausioje degimo temperatūroje – 5 h. Nustatytas atsparumas šalčiui – ≥ 600 ciklų. Taip pat labai aukštos atsparumo šalčiui reikšmės nustatytos 7, 9 ir 16 partijos bandiniams. 7 partijos bandinių, suformuotų iš Tauragės molio su 8 % liesinančiuoju priedu, formavimo mišinį maišant maišyklėje 15 min, išretinant 0,090 MPa vakuumu, formuojant trumpa formavimo galvute ir išlaikant aukščiausioje degimo temperatūroje 5 h, atsparumas šalčiui – 400 ciklų. 9 partijos bandinių, suformuotų iš Tauragės molio su 20 % Ukmergės molio priedu, su 26 % liesinančiojo priedo, formavimo mišinį maišant maišyklėje 5 min, išretinant 0,065 MPa vakuumu, formuojant ilga formavimo galvute ir išlaikant aukščiausioje degimo temperatūroje 5 h, atsparumas šalčiui siekia 181 ciklą. 16 partijos bandinių, suformuotų iš Tauragės molio su 26 % liesinančiuoju priedu, 1,2 % išdegančiojo priedo, formavimo mišinį maišant maišyklėje 15 min, išretinant 0,090 MPa vakuumu, formuojant ilga formavimo galvute ir išlaikant aukščiausioje degimo temperatūroje 5 h, atsparumas šalčiui – 179 ciklai.

Iš 5.15 lygties ir 5.10 pav. matyti, kad keraminių bandinių atsparumui šalčiui, nustatytam tūrinio šaldymo–šildymo būdu, didžiausią poveikį daro formavimo mišinio priedai, o molio žaliavos kokybės poveikis sumažėjo. Taip pat ypač svarbus yra formavimo mišinio homogenizavimo laipsnis ir išlaikymo aukščiausioje degimo temperatūroje trukmė, o išretinimo gylis preso vakuumo

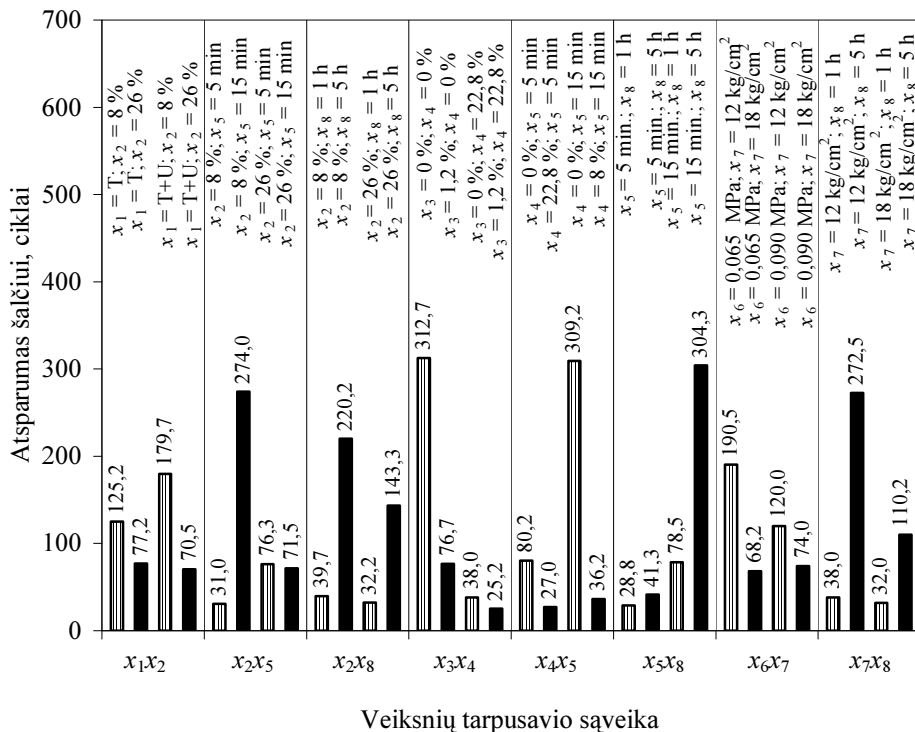
kameroje ir suspaudimo laipsnio formavimo galvutėje veiksnų poveikis nedidelis.



5.10 pav. Technologinių veiksnų įnašas atsparumui šalčiui, nustatytam tirinio šaldymo–atšildymo būdu, pagal LST 1272-92, 3.8.2 p., %: x_1 – molis; x_2 – liesinantieji priedai; x_3 – išdegantysis priedas; x_4 – atliekiniai priedai; x_5 – sumaišymo trukmė; x_6 – išretinimo gylis juostinio preso vakuumo kameroje; x_7 – suspaudimo laipsnis formavimo galvutėje; x_8 – išlaikymo aukščiausioje degimo temperatūroje trukmė

Didžiausią neigiamą poveikį atsparumui šalčiui daro atliekiniai priedai (x_4). 22,8 % atliekinių priedų kiekio neigiamas įnašas atsparumui šalčiui – 24,1 %. Bandinių su atliekiniais priedais vidutinis atsparumas šalčiui yra 31,62 ciklai, kai 95 % pasikliautinis intervalas – [24,67; 38,57] ciklai. Labai siaura pasikliautinio intervalo reikšmė rodo, kad, naudojant atliekinius priedus, neįmanoma pagaminti atsparios šalčiui produkcijos. Tai parodo ir minėtojo technologinio veiksnio tarpusavio sąveika su kitais veiksniais (5.11 pav.). Autorė [128] nustatė, kad, dedant į formavimo mišinį mūsų naudotos technogeninės žaliavos (7–10) % kiekį, aukštų eksploatacinių rodiklių keraminę šukę galima gauti išdeigus bandinius 1150 °C temperatūroje. Lietuvos keraminių mūro gaminių gamintojams tokia aukšta temperatūra yra sunkiai pasiekiamą.

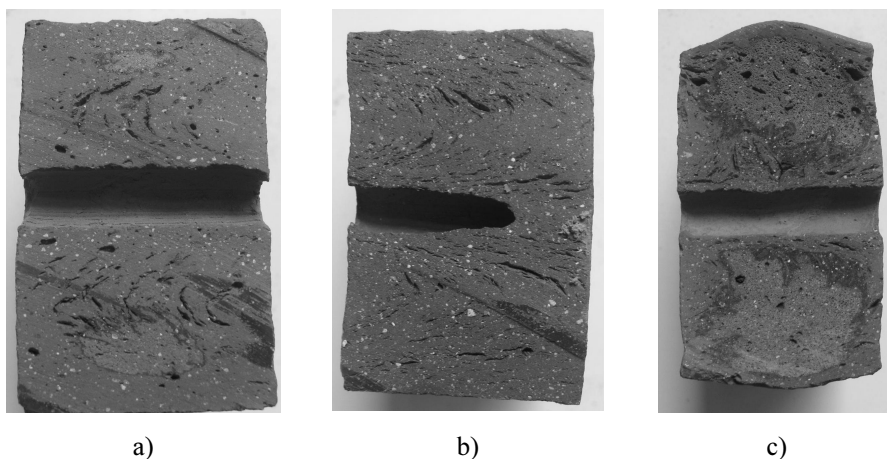
Žemesnėse temperatūrose technogeninės žaliavos priedas nereaguoja su keramine matrica, dėl ko gauti bandiniai yra mažo atsparumo šalčiui.



5.11 pav. Lygties 5.15 veiksnių tarpusavio sąveikos poveikis atsparumui šalčiui: x_1 – molis (T – Tauragės; $T + U$ – Tauragės + Ukmergės); x_2 – liesinantieji priedai, %; x_3 – išdegantysis priedas, %; x_4 – atliekiniai priedai, %; x_5 – sumaišymo trukmė, min; x_6 – išretinimo gylis juostinio preso vakuumo kameroje, MPa; x_7 – suspaudimo laipsnis formavimo galvutėje; x_8 – išlaikymo aukščiausioje degimo temperatūroje trukmė, h

Išdegančiojo priedo neigiamas įnašas – 16,3 %. Bandinių su išdegančiuoju priedu vidutinis atsparumas šalčiui yra 51,00 ciklas, kai 95 % pasikliautinis intervalas – [6,58; 95,42] ciklai. Plati intervalo reikšmė rodo, kad išdegančiojo priedo neigiamas poveikis gali labai sumažėti, tačiau būtina tinkamai parinkti technologinių veiksnių lygius, teigiamai veikiančius atsparumą šalčiui. Kaip jau aptarta, bandiniams su išdegančiais priedais būtina parinkti reikiamą degimo režimą, kadangi dėl neteisingai parinkto režimo susidaro „juoda šerdis“ arba kai

kurie bandiniai net linkę pūstis (5.12 pav.). Bandinio išsipūtimo priežastys gali būti žaliavoje esančių organinių medžiagų reakcijos degimo metu, geležies oksido reakcija su neišdegusia anglimi, dėl to tam tikrame etape išsiskiria CO_2 arba CO ir dujos išpučia jau sukepusį gaminio paviršių [59]. Kadangi degimo laiką gamybinėmis sąlygomis ilginti neracionalu, nustatėme, kad išdegantieji priedai, degant gaminius mūsų parinktais degimo režimais, veikia neigiamai atsparumą šalčiui.



5.12 pav. Keraminių bandinių pjūviai: a) bandinys su antracito priedu; b) bandinys be antracito priedo; c) išsipūtęs bandinys su antracito priedu

Nemažą poveikį atsparumui šalčiui daro liesinantieji priedai ir išlaikymo aukščiausioje degimo temperatūroje trukmė. Šios veiksnių tarpusavio sąveikos (x_2x_8) įnašas – $\pm 17,9\%$. Kaip matyti iš šių veiksnių tarpusavio sąveikos (5.11 pav.), bandinius, suformuotus naudojant 8 % ir 26 % liesinančiųjų priedų, išlaikius aukščiausioje degimo temperatūroje 1 h, vidutinės atsparumo šalčiui reikšmės gaunamos gerokai mažesnės nei išlaikius aukščiausioje degimo temperatūroje 5 h. Norint pagaminti atsparius šalčiui keraminius mūro gaminius, būtina ilginti išlaikymo aukščiausioje degimo temperatūroje trukmę iki 5 h ir mažinti liesinančiųjų priedų kiekį iki 8 %. Didinant liesinančiųjų priedų kiekį, būtina ilginti išlaikymo aukščiausioje degimo temperatūroje trukmę.

Formavimo mišinio homogenizavimo laipsnis taip pat labai veikia atsparumą šalčiui: sumaišymo trukmės ilginimo iki 15 min (x_5) teigiamas įnašas – 11,2 % (5.10 pav.). Svarbios yra sumaišymo trukmės veiksnio sąveikos

su kitais veiksniais (5.11 pav.). Liesinančiųjų priedų sąveikos su sumaišymo trukme (x_2x_5) įnašas – $\pm 6,4\%$. Ilginant sumaišymo trukmę iki 15 min ir mažinant liesinančiųjų priedų kiekį iki 8 %, vidutinės atsparumo šalčiui reikšmės gerokai didėja nei naudojant 26 % liesinančiųjų priedų ir maišant 5 min arba 15 min. Atliekinių priedų ir sumaišymo trukmės tarpusavio (x_4x_5) įnašas – $\pm 5,2\%$. Sumaišymo trukmės ir išlaikymo aukščiausioje degimo temperatūroje trukmės veiksmų (x_5x_8) įnašas – $\pm 5,2\%$. Didžiausias teigiamas poveikis gaunamas maišant 15 min ir 5 h išlaikant aukščiausioje degimo temperatūroje.

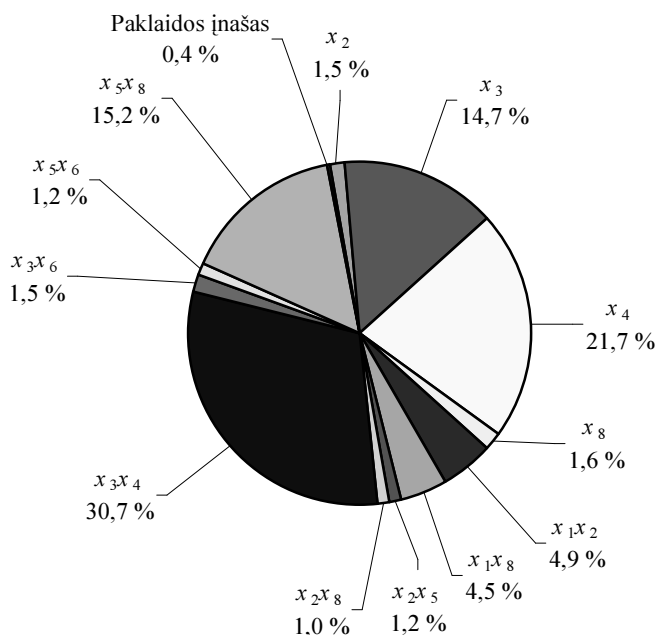
Panaudoto mažiau plastiško 20 % Ukmergės molio priedo (x_1) teigiamas įnašas atsparumui šalčiui – 5,6 %. Molio sąveikos su liesinančiųjų priedų kiekiu (x_1x_2) įnašas – $\pm 1,3\%$. Sumažėjęs molio žaliavos kokybės poveikis atsparumui šalčiui paaiškinamas tuo, kad, išdegus 1 070 °C degimo temperatūroje, vyko intensyvesnės keraminės šukės sukepimo reakcijos.

Formuojant ilga formavimo galvutę (suspaudimo laipsnis – 18 kg/cm²), būtinas didesnis išretinimo gylis, kuris, nors ir nedaug, bet didina atsparumą šalčiui (5.11 pav.).

Suspaudimo laipsnio ir išlaikymo aukščiausioje degimo temperatūroje veiksmų sąveikos (x_7x_8) įnašas – $\pm 0,8\%$. Išlaikant aukščiausioje degimo temperatūroje 5 h gaunama gerokai didesnė atsparumo šalčiui vidutinė reikšmė, nepriklausomai nuo suspaudimo laipsnio. Tačiau geriausias rezultatas gaunamas naudojant trumpą formavimo galvutę kai suspaudimo laipsnis – 12 kg/cm² (5.11 pav.).

Įvertinus gautus rezultatus matyti, kad didžiausią atsparumą šalčiui turiniu šaldymo–atšildymo būdu galima gauti, kai keraminiai bandiniai suformuoti iš Tauragės molio su 20 % Ukmergės molio priedu, 8 % liesinančiųjų priedų, be išdegančiųjų ir atliekinių priedų, formavimo mišinio sumaišymo laikas ne mažiau kaip 15 min, išretinimo gylis juostinio preso vakuumo kameroje – 0,065 MPa, suspaudimo laipsnis formavimo galvutėje – 12 kg/cm², išlaikymas 1 070 °C degimo temperatūroje – 5 h. Tokiu atveju (4 partija) F_T reikšmė ≥ 600 ciklų. Naudojant veiksmus, kurių poveikis neigiamas, taip pat galima gauti aukšto atsparumo šalčiui, nustatyto tūrinių šaldymo–šildymo būdu, keraminius bandinius (7, 9 ir 16 partijos bandiniai). Sumažėjusias šių bandinių atsparumo šalčiui reikšmes lemia netinkamai parinkta formavimo mišinio sudėtis: Tauragės telkinio molis, padidintas liesinančiųjų priedų kiekis, 1,2 % išdegančiojo priedo kiekis bei šių veiksmų sąveikos su kitais veiksniais. Vertinant pagal LST 1985:2006, šie keraminiai bandiniai tinka naudoti vidutiniškai ardančioje (F.1) aplinkoje.

Didžiausio atsparumo šalčiui, nustatyto vienušiu šaldymo–šildymo būdu pagal LST 1272-92, 3.8.3 p., yra 4 ir 7 partijos bandiniai. Didelės atsparumo šalčiui reikšmės nustatytos taip pat 6, 9 ir 16 partijos bandiniams (5.9 pav.). Analizuojant technologinių veiksnių poveikį keraminių bandinių atsparumui šalčiui, nustatytam vienušio šaldymo–šildymo būdu pagal LST 1272-92, 3.8.3 p., matyti (5.16 lygtis, 5.13 pav.), kad didžiausią poveikį daro formavimo mišinio priedai, homogenizavimo laipsnis ir išlaikymo aukščiausioje degimo temperatūroje trukmė, o išretinimo gylio preso vakuumo kameroje ir suspaudimo laipsnio formavimo galvutėje veiksnių poveikis yra mažas.



5.13 pav. Technologinių veiksnių įnašas atsparumui šalčiui, nustatytam vienušio šaldymo–atšildymo būdu pagal LST 1272-92, 3.8.3 p.: x_1 – molis; x_2 – liesinantieji priedai; x_3 – išdegantysis priedas; x_4 – atliekiniai priedai; x_5 – sumaišymo trukmė; x_6 – išretinimo gylis juostinio preso vakuumo kameroje; x_7 – suspaudimo laipsnis formavimo galvutėje; x_8 – išlaikymo aukščiausioje degimo temperatūroje trukmė

Didžiausią neigiamą poveikį atsparumui šalčiui daro išdegantysis priedas (x_3) ir atliekiniai priedai (x_4) bei jų tarpusavio sąveika. 1,2 % išdegančiojo

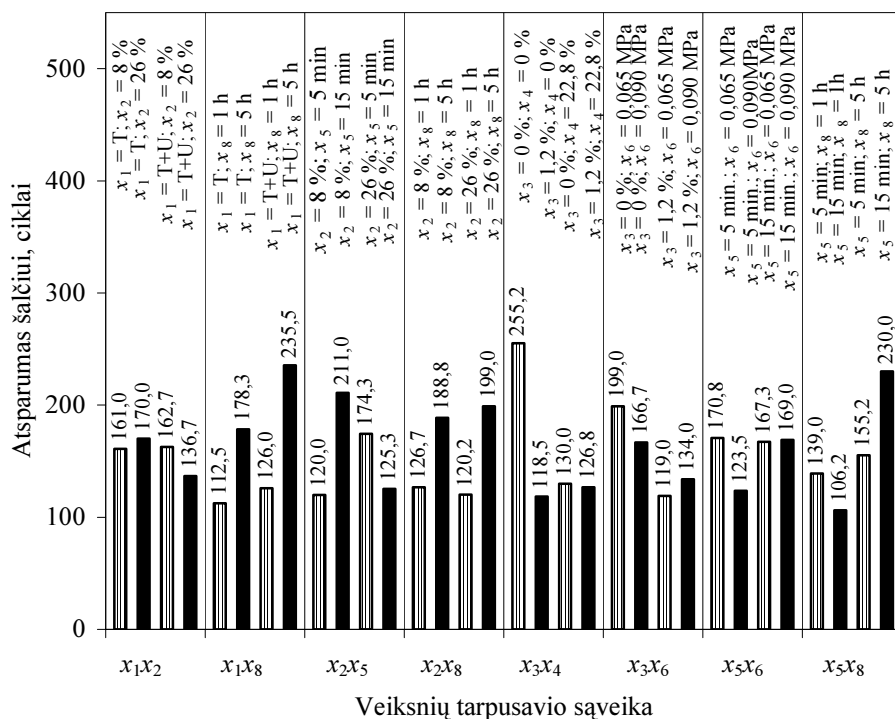
priedo kiekio neigiamas įnašas atsparumui šalčiui – 14,7 %. Bandinių su išdegančiuoju priedu vidutinis atsparumas šalčiui – 128,37 ciklai, kai 95 % pasikliautinis intervalas – [105,11; 151,64] ciklai. 22,8 % atliekinių priedų kiekio neigiamas įnašas atsparumui šalčiui 21,7 %. Bandinių su atliekiniais priedais vidutinis atsparumas šalčiui yra 122,62 ciklai, kai 95 % pasikliautinis intervalas – [105,63; 139,61] ciklai. Bandinių, pagamintų su išdegančiaisiais ir atliekiniais priedais, siaurame intervale išsibarsčiusios atsparumo šalčiui reikšmės parodo, kad, pridėjus minėtųjų priedų į formavimo masę, neįmanoma pagaminti keraminių mūro gaminių, atsparių šalčiui, kaip bandinių be šių priedų, vidutinis atsparumas šalčiui – 255,25 ciklai, kai 95 % pasikliautinis intervalas – [130,00; 352,17] ciklai. Gauto neigiamo priedų poveikio priežastys buvo aptartos anksčiau.

Sumaišymo trukmės ir išlaikymo aukščiausioje degimo temperatūroje trukmės veiksnų tarpusavio sąveikos (x_5x_8) įnašas atsparumui šalčiui – $\pm 15,2$ %. Didžiausias teigiamas poveikis gaunamas maišant 15 min ir išlaikant aukščiausioje degimo temperatūroje 5 h (5.14 pav.). Išlaikymo aukščiausioje degimo temperatūroje trukmės pavienis veiksnys (x_8), kaip matyti iš anksčiau aptartos tarpusavio sąveikos, teigiamai veikia F_{IV} reikšmę, jo įnašas yra 1,6 %.

Liesinančiųjų priedų (x_2) kiekio didinimo iki 26 % poveikis atsparumui šalčiui, kaip rodo lygties koeficientas, yra teigiamas ir jo įnašas – 1,5 %. Tačiau būtina atsižvelgti į šio veiksnio sąveikas su kitais veiksniais, kadangi gauti rezultatai rodo, kad kiti veiksniai gali šį teigiamą poveikį pakeisti į neigiamą. Molio sąveika su liesinančiųjų priedų kiekiu (x_1x_2) veikia F_{VI} reikšmę ir jos įnašas – $\pm 4,9$ %. Mažiausia atsparumo šalčiui reikšmė gaunama naudojant Ukmergės molio priedą ir 26 % liesinančiųjų priedų, kitais atvejais atsparumas šalčiui skiriasi nedaug (5.14 pav.). Molio sąveikos su išlaikymo aukščiausioje degimo temperatūroje trukme (x_1x_8) įnašas atsparumui šalčiui $\pm 4,5$ %. Naudojant Ukmergės molio priedą ir išlaikant aukščiausioje degimo temperatūroje 5 h, gaunamos didžiausios atsparumo šalčiui reikšmės (5.14 pav.). Liesinančiųjų priedų sąveikos su maišymo trukme (x_2x_5) įnašas – $\pm 1,2$ %. Didžiausias poveikis pasiekiamas ilginant sumaišymo trukmę iki 15 min ir mažinant liesinančių priedų kiekį iki 8 % (5.14 pav.). Liesinančiųjų priedų ir išlaikymo aukščiausioje degimo temperatūroje trukmės veiksnų (x_2x_8) sąveikos įnašas $\pm 1,0$ %. Bandinių, suformuotų nepriklausomai nuo liesinančiųjų priedų kiekio, vidutinės atsparumo šalčiui reikšmės, išlaikant aukščiausioje degimo temperatūroje 1 h gaunamos mažesnės nei išlaikant 5 h.

Išretinimo gylio juostinio vakuomo preso kameroje poveikis pasireiškia per tarpusavio sąveikas su kitais veiksniais ir yra nedidelis.

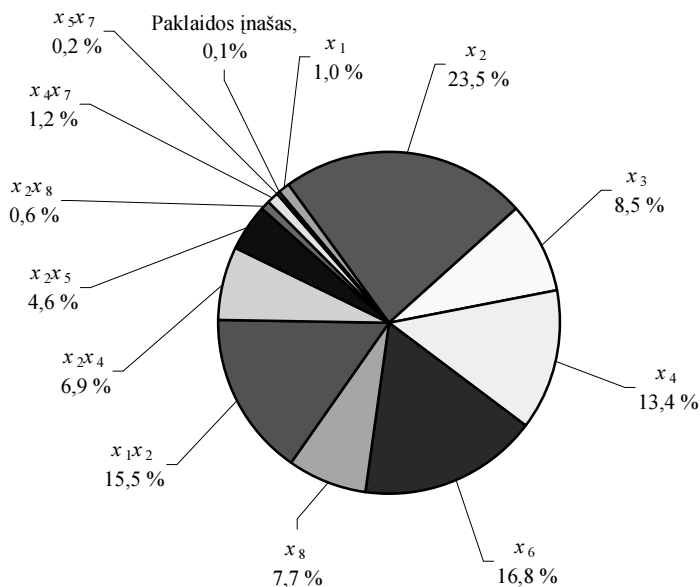
Įvertinus gautus rezultatus, matyti, kad didžiausią atsparumo šalčiui reikšmę (daugiau kaip 300 ciklų), nustatytą vienpusiu šaldymo–atšildymo būdu pagal LST 1272-92, 3.8.3 p., galima gauti, kai keraminiai bandiniai suformuoti iš Tauragės molio su 20 % Ukmergės molio priedu, 8 % liesinančiųjų priedų, formavimo mišinio sumaišymo laikas ne mažiau 15 min, išretinimo gylio juostinio preso vakuomo kameroje (0,065–0,090) MPa, suspaudimo laipsnis formavimo galvutėje – (12–18) g/cm², išlaikymas 1 070 °C degimo temperatūroje – 5 h.



5.14 pav. Lygties 5.16 veiksnių tarpusavio sąveikos poveikis atsparumui šalčiui: x_1 – molis (T – Tauragės; $T + U$ – Tauragės + Ukmergės); x_2 – liesinantieji priedai, %; x_3 – išdegantysis priedas, %; x_4 – atliekiniai priedai, %; x_5 – sumaišymo trukmė, min; x_6 – išretinimo gylio juostinio preso vakuomo kameroje, MPa; x_7 – suspaudimo laipsnis formavimo galvutėje; x_8 – išlaikymo aukščiausioje degimo temperatūroje trukmė, h

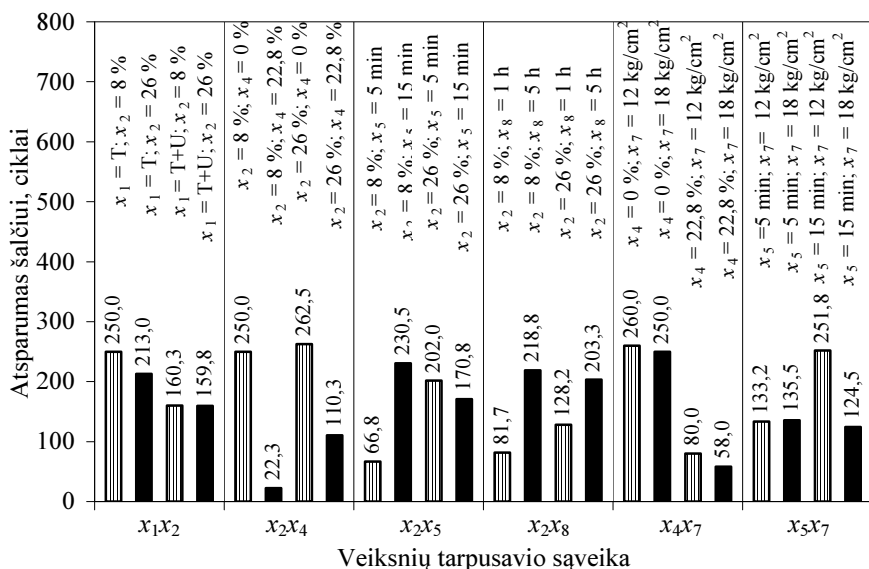
Atspariausi šalčiui, nustatytam vienpusiu šaldymo–šildymo būdą pagal LST 1985:2006, 6 p., yra 4, 6, 7 ir 16 partijos bandiniai, atlaikę > 300 šaldymo–atšildymo ciklą. Taip pat geri atsparumo šalčiui rezultatai 2, 3, 8, 9, 11 ir 14 bandinių partijų. Jų atsparumas šalčiui svyravo 131–250 ciklų ribose. Tai leidžia priskirti visų minėtųjų partijų bandinius aukščiausiai F.2 atsparumo šalčiui klasei ir naudoti stipriai ardančioje aplinkoje.

Iš 5.17 lygties ir 5.15 pav. matyti, kad keraminių bandinių atsparumui šalčiui nustatytam, vienpusio šaldymo–šildymo būdu pagal LST 1985:2006, 6 p., didžiausią poveikį daro molio žaliavos kokybė ir formavimo mišinio priedai. Taip pat svarbus yra formavimo mišinio homogenizavimo laipsnis, išretinimo gylis preso vakuumo kameroje ir išlaikymo aukščiausioje degimo temperatūroje trukmė, o suspaudimo laipsnio formavimo galvutėje veiksnio poveikis nedidelis.



5.15 pav. Technologinių veiksnių įnašas atsparumui šalčiui, nustatytam vienpusio šaldymo–atšildymo būdu pagal LST 1985:2006, 6 p.: x_1 – molis; x_2 – liesinantieji priedai; x_3 – išdegantysis priedas; x_4 – atliekiniai priedai; x_5 – sumaišymo trukmė; x_6 – išretinimo gylis juostinio preso vakuumo kameroje; x_7 – suspaudimo laipsnis formavimo galvutėje; x_8 – išlaikymo aukščiausioje degimo temperatūroje trukmė

Didelį poveikį atsparumui šalčiui daro liesinantieji priedai. Parenkant liesinančiųjų priedų (x_2) kiekį, būtina atsižvelgti į jų tarpusavio sąveiką su kitais veiksniais. Siekiant gauti didesnes atsparumo šalčiui reikšmes, geriausia naudoti vien tik Tauragės telkinio molį ir mažinti liesinančiųjų priedų kiekį iki 8 % (5.16 pav.). Molio ir liesinančiųjų priedų tarpusavio sąveikos (x_1x_2) įnašas atsparumui šalčiui – $\pm 15,5$ %.



5.16 pav. Lygties 5.17 veiksmų tarpusavio sąveikos poveikis atsparumui

šalčiui: x_1 – molis (T – Tauragės; $T + U$ – Tauragės + Ukmergės);

x_2 – liesinantieji priedai, %; x_4 – atliekiniai priedai, %; x_5 – sumaišymo trukmė,

min; x_7 – suspaudimo laipsnis formavimo galvutėje; x_8 – išlaikymo

aukščiausioje degimo temperatūroje trukmė, h

Išdegančiojo priedo neigiamas įnašas – 8,5 %. Bandinių su išdegančiuoju priedu vidutinis atsparumas šalčiui yra 132,37 ciklas, kai 95 % pasikliautinas intervalas – [44,78; 219,97] ciklai. Plati intervalo reikšmė rodo, kad išdegančiojo priedo neigiamą poveikį galima gerokai sumažinti, tačiau būtina naudoti kitus technologinius veiksmus, teigiamai veikiančius atsparumą šalčiui.

Atliekinių priedų 22,8 % kiekio panaudojimas mažina atsparumą šalčiui, neigiamas jų įnašas – 13,4 %. Taip pat iš liesinančiųjų ir atliekinių priedų (x_2x_4) bei atliekinių priedų ir suspaudimo laipsnio formavimo galvutėje veiksmų (x_4x_7)

tarpusavio sąveikų (5.16 pav.) matome, kad atliekiniai priedai labai mažina atsparumą šalčiui. Be jų keraminių bandinių vidutinis atsparumas šalčiui – 256,25 ciklai, kai 95 % pasikliautinis intervalas – [214,82; 297,67] ciklai. Bandinių su atliekiniais priedais vidutinė atsparumo šalčiui reikšmė – 66,25 ciklai, kai 95 % pasikliautinis intervalas – [9,25; 123,24] ciklai.

Padidinus išretinimo gylį preso vakuumo kameroje (x_6) iki 0,090 MPa, teigiamas įnašas – 16,8 %. Šiuo atveju labai padidėjo išretinimo gylio įnašas atsparumui šalčiui, priešingai nei prieš tai nagrinėtais atvejais.

Sumaišymo trukmės poveikis pasireiškia per sąveiką su liesinančiaisiais priedais (x_2x_5) ir jos bendrasis įnašas – $\pm 4,6$ %. Didžiausias teigiamas poveikis pasiekiamas ilginant sumaišymo trukmę iki 15 min. Išlaikymo aukščiausioje degimo temperatūroje trukmės veiksnys (x_8) teigiamai veikia atsparumą šalčiui, jo įnašas – 7,7 %.

Įvertinus gautus rezultatus matyti, kad didžiausią atsparumą šalčiui, nustatytą vienpusiu šaldymo–atšildymo būdu pagal LST 1985:2006, galima gauti, kai keraminiai bandiniai suformuoti iš Tauragės molio, 8 % liesinančiųjų priedų, formavimo mišinio sumaišymo laikas ne mažiau 15 min, išretinimo gylis juostinio preso vakuumo kameroje – 0,090 MPa, suspaudimo laipsnis formavimo galvutėje – 12 kg/cm², išlaikymas 1 070 °C degimo temperatūroje – 5 h. Tuomet atsparumo šalčiui reikšmės daugiau nei 300 ciklų.

Sudarytų regresijos lygčių (5.15–5.17) natūrinė išraiška pateikiama 5.7 lentelėje.

5.7 lentelė. Atsparumo šalčiui ryšio su technologiniais veiksniais natūrinės regresijos lygtys

Lygties Nr.	Regresijos lygtys
5.15	$F_T = 703,23 + 114,88 X_1 + 4,01 X_2 - 244,70 X_3 - 9,53 X_4 - 8,09 X_5 - 4284,00 X_6 - 39,63 X_7 - 18,21 X_8 - 3,22 X_1X_2 + 0,98 X_2X_5 - 4,62 X_2X_8 + 13,07 X_3X_4 - 0,63 X_4X_5 + 3,14 X_5X_8 + 285,60 X_6X_7 + 5,83 X_7X_8$
5.16	$F_{V1} = 56,36 + 67,17 X_1 + 0,73 X_2 + 8,32 X_3 - 6,91 X_4 + 5,42 X_5 + 3546,40 X_6 - 14,43 X_8 - 2,18 X_1X_2 - 10,03 X_1X_8 + 0,25 X_2X_5 - 0,62 X_2X_8 + 5,57 X_3X_4 - 1822,67 X_3X_6 - 245,28 X_5X_6 + 3,12 X_5X_8$
5.17	$F_{V2} = 378,94 + 87,53 X_1 + 6,87 X_2 - 36,47 X_3 - 5,80 X_4 + 10,36 X_5 - 4112,00 X_6 + 9,40 X_8 - 4,56 X_1X_2 + 0,38 X_2X_4 - 0,92 X_2X_5 + 0,56 X_2X_8 - 0,36 X_4X_7 + 0,35 X_5X_7$
Pastaba. X_1 – molis ($X_1 = -1$ (Tauragės molis), arba $X_1 = 1$ (Tauragės + Ukmergės molis); X_2 – liesinančiųjų priedų kiekis, %; X_3 – išdegančiųjų priedų kiekis, %; X_4 – atliekinių priedų kiekis, %; X_5 – formavimo mišinio sumaišymo trukmė, min; X_6 – išretinimo gylis juostinio preso vakuumo kameroje, MPa; X_7 – suspaudimo laipsnis formavimo galvutėje, kg/cm ² ; X_8 – išlaikymo aukščiausioje degimo temperatūroje trukmė, h	

5.4. Keraminių bandinių struktūros tyrimai ir gautų rezultatų analizė

Keraminių bandinių atsparumą šalčiui lemia šaldymo būdas ir jų makro- bei mikrostruktūra. Darbuose [92, 93] nurodoma, kad ekvivalentinio kapiliaro (poros) spindulys keraminiuose bandiniuose lemia vyraujančią drėgmės migracijos mechanizmą ir kryptį. Jeigu daugiausia yra porų su dideliu ekvivalentiniu spinduliu, galima tikėtis, kad greičiau suirs bandiniai, šaldomi iš visų pusių nei iš vienos, o jeigu daugiau porų su mažu ekvivalentiniu spinduliu, priešingai – greičiau suirs bandiniai, šaldomi iš vienos pusės.

Darbuose [80–84, 89] nustatytas ryšys tarp keraminių gaminių struktūros (porų tūrio, jų skersmens, rezervinių porų kiekio ir kt.) bei atsparumo šalčiui. Tačiau analizuojant tuos darbus iškyla duomenų palyginimo problema, dėl nevienodais būdais ir metodikomis nustatyto atsparumo šalčiui, ką patvirtina minėtųjų autorių gauti skirtingi rezultatai. Tam įtakos galėjo turėti ir tai, kad naudotos skirtingos žaliavos.

Nustačius nagrinėtųjų technologinių veiksnių reikšmingumą atsparumui šalčiui, iškilo būtinybė įvertinti ir atspariausių šalčiui keraminių bandinių struktūrą bei jos pokyčius, atsižvelgiant į technologinių veiksnių lygius. Keraminių bandinių mikrostruktūrą įvertinome gyvsidabrinio porų matuokliu, tačiau dėl mažų tiriamųjų bandinių matmenų šis metodas gali būti naudojamas tik kompleksiskai su kitais struktūros vertinimo metodais vertinant struktūrą [129]. Todėl makrostruktūrai vertinti panaudoti 5.1 skyriuje pateikti struktūriniai rodikliai, kadangi jie tiesiogiai apibūdina viso keraminio bandinio makrostruktūrą. Keraminių bandinių, išdegtų 1 000 °C (4, 7, 11, 14 partijos) ir 1 070 °C (4, 14 partijos) temperatūroje, makrostruktūros vertinimo rodikliai bei fizikinės savybės pateikiami 5.8 lentelėje, o mikrostruktūros – 5.9 lentelėje ir 5.17 bei 5.18 paveiksluose.

Nustatyta, kad tyrinėtųjų partijų keraminiuose bandiniuose vyrauja $\geq 0,1 \mu\text{m}$ – $< 1 \mu\text{m}$ skersmens poros. Keraminiuose bandiniuose, išdegtuose 1 070 °C temperatūroje (4 ir 14 partijos), porų pasiskirstymas tolygesnis pagal skersmenį (5.17 ir 5.18 pav.), juose vyraujanti porų frakcija užima 29,6–34,7 % viso porų tūrio. Keraminiuose bandiniuose, išdegtuose 1 000 °C temperatūroje (4, 7, 11 ir 14 partijos), vyraujanti porų frakcija užima 52,6–80,3 % viso porų tūrio.

5.8 lentelė. Keraminių bandinių struktūriniai rodikliai ir fizikinės savybės

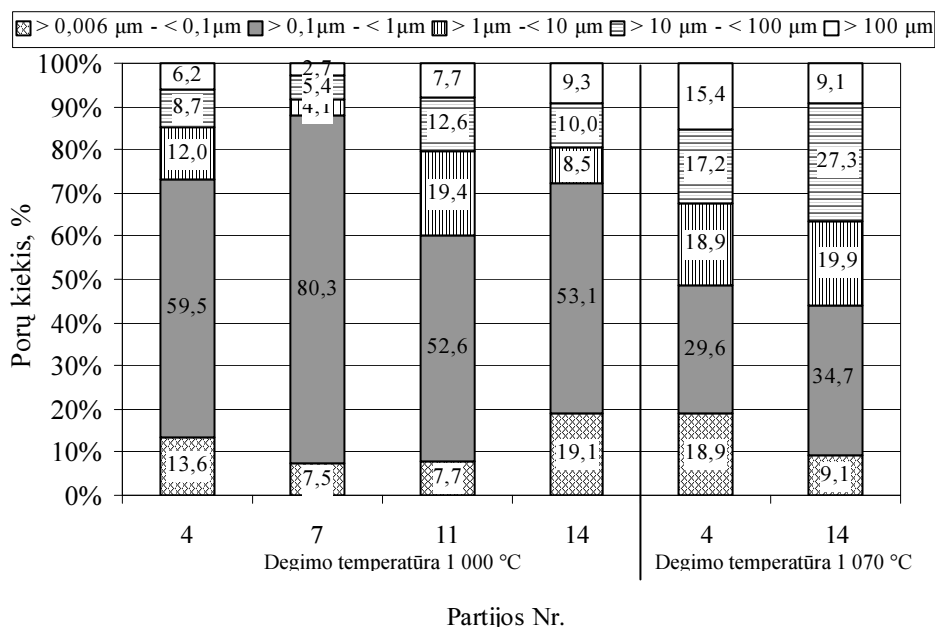
Partijos Nr.	W_E , %	W_R , %	R , %	D , %	N , šal. vnt.	$c_{w,s}$, (kg/m ² ·min)	W_h , %	ρ , kg/m ³	Atsparumas šalčiui, ciklai		
										F_T	F_{V1}
Keraminiai bandiniai, išdegti 1 000 °C temperatūroje											
4	13,7	19,7	30,5	4,1	3,79	1,1	6,4	2 010	20	25	207
7	22,6	26,1	13,4	2,8	1,56	1,0	10,3	1 960	25	10	45
11	17,7	21,9	19,2	3,6	0,40	1,3	8,2	1 950	10	19	131
14	17,4	24,9	30,1	3,0	5,00	0,5	8,0	1 980	7	5	112
Keraminiai bandiniai, išdegti 1 070 °C temperatūroje											
4	2,6	8,9	70,8	10,2	0,53	0,2	0,9	2 300	>600	>300	>300
14	11,7	19,4	39,7	4,2	0,47	0,2	2,7	1 890	58	100	200
Pastaba. W_E – efektyvus poringumas, %; W_R – bendrasis atviras poringumas, %; R – poringosios erdvės rezervas, %; D – sąlyginis porų ir kapiliarų sienelės storis, %; N – struktūros nevienalytiškumo laipsnis, šal.vnt.; $c_{w,s}$ – pradinis vandens įgerties greitis, (kg/m ² ·min); W_h – įmirkis, %; ρ – neto sausasis tankis, kg/m ³ ; F_T – atsparumas šalčiui, nustatytas tūriniu būdu pagal LST 1272-92, ciklai; F_{V1} – atsparumas šalčiui, nustatytas vienpusiu būdu pagal LST 1272-92, ciklai; F_{V2} – atsparumas šalčiui nustatytas, vienpusiu būdu pagal LST 1985:2006, ciklai.											

5.9 lentelė. Keraminių bandinių porų tūrio ir skersmens pasiskirstymo charakteristikos

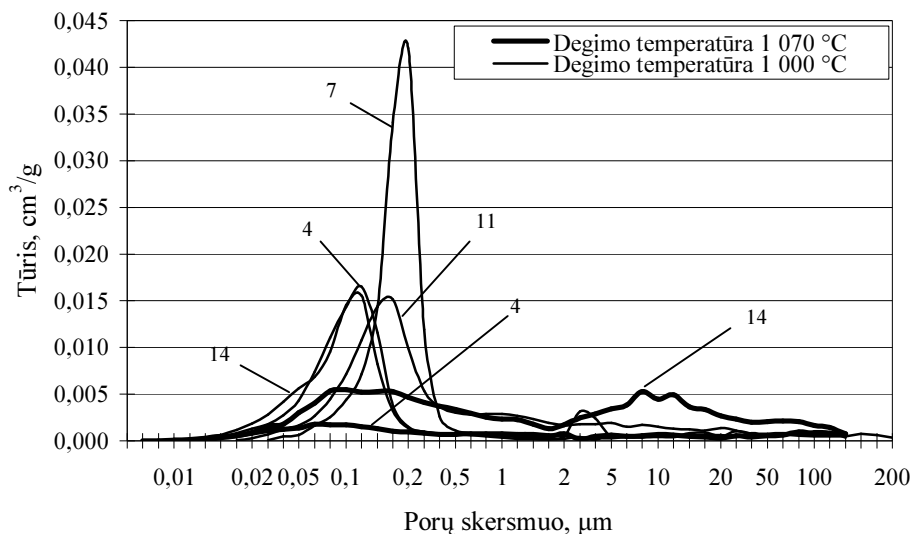
Partijos Nr.	Rodiklis	Porų skersmuo, μm					Bendrasis porėtumas, %
		≥ 0,006 – < 0,1	≥ 0,1 – < 1	≥ 1 – < 10	≥ 10 – < 100	≥ 100	
Keraminiai bandiniai, išdegti 1 000 °C temperatūroje							
4	Porų tūris, cm ³ /g	0,017	0,073	0,015	0,011	0,008	12,2
7	Porų tūris, cm ³ /g	0,011	0,117	0,006	0,008	0,004	14,6
11	Porų tūris, cm ³ /g	0,013	0,086	0,032	0,021	0,013	16,3
14	Porų tūris, cm ³ /g	0,025	0,070	0,011	0,013	0,012	13,3
Keraminiai bandiniai, išdegti 1 070 °C temperatūroje							
4	Porų tūris, cm ³ /g	0,011	0,017	0,011	0,010	0,009	5,7
14	Porų tūris, cm ³ /g	0,014	0,052	0,030	0,041	0,014	14,9

Didžiausio atsparumo šalčiui keraminių bandinių (4 partija, degimo temperatūra 1 070 °C) struktūriniai rodikliai yra tokie: bendrasis porėtumas – 5,7 %, efektyvusis poringumas – 2,6 % ir bendrasis atviras poringumas – 8,9 %,

poringosios erdvės rezervas – 70,8 %, sąlyginis porų ir kapiliarų sienelės storis – 10,2 %, porų pasiskirstymas pagal frakcijas yra tolygus. Mažo atsparumo šalčiui keraminių bandinių (7 partija, degimo temperatūra 1 000 °C) struktūriniai rodikliai yra tokie: bendrasis porėtumas – 14,6 %, efektyvusis poringumas – 22,6 % ir bendrasis atviras poringumas – 26,1 %, poringosios erdvės rezervas – 13,4 % ir sąlyginis porų ir kapiliarų sienelės storis – 2,8 %. Vertinant šios partijos fracinį porų pasiskirstymą, matyti (5.17 ir 5.18 pav.), kad didžiausią porų turį užima $\geq 0,1 \mu\text{m} - < 1 \mu\text{m}$ dydžio poros – 80,3 %. 14 partijos bandinių, išdegtų 1 070 °C temperatūroje, bendrasis porėtumas – 14,9 % ir yra panašus kaip ir keraminių bandinių, išdegtų 1 000 °C temperatūroje. Tačiau 14 partijos bandiniai (degimo temperatūra 1 070 °C) turi didesnę poringosios erdvės rezervą, mažesnę efektyvųjį ir bendrąjį atvirąjį poringumą, o porų pasiskirstymas juose tolygesnis. Tas ir lemia didesnę atsparumą šalčiui.



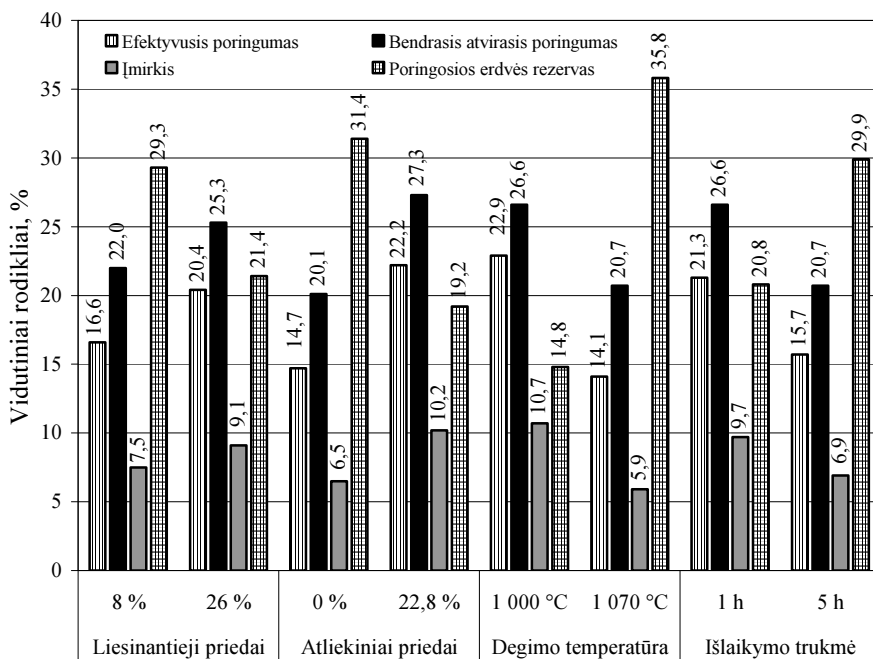
5.17 pav. Keraminių bandinių porų kiekio pasiskirstymas



5.18 pav. *Keraminių bandinių, išdegtų 1 000 °C (4, 7, 11, 14 partijos) ir 1 070 °C (4, 14 partijos) temperatūroje porų tūrio ir skersmens pasiskirstymas*

Ištyrus reikšminių veiksnių ir jų tarpusavio sąveikų poveikį pagrindiniams keraminių bandinių makrostruktūriniais rodikliais, nustatyta, kad daugiausia efektyvųjį poringumą (W_E), bendrąjį atvirąjį poringumą (W_R), poringosios erdvės rezervą (R) ir įmirkį (W_R) lemia degimo temperatūros dydis ir išlaikymo joje laikas, atliekinių ir liesinančiųjų priedų kiekiai. Keliant degimo temperatūrą iki 1 070 °C bei ilginant išlaikymo joje laiką nuo 1 h iki 5 h W_E , W_R , W_h rodikliai mažėja, o R – didėja. Didinant liesinančiųjų priedų kiekį nuo 8 % iki 26 %, o atliekinių priedų kiekį nuo 0 % iki 22,8 %, W_E , W_R , W_h rodikliai didėja, o R mažėja (5.19 pav.). Taip pat W_E , W_R , W_h rodiklius veikia ir išdegančiojo priedo kiekis, tačiau jo poveikis nevienodas, esant skirtingoms degimo temperatūroms. 1 070 °C temperatūroje šis priedas didino W_E , W_R , W_h reikšmes, o 1 000 °C priešingai – mažino.

Pagal gautus rezultatus nustatyta, kad keraminiams bandiniams, išdegtiems 1 000 °C temperatūroje, vienas iš veiksnių, kurio poveikis didžiausias, nepriklausomai nuo šaldymo būdo, yra molio žaliavos kokybė, vertinama pagal plastiškumą. Bandiniams, išdegtiems 1 070 °C temperatūroje, molio žaliavos kokybės poveikis sumažėja, tačiau išlieka svarbus. Autoriai [76], atlikę daugiakriterį eksperimentą, nustatė, kad keraminių gaminių kokybė labiausiai priklauso nuo molio plastiškumo – didelio plastiškumo „riebūs“ moliai turi būti liesinami.



5.19 pav. Reikšminių veiksnių poveikis keraminių bandinių efektyviajam poringumui, bendrajam atvirajam poringumui, poringosios erdvės rezervui ir įmirkiiui

5.10 lentelėje pateikiami technologinių veiksnių lygiai, kuriems esant nustatytos didžiausios atsparumo šalčiui reikšmės įvertintos skirtingomis metodikomis keraminiams bandiniams, išdegtiems 1 000 °C ir 1 070 °C temperatūrose.

Iš 5.10 lentelės matyti, kad 1 000 °C temperatūroje išdegtiems bandiniams atsparumas šalčiui, nustatytas pagal LST 1272-92. 3.8.2 p. tūrinio ir 3.8.3 p. viopusio šaldymo–atšildymo būdais, buvo didžiausias bandiniams vien tik iš Tauragės telkinio molio. Vienpusiu būdu nustatytam atsparumui šalčiui padidinti reikia didinti liesinančiųjų priedų kiekį, tai patvirtina ir didelio plastiškumo molių liesinimo būtinybę. Gauti priešaringi rezultatai, gali būti paaiškinami atsparumo šalčiui nustatymo būdų netapatumu. Tačiau šiais būdais nustatytas atsparumas šalčiui buvo nedidelis – iki 35 ciklų, tai parodo, kad sudėtinga pagaminti atsparią šalčiui produkciją, degant žemose (1 000 °C) temperatūrose.

5.10 lentelė. Technologinių veiksnių lygiai, lemiantys didžiausias atsparumo šalčiui reikšmes

Atsparumas šalčiui nustatytas pagal: Veiksny	LST 1272-92, 3.8.2 p. tūrinio šaldymo– atšildymo būdu	LST 1272-92, 3.8.3 p. vienpusio šaldymo– atšildymo būdu	LST 1985:2006, 6 p. vienpusio šaldymo– atšildymo būdu	struktūrinius ir deformacinius rodiklius [92, 93, 102]
Keraminiams bandiniams, išdegtiems 1 000 °C temperatūroje				
Molis	Tauragės	Tauragės	Tauragės+ Ukmergės	Tauragės+ Ukmergės
Liesinantieji priedai	8 %	26 %	8 %	8 %
Išdegantysis priedas	0 %	1,2 %	0 %	0 %
Atliekiniai priedai	0 %	0 %	0 %	0 %
Išlaikymo aukščiausioje degimo temperatūroje trukmė	5 h	5 h	5 h	5 h
Aušinimo režimas	Lėtasis (0,33–0,83) °C/min	Lėtasis (0,33–0,83) °C/min	Greitasis (0,83–1,17) °C/min)	Greitasis (0,83–1,17) °C/min)
Keraminiams bandiniams, išdegtiems 1 070 °C temperatūroje				
Molis	Tauragės+ Ukmergės	Tauragės+ Ukmergės	Tauragės	Tauragės
Liesinantieji priedai	8 %	8 %	8 %	8 %
Išdegantysis priedas	0 %	0 %	0 %	0 %
Atliekiniai priedai	0 %	0 %	0 %	0 %
Sumaišymo trukmė Z tipo maišyklėje	15 min	15 min	15 min	15 min
Išretinimo gylis juostinio preso vakuomo kameroje	0,065 MPa	0,065 MPa	0,090 MPa	0,090 MPa
Suspaudimo laipsnis formavimo galvutėje	Trumpa formavimo galvutė (12 kg/cm ²)	Neturėjo poveikio	Trumpa formavimo galvutė (12 kg/cm ²)	Trumpa formavimo galvutė (12 kg/cm ²)
Išlaikymo aukščiausioje degimo temperatūroje trukmė	5 h	5 h	5 h	5 h

Pagal LST 1985:2006, 6 p. vienpusio šaldymo–atšildymo būdu nustatyta didžiausia atsparumo šalčiui reikšmė – 207 ciklai. Pagal šį standartą jau atlaikę 100 ciklų keraminiai mūro gaminiai priskiriami aukščiausiai atsparumo šalčiui kategorijai. Tačiau, ar ši atsparumo šalčiui reikšmė tinka įvertinti keraminiams mūro gaminiams kaip atspariems šalčiui Lietuvos klimato sąlygomis, nėra aišku.

Išdegantysis priedas, degant aukštoje 1 070 °C temperatūroje, veikia neigiamai. Degant 1 000 °C temperatūroje, jo poveikis neigiamas, išskyrus mažą teigiamą poveikį, šaldant vienpusiu šaldymo–atšildymo būdu pagal LST 1272-92, 3.8.3 p. Kaip anksčiau aptarta, išdegančiųjų priedų neigiamo poveikio priežastys yra netinkamas degimo režimas, kuris formavimo masėms su išdegančiais priedais turi būti parenkamas atskirai.

Mūsų naudota naftos pramonės technogeninė atlieka – katalizatorius keraminėje matricoje reaguoja tik labai aukštose temperatūrose [128]. Formavimo mišiniuose katalizatoriaus priedo buvo naudojama nedaug – 6 %, dėl lengvai lydžių molių savybių negalėjome didinti degimo temperatūros, todėl atliekiniai priedai veikė neigiamai.

Išlaikymo aukščiausioje degimo temperatūroje trukmės ilginimas teigiamai veikė atsparumą šalčiui, nustatytam pagal visas metodikas, ir yra vienas iš pagrindinių veiksnių, didinančių atsparumą šalčiui.

Aušinimo režimo greitis priklauso nuo naudojamo molio žaliavos savybių. Lietuvos lengvai lydūs hidrožerutiniai moliai priskiriami vidutiniškai jautriems moliams. Naudojant plastišką Tauragės molį, rekomenduojamas lėtas aušinimo režimas, kadangi aušinant per greitai kyla didelis pavojus susidaryti įtrūkomis, tik pridėjus mažiau plastiško Ukmergės molio galima būtų naudoti ir greitąjį aušinimo režimą.

Sumaišymo trukmės ilginimas arba žaliavų paruošimo etapo gamybos procese tobulinimas ir gerinimas didina keraminių mūro gaminių atsparumą šalčiui. Šio etapo metu formavimo mišinio komponentai tolygiau paskirstomi ir formavimo masė pakankamai homogenizuojama, tai leidžia gauti mažiau anizotropišką struktūrą, ypač plastinio formavimo būdu, ir didina atsparumą šalčiui, nustatomą tiek tūriniu, tiek vienpusiu šaldymo–atšildymo būdu.

Išretinimo gylio juostinio preso vakuumo kameroje didinimas veikė teigiamai tik atsparumą šalčiui, nustatytą pagal LST 1985:2006, 6 p vienpusiu šaldymo–atšildymo būdu. Išretinimo gylio poveikis, palyginti su kitų veiksnių poveikiais, yra labai mažas. Tai parodo, kad didžiausias dėmesys, gerinant keraminių mūro gaminių kokybę, pirmiausia turi būti skiriamas formavimo mišinio sudėties ir degimo parametrams reguliuoti.

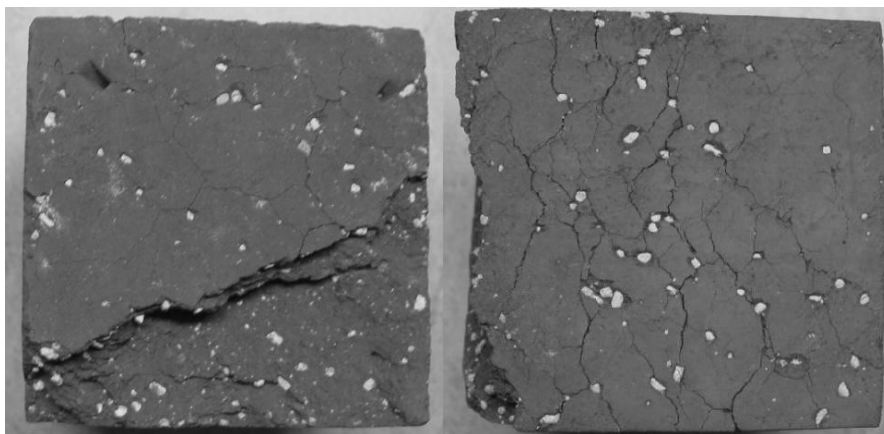
Parenkant suspaudimo laipsnį formavimo galvutėje būtina atsižvelgti į naudojamų molių reologines savybes ir gaminių dydžius. Kadangi formuojant bandinius, artimomis gamybinėms sąlygomis gaminome mažesnius nei įprasta keraminius mūro gaminius (tuštymėtąsias plytas), tai labiau tiko mažesnis suspaudimo laipsnis.

Vertinant atsparumą šalčiui pagal struktūrinius ir deformacinius rodiklius bei tiesioginius atsparumo šalčiui rezultatus, matyti, kad šie būdai tinka prognozuoti keraminių mūro gaminių atsparumą šalčiui (5.11 lentelė).

Prognozuojant pagal struktūrinius ir deformacinius rodiklius buvo nustatyta, kad didžiausias atsparumas šalčiui turi būti gautas 4 bandinių partijai, taip pat 11 ir 14 partijos bandiniams, išdegtiems 1 000 °C temperatūroje. Bandiniams, išdegtiems 1 070 °C temperatūroje, taip pat buvo prognozuojama, kad atspariausi šalčiui bus 4 ir 7 partijos bandiniai bei 6 ir 16 partijos bandiniai. Bandiniams, išdegtiems 1 070 °C temperatūroje, minėtoji prognozė sutampa pagal visas šaldymo metodikas. 1 000 °C temperatūroje išdegtiems bandiniams rezultatai sutampa tiktais atsparumui šalčiui, nustatytam pagal LST 1985:2006, 6 p. Prognozės nesutapimas pagal kitas metodikas nustatytam atsparumui šalčiui, matyt, aiškinamas tuo, kad žemesnėje temperatūroje išdegtų keraminių bandinių, bandomų tūrinio šaldymo–atšildymo būdu, suirimas buvo nebūdingas vienpusiam suirimui, ir šis būdas nėra jam tapatus. O vienpusio šaldymo–atšildymo būdu pagal LST 1272-92, 3.8.2 p. nustatyto atsparumo šalčiui nesutapimas su prognozuojamais rodikliais gali būti paaiškinamas dėl drėgmės migracijos į vidų, kur yra stambūs ir labiau pralaidūs kapiliarai. Todėl net ir vienpusio šaldymo atveju vyravo tokie suirimai, kai bandiniai skildavo, o ne irdavo sluoksniais (5.20 pav.). Pagal LST 1985:2006, 6 p. vienpusio šaldymo–atšildymo būdu bandytų bandinių paviršiniuose sluoksniuose kaupėsi drėgmė, jų suirimo pobūdis – lupimasis ir atskilinėjimas (5.21 pav.).

5.11 lentelė. Skirtingais atsparumo šalčiui nustatymo būdais nustatytos didžiausios prognozuojamos ir tiesioginės atsparumo šalčiui reikšmės

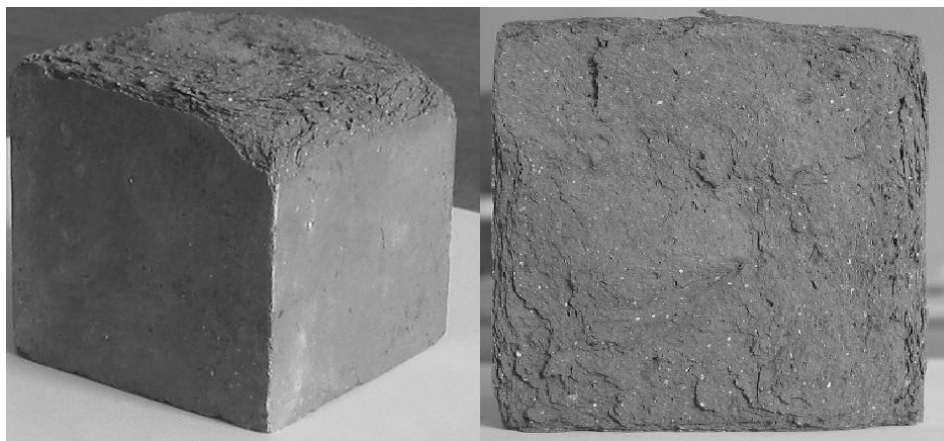
Prognozė pagal struktūros rodiklius		Prognozė pagal deformacinius rodiklius		Atsparumas šalčiui nustatytas:					
				tūriniu būdu pagal LST 1272-92, 3.8.2 p.		vienpusiu būdu pagal LST 1272-92, 3.8.3 p.		vienpusiu būdu pagal LST 1985:2006, 6 p.	
Bandinių partijos Nr.	F_{RE1}/F_{RE2} , ciklai	Bandinių partijos Nr.	M_1/M_2 , ciklai	Bandinių partijos Nr.	F_T , ciklai	Bandinių partijos Nr.	F_{V1} , ciklai	Bandinių partijos Nr.	F_{V2} , ciklai
Keraminiai bandiniai, išdegti 1 000°C temperatūroje									
4	50,8/96,6	4	147,6/280,8	6	34	6	35	4	207
11	37,4/43,5	11	79,7/153,4	8	34	8	35	11	131
14	25,2/53,6	14	89,8/172,3	–	–	–	–	14	112
Keraminiai bandiniai, išdegti 1 070°C temperatūroje									
4	721,9/735,5	1	176,5/327,6	4	>600	4	>300	2	207
6	152,2/160,2	4	526,0/1012,9	6	70	6	250	4	>300
7	1234,2/1263,3	6	316,1/605,8	7	400	7	>300	6	>300
14	204,0/338,6	7	559,0/1075,3	9	181	9	171	7	>300
16	424,3/622,0	9	309,3/595,5	16	179	16	176	9	250
-	–	11	112,9/221,7	–	–	–	–	11	200
-	–	14	160,2/310,6	–	–	–	–	14	200
-	–	16	334,9/678,4	–	–	–	–	16	>300



a)

b)

5.20 pav. Vienpusio šaldymo–atšildymo būdu pagal LST 1272-92, 3.8.3 p. bandyto bandinio pažaidos: a) bandinio šaldoma pusė; b) bandinio šonas



a)

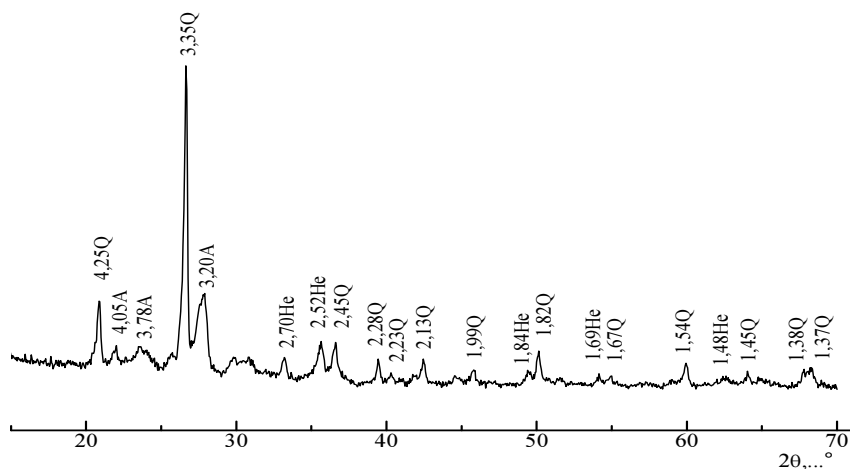
b)

5.21 pav. Vienpusio šaldymo–atšildymo būdu pagal LST 1985:2006, 6 p. bandyto bandinio pažaidos: a) bendrasis vaizdas; b) bandinio šaldoma pusė

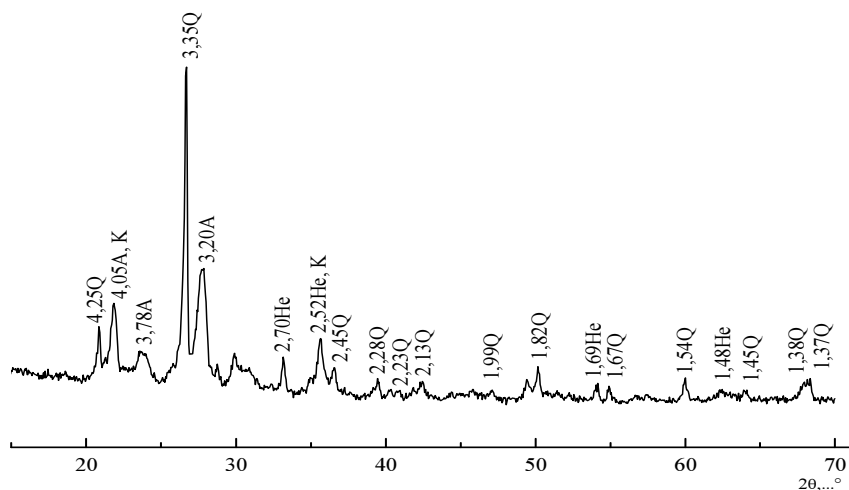
5.5. Rentgenografiniai keraminių šukių tyrimai

Atlikus rentgenografinę keraminių šukių, išdegtų 1 000 °C temperatūroje, analizę (4, 6, 9, 11, 14 partijos), nustatyti šie mineralai: kvarcas (SiO_2), hematitas (Fe_2O_3) ir anortitas $\text{CaO}[\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8]$ arba $(\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2)$. Keraminiuose bandiniuose, kurių sudėtyje buvo atliekiniai priedai, kartu su minėtaisiais mineralais nustatytas ir kristobalitas. Nagrinėtoms bandinių partijoms būdingos rentgenogramos pateikiamos 5.22 ir 5.23 pav.

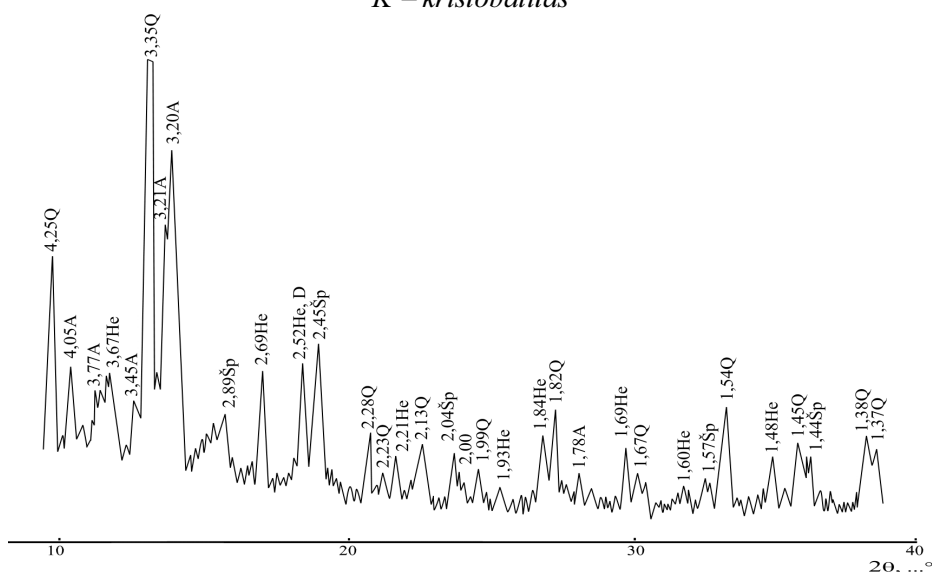
Keraminių šukių, išdegtų 1 070 °C temperatūroje, kurių sudėtyje nėra atliekinių priedų, nustatyti šie mineralai: kvarcas, hematitas, anortitas ir naujadarai diopsidas ($\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2$) ir špinelis ($\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$; $\text{FeO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$). Keraminių šukių, išdegtų 1 070 °C temperatūroje, kurių sudėtyje yra atliekinių priedų, be minėtųjų mineralų, nustatytas ir kristobalitas. Būdingosios rentgenogramos pateikiamos 5.24 ir 5.25 pav.



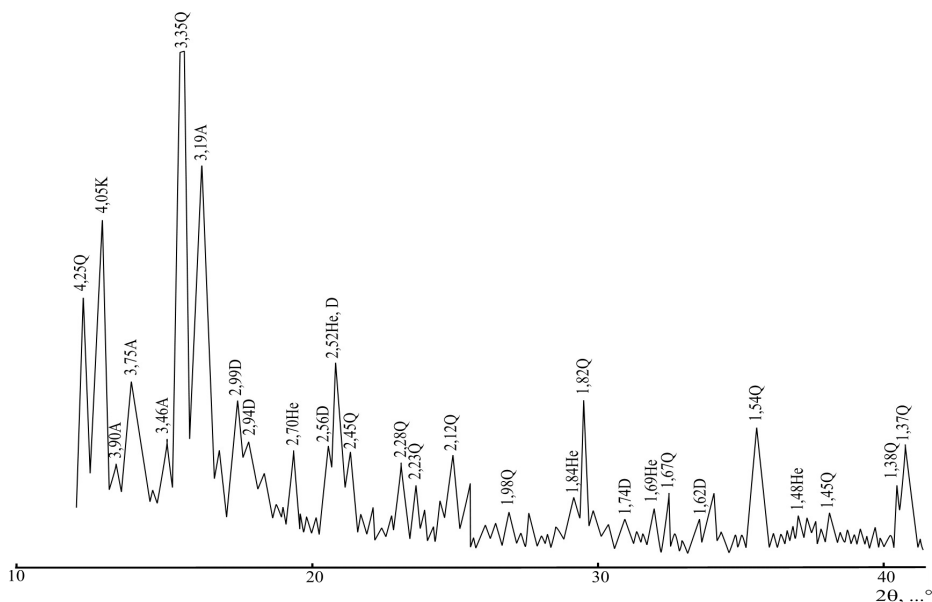
5.22 pav. Nr. 14 keraminės šukės, išdegtos 1 000 °C temperatūroje, rentgenograma (Å): Q – kvarcas; A – anortitas; He – hematitas



5.23 pav. Nr. 13 keraminės šukės, išdegtos 1 000 °C temperatūroje, rentgenograma (Å): Q – kvarcas; A – anortitas; He – hematitas; K – kristobalitas



5.24 pav. Nr. 4 keraminės šukės, išdegtos 1 070 °C temperatūroje, rentgenograma (Å): Q – kvarcas; A – anortitas; He – hematitas; D – diopsidas; Šp – špinelis



5.25 pav. Nr. 3 keraminės šukės, išdegtos 1 070 °C temperatūroje, rentgenograma (Å): Q – kvarcas; A – anortitas; He – hematitas; Šp – špinelis; D – diopsidas; K – kristobalitas

Taip pat pastebėta, kad, didėjant liesinančiųjų priedų kiekiui iki 26 %, bandiniuose su atliekiniais priedais didėja identifikuoto kvarco rentgenogramos linijų intensyvumas, kuris, matyt toliau vykstant procesui, modifikuojasi į kristobalitą. Jo atsiradimas paaiškina atliekinių priedų ir didelio (26 %) liesinančiųjų priedų kiekio neigiamą poveikį keraminių bandinių savybėms (atsparumui šalčiui, gniuždomajam stipriui, įmirkiui, neto sausajam tankiui). Literatūroje [90] nurodoma, kad tokios modifikacijos sukelia ženklus tūrinius pokyčius, dėl ko ardoma gaminių struktūra.

Kitų ryškių pokyčių, keičiant technologinius veiksmų lygius, nepastebėta, išskyrus neženklius mineralų smailių intensyvumų pokyčius.

5.6. Keraminių mūro gaminių gamybos parametrų parinkimas

Vertinant technologinių veiksmų poveikį keraminių mūro gaminių savybėms, būtina parinkti geriausius technologinius gamybos parametrus aukštų

kokybės rodiklių keraminiams mūro gaminiams gaminti. Keraminiams mūro gaminiams, kurie eksploatuojant bus apsaugoti nuo neigiamo aplinkos poveikio, gali būti keliami daug mažesni reikalavimai. Keraminiams mūro gaminiams, kurie nebus apsaugoti nuo neigiamo aplinkos poveikio, didžiausias dėmesys turi būti skiriamas ilgalaikiškumui.

Įvertinus pagal vidutinius rodiklius geriausias savybių reikšmės (5.12 lentelė), matyti, kad 1 000 °C temperatūroje išdegtų bandinių kokybės rodikliai yra mažesni nei bandinių, išdegtų 1 070 °C temperatūroje. Žemesnėje temperatūroje išdegtų bandinių atsparumo šalčiui reikšmės, nustatytos tūrinio šaldymo–atšildymo būdu ir įvertintos pagal šiuo metu galiojantį LST 1985:2006, leidžia šiuos bandinius priskirti tik žemiausioms F.0 ir F.1 atsparumo šalčiui klasėms. Įvertinus atsparumą šalčiui vienpusio šaldymo–atšildymo būdu, situacija iš esmės keičiasi, patvirtinama, kad, taikant klasikinę tūrinio šaldymo–atšildymo metodiką, išbrokuojama faktiškai gera produkcija [92, 93]. 4, 11 ir 14 bandinių partijos aukštas atsparumas šalčiui, nustatytas vienpusio šaldymo–atšildymo būdu, leidžia juos priskirti aukščiausiai F.2 atsparumo šalčiui klasei. 4 partijos bandinių, išdegtų 1 000 °C temperatūroje, nustatytas mažiausias vandens įmirkis – 6,4 %, didžiausias neto sausasis tankis – 2010 kg/m³. Minėtosios partijos bandiniai buvo gaminami rankinio formavimo būdu iš Tauragės telkinio molio, pridėjus 20 % liesesnio Ukmergės telkinio molio ir 8 % liesinančiųjų priedų. Bandiniai buvo išdegti išlaikant aukščiausioje degimo temperatūroje 5 h ir aušinami greituoju (0,83–1,17°C/min) aušinimo režimu. Tačiau žemos atsparumo šalčiui reikšmės, nustatytos vienpusiu būdu pagal LST 1272-92, 3.8.3 p., kelia abejonių dėl šių gaminių tinkamumo naudoti stipriai ardančioje aplinkoje Lietuvos klimato sąlygomis.

Degant aukštesnėje 1 070 °C degimo temperatūroje, gautos atsparesnės šalčiui keraminės šukės, kitos jų kokybės rodiklių reikšmės taip pat daug didesnės. Patys aukščiausi rodikliai yra 4, 7, 9 ir 16 partijos bandinių. Šių bandinių partijų gamybos parametrai pateikiami 5.13 lentelėje. 7 partijos bandinių, suformuotų iš Tauragės telkinio molio su mažu liesinančiųjų priedų kiekiu, esant labai geram sumaišymo efektyvumo laipsniui, ne mažesniau kaip 0,090 MPa išretinimo gyliui preso vakuumo kameroje, formuojant su tinkama formavimo galvute ir išlaikant aukščiausioje degimo temperatūroje 5 h, rezultatai yra geriausi.

5.12 lentelė. Keraminių mūro gaminių kokybės rodikliai

Bandinių partijos Nr.	F_T , ciklai	F_{V2} , ciklai	R_{gn} , MPa	W , %	ρ , kg/m ³	S_b , %
Keraminiams bandiniams, išdegtiems 1 000 °C temperatūroje						
4	20	207	20,8	6,4	2 010	8,9
6	34	58	16,9	12,3	1 850	7,0
7	25	45	24,4	10,3	1 960	8,0
8	34	69	23,8	7,4	1 890	9,3
11	10	131	17,1	8,2	1 950	7,1
14	7	112	17,2	8,0	1 980	8,3
Keraminiams bandiniams, išdegtiems 1 070 °C temperatūroje						
2	33	207	29,2	9,1	1 950	5,5
4	> 600	> 300	45,7	0,9	2 300	12,1
6	70	> 300	36,1	3,1	2 130	10,7
7	400	> 300	52,8	0,6	2 290	12,4
9	181	250	34,0	3,3	2 110	9,4
11	27	200	29,1	6,8	2 010	8,0
14	58	200	36,6	5,1	2 000	8,3
16	179	> 300	33,0	3,0	2 120	9,3

čia F_T – atsparumas šalčiui nustatytas tūriniu būdu pagal LST 1272-92, 3.8.2 p.;
 F_{V2} – atsparumas šalčiui nustatytas vienu pusiu būdu pagal LST 1985:2006, 6 p.;
 R_{gn} – gniuždomasis stipris, MPa; W – imirkis, %; ρ – neto sausasis tankis, kg/m³;
 S_b – bendras susitraukimas, %.

5.13 lentelė. Keraminių mūro gaminių gamybos technologiniai parametrai

Bandinių partijos Nr.	Molis	Liesinantieji priedai, %	Išdegantysis priedas, %	Sumaišymo trukmė, min	Išretinimo gylio juostinio preso vakuumo kameroje, MPa	Suspaudimo laipsnis formavimo galvutėje, kg/cm ²	Išlaikymo aukščiausioje (1 070 °C) degimo temperatūroje trukmė, h
4	Tauragės + 20 % Ukmergės	8	0	15	0,065	12	5
7	Tauragės	8	0	15	0,09	12	5
9	Tauragės + 20 % Ukmergės	26	0	5	0,065	18	5
16	Tauragės	26	1,2	15	0,09	18	5

5.7. Penktojo skyriaus išvados

1. Nustatyta, kad 1 000 °C degimo temperatūra, net ir parinkus geriausius technologinių veiksnių lygius, nėra pakankama, siekiant gauti aukšto atsparumo šalčiui gaminius pagal LST 1272-92. Vertinant vienpusio šaldymo–atšildymo būdu pagal LST 1985:2006, 6 p. nustatyto didžiausio atsparumo šalčiui (207 ciklai) keraminiai bandiniai gauti, naudojant Tauragės molį su 20 % Ukmergės molio priedu, 8 % liesinančiuoju priedu, išlaikant aukščiausioje degimo temperatūroje 5 h ir taikant greitąjį aušinimo režimą (0,83–1,17) °C/min. Daugiausia atsparumo šalčiui padidėjimą lėmė atliekinių priedų kiekio mažinimas (54,7 %), Ukmergės molio priedas (13,3 %) ir jų sąveikos (22,3 %) bei išlaikymo aukščiausioje degimo temperatūroje trukmės ilginimas (5,2 %).
2. Nustatyta, kad degant 1 070 °C temperatūroje galima gauti aukšto atsparumo šalčiui gaminius:
 - vertinant tūrinio šaldymo–atšildymo būdu pagal LST 1272-92, 3.8.2 p. didžiausio atsparumo šalčiui (daugiau 600 ciklų) ir vienpusio šaldymo–atšildymo būdu pagal LST 1272-92, 3.8.3 p. didžiausio atsparumo šalčiui (daugiau 300 ciklų) keraminiai bandiniai gauti naudojant Tauragės molį su 20 % Ukmergės molio priedu, 8 % liesinančiuoju priedu, homogenizuojant formavimo masę 15 min, esant (0,065–0,090) išretinimo gyliui preso vakuumo kameroje ir (12–18) g/cm² suspaudimo laipsniui formavimo galvutėje, išlaikant 5 h aukščiausioje degimo temperatūroje. Daugiausia atsparumo šalčiui, nustatyto tūriniu būdu, padidėjimą lėmė atliekinių priedų kiekio (24,1 %) ir išdegančiojo priedo kiekio mažinimas (16,3 %), liesinančiųjų priedų kiekio mažinimo su išlaikymo aukščiausioje degimo temperatūroje trukmės ilginimu veiksnių sąveika (17,9 %) bei formavimo mišinio homogenizavimo laipsnio didinimo sąveikos su kitais veiksniais (28,0 %). Atsparumo šalčiui, nustatyto vienpusiu būdu, padidėjimą lėmė atliekinių priedų kiekio (21,7 %) ir išdegančiojo priedo kiekio mažinimas (67,1 %) bei jų sąveika (30,7 %), formavimo mišinio homogenizavimo laipsnio didinimo ir išlaikymo aukščiausioje degimo temperatūroje trukmės ilginimo (15,2 %) bei liesinančiųjų priedų kiekio mažinimo sąveikos (8,6 %);
 - vertinant vienpusio šaldymo–atšildymo būdu, nustatyto pagal LST 1985:2006, 6 p., didžiausio atsparumo šalčiui (daugiau 300 ciklų) keraminiai bandiniai gauti naudojant Tauragės molį, 8 % liesinančiųjų priedų, homogenizuojant formavimo masę 15 min, esant 0,090 MPa

išretinimo gyliui preso vakuumo kameroje ir 12 kg/cm^2 suspaudimo laipsniui formavimo galvutėje, išlaikant 5 h aukščiausioje degimo temperatūroje. Daugiausiai atsparumo šalčiui padidėjimą lėmė liesinančiųjų priedų kiekio didinimas (23,5 %) ir sąveika su molio plastiškumo didinimu (15,5 %), atliekinių priedų kiekio (13,4 %) ir išdegančiojo priedo kiekio mažinimas (8,5 %), išretinimo gylio preso vakuumo kameroje didinimas (16,8 %) ir išlaikymo aukščiausioje degimo temperatūroje trukmės ilginimas (7,7 %).

3. Gautų duomenų analizė parodė, kad taikant sparčiuosius atsparumo šalčiui prognozavimo metodus, pagal struktūros ir deformacinius rodiklius, galima patikimai prognozuoti keraminių mūro gaminių atsparumą šalčiui, nustatytą vienpusio šaldymo–atšildymo būdu pagal LST 1985:2006.
4. Nustatyta, kad atspari šalčiui keraminė šukė ($F_T = 400$ ciklų, $F_{V1} > 300$ ciklų, $F_{V2} > 300$ ciklų), kai $W_E \leq 26 \%$, pasižymi mažu bendruoju porėtumu – 5,7 % ir tolygiu porų tūrio pasiskirstymu. Didėjant bendrajam porėtumui, bet išliekant tolygiam porų pasiskirstymui, atsparumas šalčiui mažėja, tačiau atitinka aukščiausią atsparumo šalčiui klasę ($F_T = 179$; $F_{V1} = 176$; $F_{V2} > 300$ ciklų). Mažėjant porų tūrio pasiskirstymo tolygumui ir poroms koncentruojantis $\geq 0,1 \mu\text{m} - < 1 \mu\text{m}$ skersmens ribose daugiau kaip 50 %, keraminės šukės atsparumas šalčiui sparčiai mažėja.
5. Nustatyta, kad atsparią šalčiui keraminės šukės struktūrą labiausiai lemia degimo temperatūros dydis ir išlaikymo joje laikas, atliekinių ir liesinančiųjų priedų kiekiai. Keliant degimo temperatūrą nuo $1\,000^\circ\text{C}$ iki $1\,070^\circ\text{C}$, ilginant išlaikymo joje laiką nuo 1 h iki 5 h, mažinant liesinančiųjų priedų kiekį nuo 26 % iki 8 % bei nenaudojant atliekinių priedų, galima gauti keraminę šukę, kurios atsparumas šalčiui, nustatytas pagal LST 1272-92, 3.8.2 p., tūrinio šaldymo–atšildymo būdu – 400 ciklų, 3.8.3 p. vienpusio šaldymo–atšildymo būdu – > 300 ciklų, vienpusio šaldymo–atšildymo būdu pagal LST 1985:2006, 6 p. – > 300 ciklų.
6. Nustatyta, kad didžiausią poveikį keraminių šukių, pagamintų iš Tauragės ir Ukmergės telkinių molių, fazinei sudėčiai turi aukščiausia degimo temperatūra, liesinančiųjų ir atliekinių priedų kiekiai:
 - keliant degimo temperatūrą iki $1\,070^\circ\text{C}$ susidaro naujadarai diopsidas ir špinelis;
 - atliekinių priedų panaudojimas ir liesinančiųjų priedų kiekio didinimas nuo 8 % iki 26 % sudaro sąlygas susidaryti kristobalitui, kas neigiamai veikia atsparumą šalčiui ir kitas fizikines bei mechanines savybes.

Atsparumo šalčiui rezultatų statistinis įvertinimas

6.1. Atsparumo šalčiui reikšmių palyginamieji tyrimai

Vertinant keraminių mūro gaminių atsparumą šalčiui, naudoti pagrindiniai tiesioginiai atsparumo šalčiui nustatymo būdai: tūrinis (pagal LST 1272-92, 3.8.2 p.) ir vienpusis (pagal LST 1272-92, 3.8.3 p. ir LST 1985:2006, 6 p.).

Vertinant atsparumo šalčiui nustatymo būdus ir metodikas, svarbus keraminės šukės irimo pobūdis. Bandant tūrinio šaldymo–atšildymo būdu, visi be išimties bandiniai skilo į gabalus. Bandant vienpusio šaldymo–atšildymo būdu pagal LST 1272-92, 3.8.2 p., bandiniuose pastebėtos paviršiaus lupimosi, atskilinėjimo ir nebūdingo skilimo į gabalus suirtys. Bandant vienpusio šaldymo–atšildymo būdu pagal LST 1985:2006, 6 p., bandiniuose pastebėtos tikrai paviršiaus lupimosi ir atskilinėjimo suirtys, jokių skilimo ar net įtrūkų suirčių nepastebėta. Manome, kad tokį skirtingą suirimo pobūdį, bandant vienpusiu šaldymo–atšildymo būdu pagal skirtingas metodikas, lėmė skirtingi vandens migracijos procesai, o būtent – šaldymo metu vandens nustūmimo gylis nuo šaldomos pusės.

Visiškai neabejojama, kad tikrąsias eksploatacines sąlygas įvertina vienpusis šaldymo–atšildymo būdas, o tūrinis atsparumo šalčiui nustatymo būdas netapatus vienpusiam. R. Mačiulaitis plačiai nagrinėjo skirtingus vienpusio šaldymo–atšildymo režimus ir nustatė, kad vienpusio šaldymo–atšildymo principo taikymas, nepaisant skirtingų režimų, užtikrina rezultatų palyginamumą bei pakankamai stiprų jų koreliacinį ryšį ($R = 0,839–0,958$). Minėtojo autoriaus darbuose matematinį ryšį tarp atsparumo šalčiui reikšmių, nustatytų pagal vienpusio šaldymo–atšildymo būdo skirtingas metodikas, geriausiai apibūdina $y = e^{ax^b}$ funkcijos modelis. Remdamasis tais tyrimais, autorius sukūrė vieną iš vienpusio šaldymo režimų, kuris buvo įteisintas LST 1272-92 standarte. Pradinė keraminių gaminių įsotinimo vandenių trukmė šiame režime – 72 h, cikliška šaldoma 8 h (–15...–20) °C temperatūroje ir 8 h atšildoma (10–20) °C temperatūros vandenių. Šio režimo parinkimą lėmė rezultatų, gautų natūralių tyrimų poligone ir laboratorijoje, tapatumas [92, 93]. Tačiau žinomas ir naujas darbas [99], kuriame aprašyti gauti prieštaringi rezultatai, vertinant keraminių čerpių atsparumą šalčiui vienpusiu šaldymo–atšildymo būdu pagal skirtingas metodikas. Tai leidžia teigti, kad nustatant atsparumą šalčiui pagal skirtingas vienpusio šaldymo–atšildymo metodikas, nustatytos atsparumo šalčiui reikšmės tapatiems keraminiams bandiniams gali būti skirtingos. Kas parodo nevienodą šaldymo–atšildymo procesų poveikį keraminiams bandiniams.

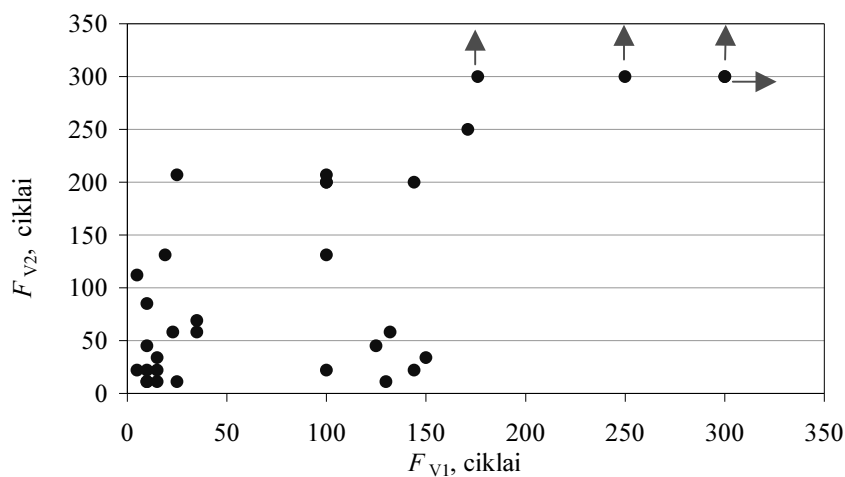
Bandant vienpusio šaldymo būdu pagal mūsų naudotas metodikas, vyksta nevienodi vandens migracijos procesai. Šaldant ir atšildant pagal LST 1272-92, 3.8.3 p., tris paras mirkyti bandiniai pirmiausiai 8 h šaldomi, o paskui 8 h atšildomi lietinant vandenių. Bandant pagal LST 1985:2006, 6 p., bandiniai per 7 paras įsotinami vandenių, pirmasis šaldymo periodas trunka 6 h, o kiekvienas tolesnis – 120 min, atšildymas šiltu oru 20 min ir vėliau 120 s lietinant vandenių. Matyti, kaip smarkiai skiriasi pradinis keraminių bandinių įsotinimo vandenių laipsnis, šaldymo–atšildymo režimai, kurių metu vykstantys procesai taip pat skirsis. Todėl labai tikėtina, kad skirtingomis vienpusio šaldymo–atšildymo metodikomis nustatyto atsparumo šalčiui reikšmės nebus vienodos [92, 93].

Atsparumo šalčiui reikšmėms palyginti naudoti statistinės analizės metodai – regresinė analizė. Matematiniam ryšiui nusakyti buvo pasirinkta ta funkcija, kuriai esant determinacijos koeficiento reikšmė artimesnė vienetui, modelio tinkamumas vertinamas pagal determinacijos koeficientą, standartinė įvertinimo klaida s_e parodo nuokrypį nuo regresijos kreivės, rodiklių reikšmingumas įvertintas pagal Stjudento kriterijų [125].

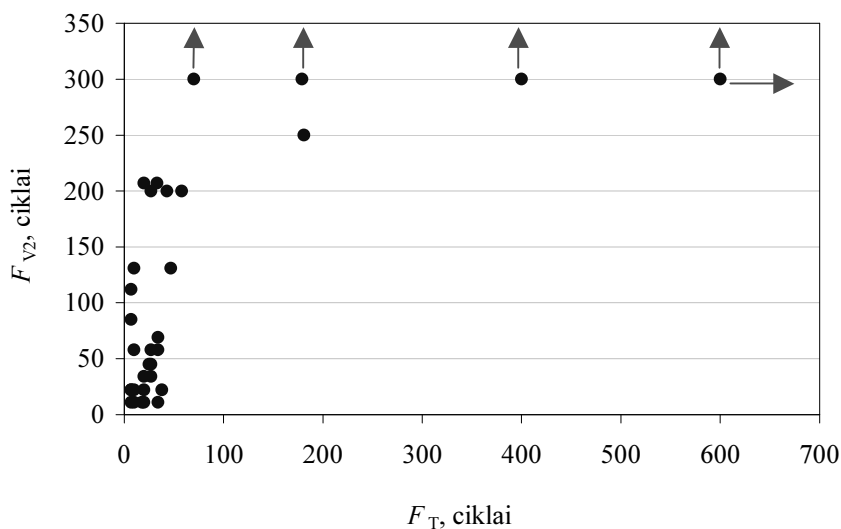
Visų tyrinėtų keraminių bandinių partijų eksperimentiškai nustatytos vidutinės atsparumo šalčiui reikšmės pateikiamos 6.1 lentelėje ir 6.1 paveiksle.

6.1 lentelė. Keraminių bandinių vidutinės atsparumo šalčiui reikšmės

Bandinių partijos Nr.	Atsparumas šalčiui nustatytas:		
	tūrinio šaldymo–atšildymo būdu pagal LST 1272-92, 3.8.2 p., ciklai	vienpusio šaldymo–atšildymo būdu pagal LST 1272-92, 3.8.3 p., ciklai	vienpusio šaldymo–atšildymo būdu pagal LST 1985:2006, 6 p., ciklai
Keraminiai bandiniai, išdegti 1 000 °C temperatūroje			
1	10	5	22
2	20	15	34
3	18	15	11
4	20	25	207
5	20	25	11
6	34	35	58
7	25	10	45
8	34	35	69
9	7	10	91
10	7	15	22
11	10	19	131
12	7	10	22
13	7	10	11
14	7	5	112
15	10	10	11
16	10	23	58
Keraminiai bandiniai, išdegti 1 070 °C temperatūroje			
1	38	144	22
2	33	100	207
3	47	100	131
4	> 600	> 300	> 300
5	27	125	45
6	70	250	> 300
7	400	> 300	> 300
8	43	100	200
9	181	171	250
10	34	130	11
11	27	144	200
12	27	132	58
13	27	150	34
14	58	100	200
15	20	100	22
16	179	176	> 300



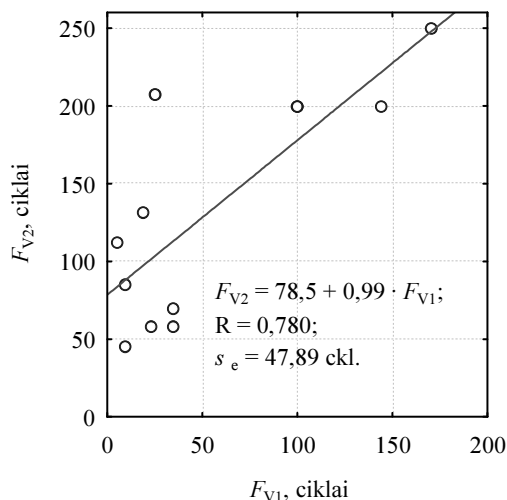
a)



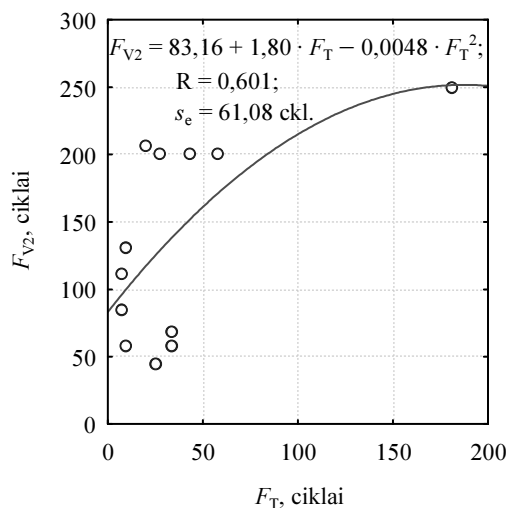
b)

6.1 pav. Atsparumo šalčiui reikšmių, nustatytų vienusio šaldymo–atšildymo būdu pagal LST 1985:2006, 6 p. (F_{V2}) palyginimas su: a) atsparumo šalčiui reikšmėmis, nustatytomis vienusio šaldymo–atšildymo būdu pagal LST 1272-92, 3.8.3 p. (F_{V1}); b) atsparumo šalčiui reikšmėmis, nustatytomis tūrinio šaldymo–atšildymo būdu pagal LST 1272-92, 3.8.3 p. (F_T)

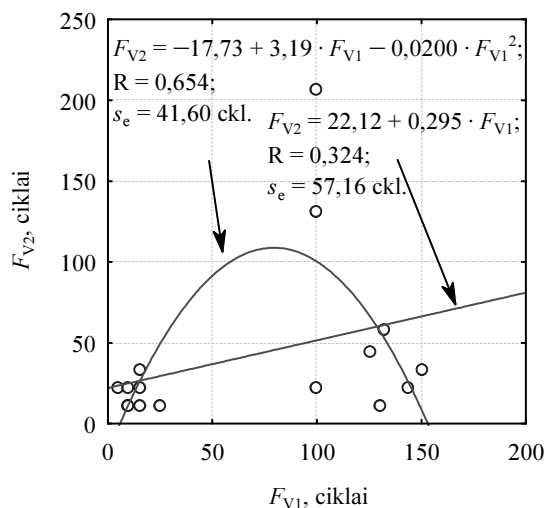
6.1 pav. a ir b matyti, kad atsparumo šalčiui reikšmių sklaida yra gana sudėtinga, kas apsunkina geriausio funkcinio sąryšio radimą. Kai kurių bandinių partijų atsparumas šalčiui dėl aukštų reikšmių nėra iki galo įvertintas (bandinių partijos Nr. 20, 22, 23, 32). Daugeliu atveju (20 partijų iš 28) atsparumo šalčiui reikšmės, nustatytos vienpusiu būdu pagal LST 1985:2006, 6 p. metodiką, yra didesnės už reikšmes, nustatytas vienpusiu būdu pagal LST 1272-92, 3.8.3 p. metodiką, ir 8 atvejais (bandinių partijos Nr. 3, 5, 17, 21, 26, 28, 29, 31) gaunami priešingi rezultatai. Iš turimų duomenų (6.1 lentelė) parinkus įvairius funkcinis sąryšius, patenkinamų rezultatų negauta. Išsiskiriančių iš bendrosios sklaidos (6.1 pav., a) keraminių bandinių partijų Nr. 17, 21, 26, 28, 29, 31 bendras požymis – pagaminti su atliekiniais priedais. Todėl duomenys buvo grupuojami ir geriausi sąryšiai gauti atskirai vertinant tradicinės sudėties keraminius bandinius, pagamintus iš molio, liesinančiųjų ir išdegančiųjų priedų, ir keraminius bandinius, pagamintus su atliekiniu priedu. Rezultatų apdorojimo metu sudarytos regresijos lygtys ir jų grafinės interpretacijos pateiktos 6.2–6.5 pav.



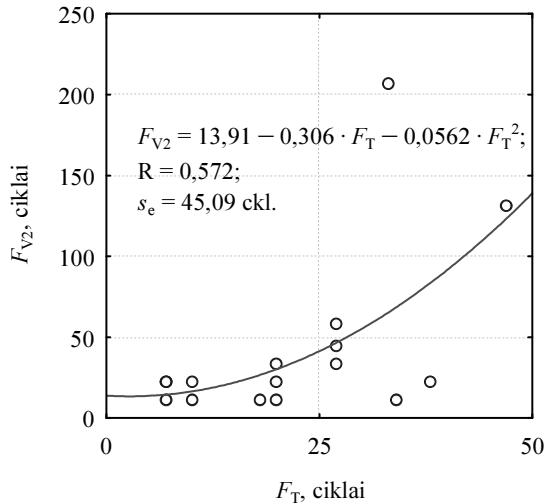
6.2 pav. Keraminių bandinių, pagamintų be atliekinių priedų, atsparumo šalčiui reikšmių, nustatytų vienpusio šaldymo–atšildymo būdu pagal LST 1985:2006, 6 p. (F_{V2}), ir atsparumo šalčiui reikšmių, nustatytų vienpusio šaldymo–atšildymo būdu pagal LST 1272-92 3.8.3 p. (F_{V1}), ryšys



6.3 pav. Keraminių bandinių, pagamintų be atliekinių priedų, atsparumo šalčiui reikšmių, nustatytų vienvpusio šaldymo–atšildymo būdu pagal LST 1985:2006, 6 p. (F_{V2}), ir atsparumo šalčiui reikšmių, nustatytų tūrinio šaldymo–atšildymo būdu pagal LST 1272-92, 3.8.2 p. (F_T), ryšys



6.4 pav. Keraminių bandinių, pagamintų su atliekiniais priedais, atsparumo šalčiui reikšmių, nustatytų vienvpusio šaldymo–atšildymo būdu pagal LST 1985:2006, 6 p. (F_{V2}), ir atsparumo šalčiui reikšmių, nustatytų vienvpusio šaldymo–atšildymo būdu pagal LST 1272-92 3.8.3 p. (F_{V1}), ryšys



6.5 pav. Keraminių bandinių, pagamintų su atliekiniais priedais, atsparumo šalčiui reikšmių, nustatytų vienusio šaldymo–atšildymo būdu pagal LST 1985:2006, 6 p. (F_{V2}), ir atsparumo šalčiui reikšmių, nustatytų turinio šaldymo–atšildymo būdu pagal LST 1272-92, 3.8.2 p. (F_T), ryšys

Apibendrinant duomenis (6.2 pav.), galima teigti, kad „tradicinės keramikos“ atveju vienusio šaldymo–atšildymo būdas pagal LST 1985:2006, 6 p. metodiką yra mažiau agresyvus nei vienusio šaldymo–atšildymo būdas pagal LST 1272-92, 3.8.3 p. metodiką. Tai galima pagrįsti, nepaisant ilgo (7 paros) pradinio bandinių išotrinimo vandenių periodo, tolesniu labai trumpu (120 s) lietinimo vandenių periodu ciklinio atšildymo metu. Matyti, todėl labai sumažėja vandens migracijos procesai, lemiantys keraminių bandinių suirtys šaldymo–atšildymo metu.

Apibendrinant duomenis, galima teigti, kad pagal LST 1985:2006, 6 p. metodiką vienusio šaldymo–atšildymo būdu bandoma keraminė produkcija netinkama naudoti stipriai ardančioje aplinkoje, be abejo, suirs greitai, o vidutinio ir labai aukšto eksploatacinio atsparumo šalčiui keraminiai mūro gaminiai bus įvertinti neadekvačiai Lietuvos klimato sąlygomis.

Taip pat patvirtinamas teiginys, kad vienusio šaldymo–atšildymo principo taikymas užtikrina rezultatų palyginamumą bei pakankamai stiprų jų koreliacinį ryšį, nepaisant skirtingų bandymų metodikų. Gautas koreliacijos koeficientas 0,780, o determinacijos koeficientas parodo, kad 60,8 % reikšmių paaiškinama tarpusavio sąryšiu.

Keraminių bandinių su atliekiniais priedais atsparumo šalčiui reikšmių susieti funkcinėmis sąryšiais nepavyko (6.4 pav.). Tiesinės funkcijos atveju $R = 0,324$, o geriausia pritaikyta funkcija $R = 0,654$ turi parabolės formą. Kas mažai tikėtina, kadangi [92, 93] tyrimais nustatyta, jog atsparumo šalčiui reikšmių, nustatytų vienpusio šaldymo principu, taikant skirtingus režimus, ryšys geriausiai įvertinamas tiesine funkcija. Tai galima paaiškinti specifine vandens ir ledo migracija šaldymo ir atšildymo metu dėl panaudoto katalizatoriaus priedo, kuris, kaip nustatė autorė [128], sureaguoja tik degant keramiką aukštosiose temperatūrose. Šio reiškinio ištyrimas paliekamas ateičiai.

Vertinant vienpusio šaldymo–atšildymo būdo pagal LST 1985:2006, 6 p. metodiką ryšį su tūriniu šaldymo–atšildymo būdu, matyti gerokai blogesni rodikliai (6.3 ir 6.5 pav.). Determinacijos koeficientų reikšmės parodo, kad tik 36,1 % reikšmių yra paaiškinama tarpusavio sąryšiu, palyginti su „tradicinės keramikos“ atveju, ir 32,7 % reikšmių - keramikos su atliekinio katalizatoriaus priedu. Tačiau šie rezultatai tik patvirtina jau žinomą teiginį [92, 93], kad tūrinis atsparumo šalčiui nustatymo būdas netapatus vienpusiam atsparumo šalčiui nustatymo būdui.

Pagal RSN 121-91 „Papildomi reikalavimai pajūrio krašte statomų pastatų sienoms ir stogams“, keraminių apdailos plytų mūro atsparumas šalčiui, esant vienpusiam šaldymui–atšildymui, turi būti ne mažesnis kaip 50 ciklų (pagal GOST 7025-78, kuris tapatus LST 1272-92). Pagal LST 1272-92 standartą, aukščiausios kategorijos keraminės apdailos plytos turi išlaikyti, vienpusio šaldymo–atšildymo būdų pagal 3.8.3 p. metodiką, ne mažiau 75 ciklus. Autorius [92] nustatė, kad keraminiai apdailos gaminiai tinkami naudoti pačiomis agresyviausiomis Lietuvos klimato sąlygomis, turi atlaikyti, vienpusio šaldymo–atšildymo būdų pagal LST 1272-92, 3.8.3 p. metodiką, 300–500 ciklų. LST 1985:2006, numato aukščiausią atsparumo šalčiui klasę suteikti bandiniams, atlaikiusiems daugiau 100 šaldymo–atšildymo ciklų vienpusio šaldymo–atšildymo būdu.

Todėl apibendrinant duomenis, galima teigti, kad keraminiai mūro gaminiai, tinkami naudoti stipriai ardančioje aplinkoje, Lietuvos klimato sąlygomis, turi išlaikyti nemažiau 300 ciklų, nustatytų vienpusio šaldymo–atšildymo būdu pagal LST 1985:2006, 6 p. metodiką.

6.2. Šeštojo skyriaus išvados

1. Atlikti vienpusio atsparumo šalčiui palyginamieji tyrimai parodė, kad keraminiai bandiniai, pagaminti be atliekinių priedų, taikant įvairius

technologinių veiksnių lygius, bandyti vienpusio šaldymo–atšildymo būdu pagal LST 1985:2006, 6 p. metodiką, atlaiko daugiau šaldymo–atšildymo ciklų nei bandyti vienpusio šaldymo–atšildymo būdu pagal LST 1272-92, 3.8.3 p. metodiką. Gauti sąryšio lygties koreliacijos ($R = 0,780$) ir determinacijos ($R^2 = 0,608$) koeficientai parodė, kad, taikant vienpusio būdo skirtingas metodikas, galima atlikti gautų rezultatų palyginimą. Tačiau didelė prognozavimo paklaida ($s_e = \pm 47,89$ ciklai) leidžia sudarytą regresijos lygtį naudoti tik preliminariam vertinimui.

2. Lyginamoji tyrimo duomenų analizė parodė, kad tūrinis atsparumo šalčiui nustatymo būdas netapatus vienpusiam atsparumo šalčiui nustatymo būdui ir neužtikrina objektyvaus eksploatacinio atsparumo šalčiui įvertinimo. Tai patvirtino kitų autorių gautus tyrimų rezultatus.

Bendrosios išvados

1. Nustatyta, kad keraminių bandinių, pagamintų laboratorinėmis ir artimomis gamybinėms sąlygomis iš Tauragės ir Ukmergės telkinių molių geriausiomis savybėms (atsparumas šalčiui nustatytas vienpusio šaldymo–atšildymo būdu pagal LST 1985:2006, 6 p. ir LST 1272-92, 3.8.3 p. daugiau kaip 300 ciklų, gniuždomasis stipris 46–53 MPa, neto sausasis tankis – 2 300 kg/m³, įmirkis – 0,6–0,9 %, bendrasis susitraukimas – 12 %) gauti gamybos technologiniai parametrai turi būti šie:
 - formavimo mišinio sudėtis:
 - 92 % Tauragės telkinio molis, 8 % liesinantieji priedai (5 % smėlio ir 3 % skaldelės);
 - 73,6 % Tauragės telkinio molis, 18,4 % Ukmergės telkinio molis, 8 % liesinantieji priedai (5 % smėlio ir 3 % skaldelės);
 - formavimo mišinio sumaišymo trukmė ne trumpesnė kaip 15 min;
 - išretinimo gylis preso vakuumo kameroje nuo – 0,065 MPa iki 0,090 MPa;
 - suspaudimo laipsnis formavimo galvutėje nuo – 12 kg/cm² iki 18 kg/cm²;
 - pusgaminiai turi būti išdegti 1070 °C temperatūroje, išlaikant joje 5 h.

Tokia keraminė šukė tinka HD keraminių mūro gaminių gamybai pagal LST EN 771-1+A1.

2. Nustatyta, kad keliant degimo temperatūrą nuo 1 000 °C iki 1 070 °C, ilginant išlaikymo joje laiką nuo 1 h iki 5 h, mažinant liesinančiųjų priedų kiekį nuo 26 % iki 8 %, keraminių bandinių bendrasis porėtumas mažėja nuo 30,8 % iki 4,8 %, poringosios erdvės rezervas didėja nuo 5,6 % iki 70,8 % ir susidariusios poros pagal frakcinę sudėtį pasiskirsto tolygiau, o tai lemia didesnę atsparumą šalčiui. Geriausių keraminių šukių, atitinkančių didžiausią eksploatacinę atsparumą šalčiui struktūrinės charakteristikos turi būti:
 - poringosios erdvės rezervas – 54–71 %;
 - efektyvusis poringumas – 2–3 %;
 - bendrasis bandinio poringumas – 5–9 %;
 - pradinis vandens įgerties greitis – 0,2 (kg/m²·min).
3. Nustatyta, kad keraminių mūro gaminių, pagamintų iš Tauragės ir Ukmergės telkinių molių, atsparumą šalčiui, nustatytą vienpusio šaldymo–atšildymo būdu, bei fizikines ir mechanines savybes galima prognozuoti pagal technologinių veiksnių lygius, naudojant sudarytas daugiakriterines regresijos lygtys.
4. Atlikti atsparumo šalčiui reikšmių, nustatytų vienpusiu šaldymo–atšildymo būdu pagal LST 1985:2006, 6 p. metodiką (F_{V2}) ir LST 1272-92, 3.8.3 p. metodiką (F_{V1}), palyginamieji tyrimai parodė, kad tapatūs keraminiai bandiniai, bandyti pagal LST 1985:2006, 6 p. metodiką atlaiko daugiau šaldymo–atšildymo ciklų nei bandiniai, bandyti pagal LST 1272-92, 3.8.3 p. metodiką. Jų tarpusavio sąryšis išreiškiamas $F_{V2} = 78,5 + 0,99 \cdot F_{V1}$ lygtimi ($R = 0,780$, $s_e = 47,89$ ciklai). Lietuvos klimato sąlygomis keraminiai mūro gaminiai, skirti naudoti stipriai ardančioje aplinkoje, turi atlaikyti ne mažiau kaip 300 ciklų, nustatytų vienpusio šaldymo–atšildymo būdu pagal LST 1985:2006, 6 p. metodiką.

Literatūros sąrašas

1. LST 1458:1996. 1996. *Statybinė keramika. Terminai ir apibrėžimai*. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas. 52 p.
2. Daukšas, K. ir kt. 2003. *Chemijos terminų aiškinamasis žodynas*. Vilnius: Mokslo ir enciklopedijų leidybos institutas. 660 p.
3. LST EN 771-1+A1:2005. 2005. *Mūro gaminių techniniai reikalavimai. 1 dalis. Keraminiai mūro gaminiai*. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas. 44 p.
4. LST EN 772-13:2000. 2000. *Mūro gaminių bandymo metodai. 13 dalis. Mūro gaminių (išskyrus gamtinio akmens) neto ir tariamojo (bruto) sausojo tankio nustatymas*. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas. 8 p.
5. LST EN 539-2:2006. 2006. *Užleistinio klojimo keraminės čerpės. Fizikinių charakteristikų nustatymas. 2 dalis. Atsparumo šalčiui bandymas*. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas. 40 p.
6. Kaminskas, A. 1998. *Statybinės medžiagos. Statybinių medžiagų ir statybos industrijos pramonės įmonių restruktūrizacijos programa*. Vilnius: Technika. 140 p.

7. Ратькова, В. П.; Яценко, Н. Д.; Иванюта, Г. Н.; Нечаев, П. Б. 2004. Оптимизация свойств глин для выбора способа формования кирпича, *Стекло и керамика* 11: 23–24.
8. Иванюта, Г. Н. 2002. Производство керамического кирпича – современная ситуация и перспективы, *Строительные материалы* 4: 14–15.
9. LST 1272-92. 1992. *Keraminės plytos. Techninės sąlygos*. Vilnius: Lietuvos valstybinė standartizacijos tarnyba. 29 p.
10. LST 1270-92. 1992. *Keraminės blokai. Techninės sąlygos*. Vilnius: Lietuvos valstybinė standartizacijos tarnyba. 32 p.
11. Rossbach, M. 2003. DIN EN 771-1 – Impact of the new European standart on the brick industry, *Ziegelindustrie International* 12: 26–31.
12. Кройчук, Л. А. 2004. Возможное влияние введения в действие нового европейского стандарта DIN EN 771-1 на кирпичную промышленность Германии, *Строительные материалы* 2: 56–58.
13. Kaminskas, A. 2002. *Energiją tausojančios statybinių medžiagų technologijos*. Vilnius: Knygų naujienos. 257 p.
14. Jungk, E. K.; Krcmar, W.; Linner, B. 1996. Minderung der Wärmeleitfähigkeit von Mauerziegeln durch Optimierung der Scherbenstruktur, *Ziegelindustrie International* 6: 368–376.
15. Sveda, M.; Bägel, L.; Komora L. 1996. VUPPOR - Eine Möglichkeit zur Porosierung des Scherbens, *Ziegelindustrie International* 4: 240–245.
16. Junge, K.; Rimpel, E. 1996. Technische Herstellung von hochporösen Ziegelmateriolien, *Ziegelindustrie International* 3: 195–197.
17. Мичайлов, В. И.; Красовский, Е. В. 2001. Свойства пористой теплоизоляционной керамики с использованием лигнина, *Строительные материалы* 12: 46–47.
18. Jungk, E. K.; Halseband, H.; Ebert, K.; Krcmar, W. 1996. Pororsierungs mittel für die Leichtziegel-Herstellung, *Keramische Zeitschrift* 11: 1012–1017.
19. Mandeikytė, N.; Pečiulis, G. 1997. Lengvosios keramikos iš vietinių žaliavų tyrimai, *Cheminė technologija* 1(5): 57–62.
20. Sadūnas, A. 1997. *Aliumosilikatinių dirbinių ilgaamžiškumas*. Vilnius: VPU leidykla. 252 p.
21. Grziwa, M. 2004. Vermeidung schwarzer Kerne durch eine gezielte Brennführung, *Keramische Zeitschrift* 01: 4–8.
22. El-Alfi, E. A.; Radwan, A. M. H. 2004. Darweesh Effect of Sand as Non-Plastic Material on Ceramic Properties of Clay Bricks, *Interceram* 5: 330–333.

23. Sabrah, B. A.; Ebied, E. A. 1985. Utilization of cement-dust as a substitute of some clay content in clay-sand, *Interbrick* 1: 29–37.
24. Elwan, M. M.; El-Alfi, E. A.; El-Didamony, H. 2001. Effect of sand and by-pass cement dust as non-plastic materials in clay bricks, *Industrial Ceramics*. 21: 87–93.
25. Токарев, А. В.; Безродный, В. Г.; Степаненко, Е. К. 2001. Подбор кварцевого песка для производства лицевого керамического кирпича, *Строительные материалы* 2: 33–35.
26. Bołtryk, M.; Nikitin, V.; Backiel-Brzozowska, B. 2003. Optymalizacja ilości i składu granulometrycznego piasku oraz temperatury wypalu ceramiki ściennej pod kątem wytrzymałości na ściskanie, *Polski Biuletyn Ceramiczny* 80: 587–592.
27. Backiel-Brzozowska, B.; Bołtryk, M.; Nikitin, V. 2003. Modelowanie związków pomiędzy niektórymi czynnikami technologicznymi oraz wytrzymałością na ściskanie ceramiki ściennej, *Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej* 23: 7–19.
28. Nikitin, V.; Bołtryk, M.; Backiel-Brzozowska, B. 2004. Wpływ parametrów wypalania i składu granulometrycznego piasku na ściskanie tworzywa ceramicznego, *Polski Biuletyn Ceramiczny* 84: 377–382.
29. Goerg, H. 1998. Einfluß einer klassifizierten Mahlschamotte und eines gemahlenen Feldspats auf die Qualität extrudierter Fliesen, *Keramische Zeitschrift* 7: 558–561.
30. Schmidt-Reinholz, Ch.; Schmidt, H. 1996. The Effect of Lime and Dolomite in Brick Bodies and Finished Products (Teil 2), *Keramische Zeitschrift* 11: 1018–1023.
31. Petrikaitis, F. 1999. *Formavimo mišinio paruošimo ir kai kurių kitų technologinių faktorių įtaka keraminių gaminių kokybei. Daktaro disertacija*. Vilnius: Technika. 129 p.
32. Sedmalis, U.; Lagzdina, S.; Bidermanis, L.; Liepins, J. 2001. Building Ceramics with Hydraulic Activity, *Tile & Brick International* 17 (2): 108–113.
33. Балкявичюс, В.; Валюкявичюс, Ч.; Шпокаускас, А.; Лаукайтис, А.; Пятрикайтис, Ф. 2003. Спекаемость легкоплавких илитсодержащих глин, *Стекло и керамика* 6: 18–21.
34. Kaminskas, A.; Kaminskas, R. 2004. Stiklo atliekų smulkinimas ir antrinis panaudojimas, *Cheminė technologija*, 4(34): 5–13.
35. Žurauskienė, R.; Mačiulaitis, R.; Petrikaitis, F. 2001. Lietuvos teritorijoje esančių lengvai lydžių molių tinkamumas statybinei sukepusiajai keramikai, *Statyba* 3 (VII): 191–196.

36. Žurauskienė, R. 2002. *Sukepusioji statybinė keramika, pagaminta iš hidrožerutinių lengvai lydžių molių su priedais. Daktaro disertacija*. Vilnius: Technika. 100 p.
37. Žurauskienė, R.; Petrikaitis, F.; Mačiulaitis, R.; Špokauskas, A. 2002. Utilization of Catalyst Waste in Production of Sintered Ceramics, *Materials Science (Medžiagotyra)* 1: 87–90.
38. Мустафин, Н. Р.; Ашмарин, Г. Д. 2006. Клинкерная керамика на основе кремнеземистого сырья и техногенных отходов, *Строительные материалы* 1: 32–33.
39. Mukhopadhyay, T. K.; Ghosh, S.; Chakraborti, S.; Ghatak, S. 2005. Effect of Sodium Silicate on the Durability of Common Building Bricks, *Interceram* 4: 262–267.
40. Mandeikyte, M.; Valonciene, V. 2002. Einfluss des Zusatzes von Glaukonit auf die Eigenschaften von Keramikmassen, *Keramische Zeitschrift* 03: 186–191.
41. Dailydytė, A.; Mandeikytė, N.; Valančienė, V.; Kantautas, A. 2001. Glaukonitų panaudojimas keramikoje, *Cheminė technologija* 2 (19): 38–43.
42. Левицкий, И. А.; Павлюкевич, Ю. Г. 2005. Исследование возможности использования глауконитсодержащих пород в производстве стеновых керамических материалов, *Строительные материалы* 2: 46–48.
43. Daunoravičiute, D.; Mačiulaitis, R.; Žurauskienė, R. 1997. Hidrofobizacijos įtaka keraminių gaminių atsparumui šalčiui, iš 5-tos tarptautinės konferencijos „Naujos statybinės medžiagos, konstrukcijos ir technologijos“, vykusios 1997 m. gegužės 21–24 d. pranešimų medžiagos. Vilnius: Technika. 132–137.
44. Šadauskienė, J.; Ramanauskas, J.; Stankevičius, V. 2003. Hidrofobizuojančiųjų medžiagų įtaka apdailos plytų mūro vandens įgėriui ir džiūvimui, *Materials Science (Medžiagotyra)* 9 (1): 94–98.
45. Geich, H. 2004. Siliconimprägnierung von Grobkeramik, *Keramische Zeitschrift* 05: 304–306.
46. Stanaitis, V.; Jarulaitis, V.; Lasys, A. 1995. The Use of Waste from the Metalworking Industry in Ceramic Products, *Tile & Brick International* 11 (6): 450–453.
47. Warpechowski da Silva, N. I.; Zwonok, O.; Chies, F. 1998. Use of Solid Wastes in Clay Mixtures to Prepare Building Ceramic Materials, *Tile & Brick International* 14 (4): 247–250.

48. Aleko, V. A.; Kozhelupenko, E. B. 2001. Universal Solutions for Mixing Process Intensification, *Tile & Brick International* 17 (2): 114–116.
49. Гузман, И. Я. 2003. *Химическая технология керамики*. Москва: 000 РИФ “Стройматериалы”. 496 с.
50. Евтушенко, Е. И.; Кравцов, Е. И.; Кашеева, И. Ю.; Сыса, О. К. 2004. Структурная неустойчивость глинистого сырья, *Стекло и керамика* 5: 23–25.
51. Корнилов, А. В.; Лузин, В. П. 2004. Эффективные способы переработки глинистого сырья для получения изделий строительной керамики, *Стекло и керамика* 1: 24–26.
52. Шлегель, И. Ф.; Шаевич, Г. Я.; Карабут, Л. А.; Пашков, Е. Б.; Спитанов, В. В.; Астафьев, В. А. 2005. Установка «Каскад» для кирпичной промышленности, *Строительные материалы* 2: 20–22.
53. Какошко, Е. С.; Дятлова, Е. М.; Бирюк, В. А.; Заяц, Н. И. 2005. Влияние микробиологической обработки на технологические свойства глин различного минералогического состава, *Стекло и керамика* 6: 10–15.
54. Канаев, В. К. 1990. *Новая технология строительной керамики*. Москва: Стройиздат. 264 с.
55. Аугустиник, А. И. 1975. *Керамика*. Ленинград: Стройиздат. 592 с.
56. Rank, M. 2004. Formgebung für wärmedämmende Ziegel, *Keramische Zeitschrift* 1: 22–24.
57. Roters, J. 2002. Optimierung von Pressen zur Extrusion von keramischen Massen, *Keramische Zeitschrift* 2: 96–100.
58. Гайворонский, В. Ф.; Посторонке, А. И. 2005. Вакуумирование массы в производстве фарфоровых изоляторов, *Стекло и керамика* 10: 23–24.
59. Šiaučiūnas, R. 2001. *Keraminių medžiagų cheminė technologija*. Kaunas: Technologija. 189 p.
60. Кингери, У. Д. 1967. *Введение в керамику*. Москва: Издательство литературы по строительству. 500 с.
61. Sadūnas, A. 1999. *Aliumosilikatų degimas oksiduojančių-redukuojančių dujų terpėje*. Vilnius: VPU. 188 p.
62. Кара-Сал, Б. К. 2005. Влияние окислительно-восстановительных реакций на спекание керамических масс при пониженном давлении, *Строительные материалы* 2: 59–61.
63. Liere-Netheler, W. 1996. Schürlohbrenner-Technik für den Hochtemperaturbereich von Tunnelofenanlagen, *Keramische Zeitschrift* 11: 1005–1011.

64. Kiem, R. 1997. Verbesserung keramischer Brennprozesse durch flexibel automatisierte Impulse, *Keramische Zeitschrift* 8: 618–623.
65. Кройчук, Л. А. 2004. Использование биогаза в производстве грубой керамики, *Строительные материалы* 4: 57–58.
66. Шлегель, И. Ф.; Шаевич, Г. Я.; Мирошников, В. Е.; Карабут, Л. А.; Титов, Г. В.; Иванов, В. Г.; Блинов, А. Л. 2004. Скоростной обжиг кирпича - миф или реальность?, *Строительные материалы* 4: 23–25.
67. Dondi, M.; Marsigli, M.; Venturi, I. 1999. Microstructure and mechanical properties of clay brick: comparison between fast firing and traditional firing, *British Ceramic Transaction* 98 (1): 12–18.
68. Ярулайтис, В. И.; Матюкас, Ш. И.; Рамонене, И. А. 1974. Улучшение режима обжига керамических стеновых материалов в типовых тоннельных печах, *Строительные материалы* 7: 6.
69. Кондратенко, В. А.; Пешков, В. Н.; Следнев, А. В. 2004 Проблемы строительства и реконструкции кирпичных производств, *Строительные материалы* 2: 3–5.
70. Bender, W.; Häändle, F. 1991. The Frost Resistance of Ceramic Building Materials, *Annual for the Brick and Tile, Structural Ceramics and Clay Pipe Industries*: 86–100.
71. Van der Klugt, L. J. A. R.. 1993. Technological Factors Influencing the Frost Susceptibility of Clay Building Materials, *Annual for the Brick and Tile, Structural Ceramics and Clay Pipe Industries*: 24–33.
72. Hauck, D.; Hilker, E.; Ruppik, M. 1990. Influence of the Firing Process on Frost Resistance, *Ziegel Industrie* 9: 501–507.
73. Papargyris, A. D.; Botis, A. I.; Spiliotis, X.; Kasadakis, D.; Papapolymerou, G. 1994. Frost resistance of clay ceramic mixtures as a function of the firing program, *Ceram. Acta*. 6(4): 29–41.
74. Šveda, M. 2004. The effect of firing temperature and dwell time on the frost resistance of a clay roofing tile, *Ziegelindustrie International* 6: 36–43.
75. Bottryk, M.; Nikitin, V.; Backiel-Brzozowska, B. 2004. Influence of some technological factors upon wall ceramics frost resistance, *Journal of Civil Engineering and Management* X (4): 249–253.
76. Petrikaitis, F.; Žurauskienė, R. 2000. Dependencies of Physical – Mechanical Properties of Ceramic Articles on Some Technological Factors, *Materials Science (Medžiagotyra)* 6 (4): 330–333.
77. Пятрикайтис, Ф. А.; Каминскас, Э. Л.; Ярулайтис, В. Ю. 1984. Исследования влияния технологических факторов производства на

- показатели качества кирпича Даугеляйского ПОСМ, *Сборник трудов ВНИИ теплоизоляция*: 13–17.
78. Ярулайтис, В. Ю.; Пятрикайтис, Ф. А.; Дауноравичюте, Д. С.; Каминскас, Э. Л. 1988. Математическая оценка влияния технологических факторов производства на качество строительной керамики, *10. Ibausil. 10 Internationale Baustoff- und Silikattagung 9. bis 13. Mai 1988*, Weimar: 311–313.
79. Malaiškienė, J.; Mačiulaitis, R. 2004. New possibilities of quality regulation for ceramic product, *Journal of Civil Engineering and Management* X (1): 37–43.
80. Šveda, M.; Unčík, S. 1999. Einfluss der Porenstruktur auf die Frostbeständigkeit von Ziegelprodukten, *Ziegelindustrie International, Jahrgang* 52(7): 80–85.
81. Беляков, А. В.; Захаров, А. И. 1997. Улучшение морозостойкости строительной керамики, *Стекло и керамика* 3: 12–15.
82. Šveda, M. 2001. Frost resistance of Brick, *American Ceramic Society Bulletin* 80 (9): 46–48.
83. Šveda, M. 2003. Effect of water absorption on frost resistance of clay roofing tiles, *British Ceramic Transaction* 102 (1): 43–53.
84. Kičaitė, A.; Mačiulaitis R. 2002. Keraminių gaminių įmirkio kinetika eksploatacinio atsparumo šalčiui aspektu, *Journal of Civil Engineering and Management* VIII (2): 126–131.
85. Šveda, M. 2002. The effect of Antika admixture on the frost resistance of clay roofing tiles, *Ziegelindustrie International* 10: 29–33.
86. Stubbs, A. 2003. The use of borates in the brick and tile industry, *Ziegelindustrie International* 9: 92–96.
87. Šveda, M. 2003. Effect of water absorption on frost resistance of clay roofing tiles, *British Ceramic Transactions* 102 (1): 43–45.
88. Šveda, M. 1999. Einfluss der Porenstruktur auf die Frostbeständigkeit von Ziegelprodukten, *Ziegelindustrie International, Jahrgang* 52 (7): 80–85.
89. Franke, E.; Bentrup, H. 1993. Beurteilung der Frostwiderstandsfähigkeit im Hinblick auf lange Lebensdauer, *Ziegelindustrie International, Jahrgang* 46 (7/8): 483–492 und (9): 529–536.
90. Bačauskienė, M.; Norvaišienė, R. 2005. Tinko savybių kitimas veikiant rūgšties krituliams, *Cheminė technologija* 4(38): 67–70.
91. Barkauskas, V.; Stankevičius, V. 2000. *Pastatų atitvarų šiluminė fizika*. Kaunas: Technologija. 286 p.
92. Мачюлайтис, Р. 1997. *Морозостойкость и долговечность изделий фасадной керамики*. Вильнюс: Техника. 308 с.

93. Mačiulaitis, R. 1996. *Fasadinės keramikos atsparumas šalčiui ir ilgaamžiškumas*. Vilnius: Technika. 132 p.
94. Sadunas, A.; Bure, D. 2000. Water migration processes in heavy clay ceramics under cyclic freezing-thawing, *Industrial Ceramics* 20 (3): 153–159.
95. Sadunas, A.; Bure D. 2001. Water migration processes in heavy clay ceramics under freezing-thawing cycles, *Ceramurgia* 31 (1–2): 1–9.
96. Лыков, А. В. 1968. *Теория сушки*. Москва: Энергия. 471 с.
97. Лыков, А. В. 1978. *Тепломассообмен*: справочник. Москва: Энергия. 479 с.
98. Peake, F.; Ford, R. W. 1988. Kalibrierender Vergleich der BCRL-Frostprüfung von Mauertafeln mit realen Bewitterungsergebnissen, *Ziegelindustrie International* 10: 498–507.
99. Jedamzik, H-W. 2007. Einheitliches Europäisches Verfahren zur Beurteilung der Frostwiderstandsfähigkeit von Dachziegeln - Entwicklung und Normung des Verfahrens E in EN 539-2, *Ziegelindustrie International* 3: 14–33.
100. Kičaitė, A. 1999. Keraminių gaminių atsparumo šalčiui sparčiųjų prognozavimo metodu raida, *Statyba V* (3): 222–228.
101. Sadunas, A.; Mörtel, H.; Svinka, V.; Cimmers, A. 2005. Die Prognostizierung und Bestimmung der Frostbeständigkeit keramischer Dachziegel und Ziegel, *Keramische Zeitschrift* 01: 4–8.
102. Kičaitė, A.; Mačiulaitis, R. 2001. Naujos keraminių gaminių atsparumo šalčiui prognozavimo lygtys naudojant deformacinius rodiklius, *Statyba VII* (2): 131–137.
103. Mačiulaitis, R. 1994. *Keraminės medžiagos atsparumas šalčiui artimose eksploatacinėms sąlygose*. Naujas prognozavimo metodas. Termoizoliacijos instituto darbų rinkinys: 102–103.
104. Sadunas, A.; Mörtel, H.; Svinka, V.; Cimmers, A. 2003. Die Prognostizierung und Bestimmung der Frostbeständigkeit keramischer Dachziegel und Ziegel, *Internationale Baustofftagung 24–27 September 2003 j., Weimar Bundesrepublik Deutschland*: 1159–1168.
105. Mačiulaitis, R.; Kičaitė, A.; Nagrockienė, D.; Kudabienė, G. 2004. Evaluation of surface frost resistance of ceramic tiles, *Journal of Civil Engineering and Management* X (4): 285–293.
106. Бычков, А. С. 1999. *Способ определения морозостойкости строительных материалов*. Патент на изобретение № 2154271.
107. Бычков, А. С. 2001. Быстрые методы испытаний строительных материалов и конструкций, *Строительные материалы* 8: 10–13.

108. Schmitt-Thomas Kh. G.; Schmitt, S. 2002. Vom guten Ton zum guten Klang—Qualitätsüberwachung mit ist-Klangprüfung, *Keramische Zeitschrift* 2: 90–94.
109. Nonaka, T.; Hayakawa, Y.; Takeda, S.; Nishimori, H.; Yamaguchi, S. 1990. Ultrasonic testing for flaw detection in ceramics, *Journal of the European Ceramic Society* 6 (1): 9–14.
110. Mandeikytė, N.; Šiaučiūnas, R. 1997. *Keraminės technologijos laboratoriniai darbai*. Kaunas: Technologija. 97 p.
111. TS 7560104-10-94. 1994. *Keraminių gaminių molis. Techninės sąlygos*.
112. TS 3339786-05-94. 1994. *Keraminių gaminių smėlis. Techninės sąlygos*.
113. Nagrockienė, D.; Žurauskienė, R.; Mačiulaitis, R.; Kičaitė, A.; Ravneličėvas, V. 2005. *Medžiagų mokslas*. Metodikos nurodymai laboratoriniams darbams atlikti. Vilnius: Technika. 100 p.
114. Буре, Д. А. 1986. *Морозостойкость стеновых материалов в условиях близких к эксплуатационным*: Диссертация. Вильнюс. 249 с.
115. Горшков, В. С.; Савельев, В. Г.; Абакумов, А. В. 1995. *Вяжущие, керамика и стеклокристаллические материалы. Структура и свойства*. Москва: Стройиздат. 584 с.
116. Hanawalt Search Manual. Inorganic Phases. Sets 1–48. Pennsylvania, JCPDS, 1998.
117. Горев, В. В.; Филиппов, В. В.; Тезиков, Н. Ю. 2002. *Математическое моделирование при расчетах и исследованиях строительных конструкций*. Москва: Высшая школа. 206 с.
118. Ермаков, С. М. 1983. *Математическая теория планирования эксперимента*. Москва: Главная редакция физико-математической литературы. 392 с.
119. Адлер, Ю. П.; Маркова, Е. В.; Грановский, Ю. В. 1976. *Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий*. Москва: Наука. 279 с.
120. <http://www.statsoft.com>. [žiūrėta 2004-10-20].
121. Хартман, К.; Лецкий, Э.; Шефер, В. 1977. *Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов*. Москва: Мир. 552 с.
122. Зажигаев, Л. С.; Кишьян, А. А.; Романиков, Ю. И. 1978. *Методы планирования и обработки результатов физического эксперимента*. Москва: Атомиздат. 232 с.
123. Medekšas, H. 2003. *Gaminių kokybė ir patikimumas*. Kaunas: Technologija. 279 p.
124. Čekanavičius, V.; Murauskas, G. 1998. *Statistika ir jos taikymas. II*. Vilnius: TEV. 272 p.

125. Sakalauskas, V. 1998. *Statistika su statistika*. Vilnius: Margi raštai, 227 p.
126. LST CEN/TS 772-22. 2006. *Mūro gaminių bandymo metodai. 22 dalis. Keraminių mūro gaminių atsparumo šalčiui nustatymas*. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas. 16 p.
127. LST 1985:2006. 2006. *Keraminių mūro gaminių atsparumo šalčiui nustatymas*. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas. 16 p.
128. Kizinievič, O. 2006. *Pramoninių atliekų panaudojimo statybinėje keramikoje tyrimai. Daktaro disertacija*. Vilnius. 99 p.
129. Kičaitė, A.; Mačiulaitis, R.; Malaiškienė, J.; Kudabienė, G. 2007. Structure and destruction processes of building ceramic products. *The 9th International Conference Modern building materials, structures and techniques. Selected papers*. Vilnius: Technika, p. 83–87.

Autoriaus publikacijų sąrašas disertacijos tema

Straipsniai mokslo žurnaluose, referuojamuose pripažintose tarptautinėse duomenų bazėse, kurių sąrašą sudarė Lietuvos mokslo taryba

- 1A. Kizinievič, V.; Petrikaitis, F.; Kizinievič, O. 2006. Influence of technological factors on the structural parameters of clay masonry units, *Materials Science (Medžiagotyra)*, 12(1): 56–61. ISSN 1392-1320. (INSPEC).
- 2A. Kizinievič, V.; Petrikaitis, F. 2005. Influence of technological factors on the frost resistance of clay masonry units, *Cheminė technologija*, 4(38): 71–77. ISSN 1392-1231. (CAS).
- 3A. Kizinievič, V.; Petrikaitis, F.; Kizinievič, O. 2005. Influence of technological factors on the physical-mechanical properties of clay masonry units, *Materials Science (Medžiagotyra)*, 11(1): 45–50. ISSN 1392-1320. (INSPEC).
- 4A. Kizinievič, O.; Žurauskienė, R.; Kizinievič, V.; Petrikaitis, F. 2004. Influence of additives on physical mechanical properties and structural parameters of aliumosilicate products, *Journal of Civil Engineering and Management*, X (2): 125–130. ISSN 1392-3730. (INSPEC).

Straipsniai, publikuoti tarptautinių ir respublikinių konferencijų medžiagoje

- 5A. Kizinievič, V. 2005. Technologinių veiksnių įtaka keraminių mūro gaminių atsparumui šalčiui, *iš 8-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų*

- konferencijos „Lietuva be mokslo – Lietuva be ateities“, vykusios 2005 m. kovo 24–25 d., Vilniuje, medžiagos. Vilnius: Technika, 47–52. ISBN 9986-05-893-7.*
- 6A. Kizinievič, O.; Žurauskienė, R.; Kizinievič, V.; Petrikaitis, F. 2004. Dependence of fusible hydro micous clay building ceramics properties on additives, in *Proceedings: of 8th International Conference “Modern building materials, structures ant techniques” held of May 16–18, 2004.* Vilnius: Technika, 80–84. ISBN 9986-05-757-4.
- 7A. Кизиниевич, В. Г.; Петрикайтис, Ф. А. 2004. Оптимизация производства изделий строительной керамики с применением метода планирования эксперимента, в кн. *Матеріали Першої Міжнародної науково-практичної конференції "Науковий потенціал світу 2004". Будівництво та архітектура.* Дніпропетровськ: Наука і освіта, 57: 55–58. ISBN 966-7191-86-9.
- 8A. Kizinievič, V. 2004. Lietuvoje naudojamų keraminių čerpių fizikinių – mechaninių bei atsparumo šalčiui savybių tyrimai, iš *7-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Lietuva be mokslo – Lietuva be ateities“, vykusios 2004 m. kovo 25–26 d., Vilniuje, medžiagos. Vilnius: Technika, 195–200. ISBN 9986-05-775-2.*
- 9A. Kizinievič, V.; Petrikaitis, F. 2004. Technologinių veiksnių įtaka keraminių mūro gaminių fizikinėms mechaninėms savybėms, iš *konferencijos „Silikatų technologija“, vykusios 2004 m. balandžio 22 d., Kaune, medžiagos. Kaunas: Technologija, 70–75. ISBN 9955-09-628-4.*
- 10A. Kizinievič, V. 2003. Statybinės keramikos vystymosi perspektyvos, iš *6-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Lietuva be mokslo – Lietuva be ateities“, vykusios 2003 m. kovo 27–28 d., Vilniuje, medžiagos. Vilnius: Technika, 178–183. ISBN 9986-05-618-7.*
- 11A. Kizinievič, V.; Petrikaitis, F.; Kizinievič, O. 2003. Keraminės šukės kai kurių fizikinių mechaninių savybių priklausomybė nuo išdegančių priedų, iš *Tarptautinės konferencijos „Silikatų technologija“, vykusios 2003 m. balandžio 22 d., Kaune, medžiagos. Kaunas: Technologija, 115–120. ISBN 9955-09-403-6.*

Viktor KIZINIEVIČ

TECHNOLOGINIŲ VEIKSNIŲ POVEIKIS
KERAMINIŲ MŪRO GAMINIŲ
ATSPARUMUI ŠALČIUI

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai, medžiagų inžinerija (08T)

2008 10 16. 14,0 sp. l. Tiražas 20 egz.

Vilniaus Gedimino technikos universiteto

leidykla „Technika“, Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius

<http://leidykla.vgtu.lt>

Spausdino UAB „Baltijos kopija“

Kareivių g. 13B, 09109 Vilnius

<http://www.kopija.lt>