Jurgita MALAIŠKIENĖ,
Ramunė ŽURAUSKIENĖ, Olga KIZINIEVIČ

EFEKTYVI STATYBINĖ KERAMIKA

Projekto kodas
VP1-2.2-ŠMM-07-K-01-032

VGU statybos ir nekilnojamojo
turto sričių I pakopos studijų
programų atnaujinimas
diegiant inovatyvius
mokymo(si) metodus

Vilnius „Technika“ 2012

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Jurgita MALAIŠKIENĖ,
Ramunė ŽURAUSKIENĖ, Olga KIZINIEVIČ

EFEKTYVI STATYBINĖ KERAMIKA

Mokomoji knyga

Vilnius „Technika“ 2012

J. Malaiškienė, R. Žurauskienė, O. Kizinievič. Efektyvi statybinė keramika: mokomoji knyga. Vilnius: Technika, 2012. 246 p. [9,09 aut. l. 2012 12 03]

Mokomojoje knygoje aprašyti šiuolaikiniai statybinės keramikos gaminiai, jų žaliavos, gamybos technologijos ir savybės. Vadovaujantis Lietuvos ir Europos standartais, pateikti pagrindinių savybių nustatymo metodai. Didelis dėmesys skiriamas keraminių gaminių ilgalaikiškumui, efektyviam naudojimui, savybių reguliavimo galimybėms ir kokybės kontrolei. Knygoje taip pat parodyta, kaip gali būti atliekama eksperimentinių duomenų statistinė analizė.

Mokomoji knyga „Efektyvi statybinė keramika“ skirta VGTU Statybos fakulteto studentams. Ja galės naudotis dieninių ir nuotolinių skyrių studentai, studijuojantys medžiagotyros, statybinių medžiagų, statybinės keramikos, apdailos dirbinių ir kitas disciplinas. Taip pat knyga bus naudinga rengiant bakalauro ar magistro baigiamuosius darbus.

Leidinį rekomendavo VGTU Statybos fakulteto studijų komitetas

Recenzavo: doc. dr. Asta Kičaitė, (VGTU Statybinių medžiagų katedra),
dr. Valdas Balkevičius, (VGTU Termoizoliacijos institutas)

VGTU statybos ir nekilnojamojo turto sričių I pakopos studijų programų atnaujinimas diegiant inovatyvius mokymo(si) metodus. Projekto kodas Nr. VP1-2.2-ŠMM-07-K-01-032.

VGTU leidyklos „Technika“ 1429-S
mokomosios metodinės literatūros knyga
<http://leidykla.vgtu.lt>

Redagavimo darbus atliko IĮ Pikaverus

eISBN 978-609-457-397-2

doi:10.3846/1429-S

© Jurgita Malaiškienė, 2012

© Ramunė Žurauskienė, 2012

© Olga Kizinievič, 2012

© Vilniaus Gedimino technikos universitetas, 2012

TURINYS

Turinys	3
[vadas	8
1. Statybinės keramikos raida Lietuvoje	9
2. Pagrindinės žinios apie statybinės keramikos gaminius ir jų naudojimą	11
2.1. Efektyvūs keraminiai dirbiniai ir jų savybės	13
2.2. Keraminių mūro gaminių konstrukcijos	25
3. Žaliavos efektyviai statybinei keramikai	27
3.1. Plastiškos žaliavos	27
3.2. Cheminė molio sudėtis	30
3.3. Granulimetrinė molio sudėtis	32
3.4. Molio plastiškumas	32
3.5. Molio susitraukimas džiūstant ir degant	34
3.6. Molio atsparumas ugniai	34
3.7. Lietuvos telkinių moliai	35
3.8. Neplastiškos žaliavos	40
3.8.1. Liesikliai	40
3.8.2. Fliausai	40
3.8.3. Plastikliai	40
4. Formavimo mišinio sudėties poveikis keramikos savybėms	41
5. Antrinių žaliavų naudojimas efektyviai statybinei keramikai	52
6. Efektyvios keramikos pusgaminių ruošimas	59
6.1. Formavimo masių ruošimas	59
6.2. Formavimo masių granulometrija	63
6.3. Presavimo miltelių ruošimas	65
6.4. Pusgaminių formavimui keliami reikalavimai	66
6.5. Plastiško formavimo būdas	66
6.6. Miltelių presavimo formavimo būdas	67
6.7. Liejimo būdas	69
7. Džiovinimo ir degimo metu vykstantys procesai ir jų poveikis keramikos savybėms	71
8. Keraminių dirbinių gamybos technologija	83
8.1. Keraminių plytų gamybos technologija	83
8.2. Keraminių blokų gamybos technologija	89
8.3. Sendintų plytų gamybos technologija	91
8.4. Keramzito gamybos technologija	92
9. Keraminių gaminių kokybės kontrolė	95
9.1. HD ir LD gaminių reikalavimai	99
9.2. Keraminių gaminių sertifikavimas ir ženklinimas	103
10. Efektyvios keramikos struktūrinių rodiklių vertinimas	104
11. Statybinės keramikos ilgaamžiškumas pagal atsparumą šalčiui	111
12. Efektyvios keramikos savybių priklausomybė nuo džiovinimo ir degimo režimų	119

13. Keraminių gaminių sudėties parinkimo ir kitų pagrindinių savybių reguliavimo galimybės	127
13.1. Statistinės analizės ypatumai	127
13.2. Formavimo mišinio sudėties parinkimas	132
13.3. Keramikos savybių reguliavimo galimybės, keičiant džiovinimo ir degimo parametrus.....	137
13.4. Empirinių lygčių sudarymas ir jų prasmė	143
13.5. Empirinių lygčių naudojimo pavyzdžiai	153
14. Pagrindinių ir kitų žaliavų efektyviai statybinei keramikai tyrimas	155
14.1. Molio granulimetrinės sudėtis	155
14.2. Molingųjų dalelių ir dulkių kiekio nustatymas	157
14.3. Stambiagrūdžių molio intarpų kiekio nustatymas.....	160
14.4. Kitų žaliavų granulimetrinės sudėties nustatymas	161
14.5. Molio ir kitų žaliavų tankio nustatymas	165
14.5.1. Medžiagų savitojo tankio nustatymas	165
14.5.2. Medžiagų piltnio tankio nustatymas.....	166
14.6. Molio plastiškumas.....	167
14.6.1. Molio plastiškumo nustatymas Vasiljevo metodu	169
14.6.2. Molio plastiškumo nustatymas Zemjačenskio metodu	172
14.6.3. Molio plastiškumo nustatymas pagal vandens kiekį, reikalingą normalios konsistencijos molio tešlai gauti, ir džūstamąjį susitraukimą	173
15. Termografinė medžiagų analizė.....	177
16. Molio ir kitų žaliavų džiovinimo efektyvumo tyrimas.....	186
17. Efektyvios statybinės keramikos fizikinių, mechaninių savybių tyrimas.....	193
17.1. Keraminių mūro gaminių tariamojo (bruto) sausojo tankio ir įmirkio nustatymas.....	193
17.2. Keraminių mūro gaminių neto tūrio ir tuštymetumo nustatymas	194
17.3. Matmenų, leidžiamųjų nuokrypų, formos ir paviršiaus defektų nustatymas.....	195
17.4. Keraminių mūro gaminių pradinės vandens įgerties greičio nustatymas	198
17.5. Keraminių mūro gaminių gniuždymo stiprio nustatymas.....	199
17.6. Netaisyklingos formos medžiagos tankio nustatymas	202
17.7. Keraminių gaminių savitojo tankio nustatymas.....	203
17.8. Keraminių gaminių poringumo skaičiavimas	204
17.9. Keraminių gaminių šilumos laidumo koeficiento skaičiavimas	204
17.10. Keraminių apdailos plytelių įmirkio nustatymas	205
17.11. Keraminių apdailos plytelių lenkimo stiprio nustatymas.....	205
17.12. Keraminių apdailos plytelių kietumo pagal moso skalę nustatymas.....	207
18. Keramzito tyrimas	209
18.1. Keramzito granulimetrinės sudėties nustatymas.....	209
18.2. Keramzito piltnio tankio nustatymas.....	210
18.3. Keramzito dalelių tankio nustatymas.....	211
18.4. Keramzito tuštymetumo nustatymas.....	212
18.5. Keramzito drėgnio nustatymas	213
18.6. Keramzito vandens įmirkio nustatymas.....	213

18.7. Keramzito atsparumo trupinimui nustatymas	214
18.8. Keramzito dalelių formos nustatymas	216
19. Efektyvios keramikos gaminių ir atitvarų šiluminės varžos skaičiavimas	218
19.1. Sienos šiluminės varžos ir šilumos perdavimo koeficiento skaičiavimas	220
19.2. Šilumos perdavimo koeficiento pataisa ΔU_{fn} dėl papildomo šilumos nutekėjimo per metalines jungtis	224
19.3. Konstrukcijos iš termiškai nevienalyčių sluoksnių suminės šiluminės varžos skaičiavimas	226
Priedas	230
Literatūra	245

IVADAS

Šiuo metu, ypač Lietuvoje, itin aktuali keraminių gaminių ilgalaikiškumo didinimo problema, nes prieš keliolika metų pastatyti statiniai ne tik praranda pradinę išvaizdą (pleišėja, trupa ir pan.), bet ir pradeda griūti. Taip pat svarbios ir keraminių dirbinių termoizoliacinės savybės, kurias gerinant, taupomi energetiniai ištekliai, mažinama tarša. Tobulinti keraminių dirbinių savybes reikėtų jau nuo pradinio technologinio proceso momento: žaliavų parinkimo ir dozavimo. Vadinas, reikia žinoti, kaip kiekvienas formavimo mišinio komponento kiekis lemia galutines keramikos savybes, ypač atsparumą šalčiui. Žinoma, kad keramikos kokybė labai priklauso ir nuo tinkamo džiovinimo bei degimo režimų parinkimo, svarbi ir viso technologinio proceso intensyvi kokybės kontrolė. Todėl šioje mokomojoje knygoje išsamiai aprašytos statybinių keraminių dirbinių žaliavos, gamybos technologija, savybės ir jų vertinimo metodai.

Autoriai tikisi, kad ši mokomoji knyga bus naudinga Lietuvos universitetų ir kolegijų studentams, studijuojantiems statybines medžiagas ir rengiantiems baigiamuosius darbus.

Dėkojame recenzentams – doc. dr. Astai Kičaiti ir dr. Valdui Balkevičiui, pateikusiems vertingų pastabų.

1. STATYBINĖS KERAMIKOS RAIDA LIETUVOJE

Keraminės plytos yra seniausia dirbtinė statybinė medžiaga. Lietuvoje plytos pradėtos gaminti apie XIII a. Ankstyvosios lietuviškos plytos buvo 230–310 mm ilgio, 140–200 mm pločio, 60–90 mm storio. Kad geriau sukibtų su skiediniu, viename plytos gale būdavo 3–6 grioveliai (brauktinės plytos). Pavyzdžiui, Vilniaus Šv. Onos bažnyčia (XVI a., 1.1 pav.) panaudotos 33 skirtingų formų plytos. Iki XIX a. pradžios plytos paprastai buvo gaminamos sezoninėse plytinėse. Tik XIX a. pabaigoje atsirado daugiau plytinių.

1.1 pav. Šv. Onos bažnyčia

Plytinės buvo rengiamos ten, kur buvo randama tinkamo molio, o jo tinkamumas buvo vertinamas vizualiai. Tuo laikotarpiu buvo gaminamos labai įvairių dydžių, formų plytos, o jų susitraukimas džiūstant ir išdegant nebuvo vertinami, todėl įvairiuose pastatuose plytų matmenys labai skirtingi.

Kauno Perkūno namų fasadams panaudotos kelių ar net keliolikos dešimčių profilių plytos. Gotikinių bažnyčių ir Kauno fortų statytojai netoli nuo statinio gamino keramines plytas, kurios dar ir šiandien stebina kokybe, formų ir konstrukcinių galimybių gausa. Tai buvo raudonų plytų aukso amžius.

Lietuvoje 1990 m. veikė 18 keramikos gamyklų. 2001 m. Lietuvoje veikiančių keramikos gamyklų sumažėjo, beveik visų jų darbas tapo sezoninis (produkcija gaminama šiltuoju metų laiku).

Šiuo metu veikia šios statybinės keramikos gamybos įmonės: UAB „Rokų keramika“, UAB „Palemono keramika“, UAB „Tauragės keramika“, UAB „Švenčionių keramika“, UAB „Alytaus keramika“, UAB „Jašiūnų keramika“, UAB „Dvarčionių keramika“.

Kiekvienoje keramikos gamybos įmonėje gaminama tam tikra rūšis statybinės keramikos produkcijos, pvz., įmonėje „Jašiūnų keramika“ gaminami tik dekoratyviniai kokliai krosnims, keraminiai dirbiniai daromi tik rankomis. UAB „Dvarčionių keramika“ gamina keramines plyteles. Šioje įmonėje daromos keraminės apdailos plytelės sienoms ir grindims; pastaraisiais metais atidaryta nauja technologinė gamybos linija gaminti akmens masės plyteles. UAB „Rokų keramika“, UAB „Tauragės keramika“, UAB „Švenčionių keramika“ dalyvauja rinkoje susijungusios į korporaciją ir siūlo vartotojams keramines statybines plytas, sienų blokus, pertvarų, perdangų blokus, ventiliacijos kanalų ir kaminų blokus, grindinio blokelių, keramines sąramas. UAB „Palemono keramika“ gamina ir teikia į rinką keramines čerpes bei plytas.

Dauguma Lietuvoje gaminamos produkcijos – poringoji keramika iš lengvai lydžių molių. Pagrindinė produkcija – plytos, įvairūs blokai, čerpės, drenažo vamzdžiai. Tauragės gamykla jau anksčiau gamino apdailos plytas, tačiau jų atsparumas šalčiui galėjo būti didesnis. Tik viena įmonė Lietuvoje – UAB „Dvarčionių keramika“ gamina sukepusios keramikos gaminius, tačiau šioje įmonėje naudojamas ir atsivežtinis ugniai atsparus molis.

2. PAGRINDINĖS ŽINIOS APIE STATYBINĖS KERAMIKOS GAMINIUS IR JŲ NAUDOJIMĄ

Statybinė keramika – tai keraminiai dirbiniai, skirti gyvenamųjų, visuomeninių ir pramoninių pastatų sienoms mūryti, stogams dengti, grindiniams, grindims kloti, apdailai.

Kai kurios keraminių gaminių naudojimo sritys yra tradicinės, ir su jomis susiję reikalavimai atspindi standartuose arba tradicinėse normose, paremtose ilgalaikę praktiką. Šios normos dažnai yra vietinio pobūdžio, sudarytos, atsižvelgiant į vietovės klimatą, statybos tradicijas, vietines medžiagas, techninės priežiūros tradicijas ir pan. Kitos naudojimo sritys gali būti naujos ir netradicinės, ir tuo atveju medžiagų bei statybos charakteristikų lygio parinkimas priklauso nuo projektuotojo.

Pagal standartus yra kelios keraminių gaminių naudojimo sritys.

- Įprastinis mūras, esantis viduje ar išorėje ir paprastai pasižymintis patraukliu vaizdu. Jis gali būti laikantysis arba nelaikantysis).

- Apsaugotas mūras, apsaugotas nuo vandens skverbimosi. Tai gali būti išorinių sienų mūras su tinkamu tinko sluoksniu ar apdangalu, tuščiavidurės sienos vidinis kevalas arba vidaus siena. (Gali būti laikantysis arba nelaikantysis).

- Padengtas sluoksniuotu tinku arba tinkuotas mūras. Tinkuojamas mūras, esantis išorėje ar viduje. (Gali būti laikantysis arba nelaikantysis).

- Termoizoliacinis mūras, kurio termoizoliacinė funkcija pasireiškia dėl išorinių jo savybių. Tokio mūro didesniąją dalį sudaro didelio tuštymetumo keraminiai mūro gaminiai. (Gali būti laikantysis arba nelaikantysis).

- Apdailintas mūras) esantis išorėje ar viduje ir turintis patrauklų vaizdą. Jis mūrijamas iš apdailos mūro gaminių,

atitinkančių kokybės normas, o skiedinio siūlės rievėjamos, kad tikėtų to tipo mūro gaminiams. (Gali būti laikantysis arba nelaikantysis).

- Inžinerinės statybos mūras (inžinerinėje statyboje naudojamas mūras, pvz., drenuojant, grunto atraminėse sienose ir t. t., kur reikalingi ilgaamžiški bei didelio gniuždymo stiprio bei mažo vandens įmirkio mūro gaminiai.).

- Konstrukcinis mūras, esantis išorėje ar viduje, kurio apkrovos yra kitos, kaip savasis sunkis. Dažniausiai šis mūras vartojamas tais atvejais, kai mūro konstrukcinį skaičiavimą gali atlikti tik tinkamos kvalifikacijos asmuo. Konstrukcinis mūras gali būti apdailintas, įprastinis arba inžinerinės statybos. Toks mūras gali būti atsparus žemės drebėjimui.

Aukščiau nurodytoms reikmėms naudojamas mūras pasižymi tokiais savybėmis:

- atsparumu ugniai;
- garso izoliacija;
- šilumos izoliacija.

Mūro gaminių ilgaamžiškumas turi būti pakankamas, kad jie neirtų dėl vietinių aplinkos sąlygų poveikio, išlaikytų konstrukcinį ir funkcinį statinio vientisumą.

Kad galima būtų tinkamai parinkti keraminius gaminius, įvestas sąlyginis aplinkos skirstymas:

- stipriai ardanti;
- vidutiniškai ardanti;
- neardanti.

Pateikiame keletą mūro stipriai ardančioje aplinkoje pavyzdžių.

- Netinkuotas mūras prie grunto paviršiaus, kuris gali įmirkti ir užšalti.

- Netinkuoti parapetai, kurie gali įmirkti ir užšalti, kai parapetas neapsaugotas efektyvia dengiamąja eile.
- Netinkuotas išorinis dūmtraukio mūrinys, kuris gali įmirkti ir užšalti.
- Užmovos, dengiamosios eilės ir slenksčiai srityse, kuriose gali pasireikšti šalčio poveikis.
- Laisvai stovinčios apsaugos sienos, kurios gali įmirkti ir užšalti, kai siena neapsaugota efektyvia dengiamąja eile.
- Žemės atraminės sienelės, kurios gali įmirkti ir užšalti, kai siena neapsaugota efektyvia dengiamąja eile arba laidų vandeniui iš atraminės pusės.

Mūras vidutiniškai ardančioje aplinkoje yra apsaugotas nuo įmirkimo. Tam taikomos tokios priemonės:

- sienos apsauga stogo iškyšomis arba dengiamosiomis eilėmis;
- palangių išsikišusios išraitos;
- hidroizoliacinis sluoksnis sienų apačioje ar pagrinde.

Dar keletas mūro neardančioje aplinkoje pavyzdžių.

- Išorinių sienų mūras, jei turi tinkamą apsaugą, kurios laipsnis priklauso nuo klimatinių sąlygų. Kaip rodo patirtis, kai kuriose Europos vietose kaip apsauga yra naudojamas storas tinkamas išorinio sluoksniuotojo tinko sluoksnis. Tais atvejais, kai yra pavojus, jog drėkinimą lydės užšalimas, apsaugą turi sudaryti nelaidi danga.
- Vidinių sienų mūras ir tuščiavidurių sienų vidinis kevalas.

Keraminiai dirbiniai pagal šukės poringumą skirstomi į poringuosius ir sukepusiuosius. Poringieji keraminiai gaminiai (blokalai, plytos ir t. t.) tokie, kurių vandens įmirkis, nustatytas po

72 (val.), yra didesnis nei 5 %, sukepusiųjų – mažesnis (apdailos plytos, plytelės, trinkelės ir kt.).

Atsižvelgiant į gamybai naudotas žaliavas, taip pat į gamybos technologinį procesą, statybinė keramika skirstoma į tris pogrupius:

- grublėtąją keramiką;
- dailiąją keramiką;
- ugniai atsparius gaminius.

Grublėtoji: plytos, blokai, čerpės, drenažo ir kanalizacijos vamzdžiai, grindų plytelės. Dailioji keramika: fajanso, porceliano, akmens masės dekoratyviniai dirbiniai, apdailos plytelės, sanтехnikos gaminiai, elektroniniai ir radiotechniniai dirbiniai. Ugniai atsparūs dirbiniai nepraranda savo formos iki 1580 °C.

Statybinė keramika pagal paskirtį gali būti skirstoma į:

- mūro dirbinius (LD ir HD dirbiniai);
- stogų dirbinius (čerpės);
- fasadinius dirbinius (fasadinės plytelės, karnizų, palangių detalės);
- vidaus sienų apdailos dirbinius (glazūruotos ir neglazūruotos plytelės);
- grindų ir šaligatvių dirbinius (grindų plytelės, klinkerio gaminiai, grindų blokai);
- požeminių komunikacijų dirbinius (drenažo ir kanalizacijos vamzdžiai);
- šilumą izoliuojančias medžiagas (porėti blokai, keramzitas);
- betono užpildus (keramzitas, agropolitas).

2.1. Efektyvūs keraminiai dirbiniai ir jų savybės

Efektyviais statybinės keramikos gaminiais vadinami itin geromis savybėmis, pvz., mažu šilumos laidumu arba dideliu atsparumu šalčiui ir stipriu, pasižymintys keraminiai dirbiniai.

Šiuo metu gaminami keraminiai dirbiniai yra arba atsparūs šalčiui – jie skirti fasadų mūrijimui, arba efektyviai poringi, turintys mažą šilumos laidumą, – šie skirti pertvaroms dėl geros garso izoliacijos arba mažaukščioms pastatams mūryti (iki 4 aukštų), nes yra mažo stiprumo. Lietuvoje Rokų ir Palemono keramikos gamybos įmonių gaminamų blokų, kurių formavimo mišinio sudėtis dažniausiai esti molis, smėlis, skaldelė (degtas keramikos laužas), pjuvenos, durpės ir anglis, deklaruojamas šilumos laidumo koeficientas apie $0,19 \text{ W/mK}$, atsparumas šalčiui siekia vos 25 ciklus, o gniuždymo stipris $7,5\text{--}10,0 \text{ MPa}$. Standartinių pilnavidurių plytų, skirtų fasadams mūryti, šilumos laidumo koeficientas $0,81 \text{ W/mK}$, o atsparumas šalčiui, nustatytas tūriniu būdu, taip pat gana mažas – 75–100 ciklų, todėl dažnai vos praėjus keleriems metams po statybos, dėl atmosferos poveikio prasideda fasadų iš keraminių plytų ar blokų paviršiaus irimas (lupimasis, pleišėjimas ar trupėjimas).

Poringojo kūno atsparumas šalčiui yra fizikinė savybė, parodanti poringojo kūno gebėjimą išlaikyti kai kurių fizikinių parametrų tam tikras iš anksto nustatytas kitimo ribas, kai jis po mirkymo vandenyje yra pakaitomis šaldomas ir atšildomas. Medžiagos atsparumas šalčiui išreiškiamas šaldymo atitirpinimo ciklų skaičiumi, kurį be jokių suirimų atlaikė gaminy. Atsparumo šalčiui vertinimo kriterijai yra tokie: gniuždymo stiprio sumažėjimas, masės pokyčiai, akimi matomi įtrūkiai ir kitokie irimai.

Taigi keramikos gaminiai dažniausiai yra arba eksploatuojant atsparūs šalčiui (sukepusioji keramika, kurios vandens įmirkis ne didesnis už 5 %), arba poringi (poringoji keramika, kurios vandens

įmirkis didesnis už 5 %) ir turintys mažesnę šilumos laidumo koeficientą, tačiau eksploatuojant mažai atsparūs šalčiui.

Medžiagos šilumos laidumas dažniausiai vertinamas šilumos laidumo koeficientu. Šilumos laidumo koeficientu vadinamas fizikinis medžiagos parametras, rodantis, kokią šilumos kiekį sugeba praleisti nagrinėjamoji medžiaga per vienetinį laiką ir pro vienetinį plotą, kai temperatūros gradientas lygus vienetui. Taigi šilumos laidumo koeficiento mato vienetas yra $J/s \cdot m^2/(K/m)$ arba W/mK .

Medžiagų šilumos laidumas labai priklauso nuo porų dydžio ir jų išsidėstymo. Stambiaporė medžiaga labiau praleidžia šilumą negu smulkiaporė. Tai galima paaiškinti tuo, kad šiluma stambiose porose sklinda ir konvekcijos būdu, o smulkiose oras nejuda. Atviraporė medžiaga praleidžia šilumą labiau negu medžiaga su uždaramis poromis, nes atviros susisiekiančios poros sudaro ištisinius kanalus.

Pasaulyje keraminės plytos (2.1 pav.) dažniausiai gaminamos plastiškuoju arba pussausiu būdu. Paprastai pilnavidurės keraminės plytos pasižymi gana dideliu šilumos laidumo koeficientu, tačiau jų gniuždymo stipris, kaip ir atsparumas šalčiui, didesni. Siekiant sumažinti šilumos laidumo koeficiento vertę, gaminamos skylėtotosios plytos, tačiau jų gniuždymo stipris ir atsparumas šalčiui (25 šaldymo ir atšildymo ciklai) jau yra mažesni. Standartiniai keraminių plytų matmenys yra $250 \times 120 \times 65$ mm, gali būti gaminamos ir pastorintos $250 \times 120 \times 88$ mm plytos. Suderinus su užsakovu, plytos gali būti gaminamos kitos formos ar kitų matmenų. Plytų tankis $1,5\text{--}2,4 \text{ g/cm}^3$. Plytų gniuždymo stipris $2,5\text{--}30$ MPa, pilnavidurių plytų lenkiamasis stipris $0,8\text{--}4,4$ MPa, skylėtų plytų $0,5\text{--}2,9$ MPa, įmirkis $6\text{--}21$ %, atsparumas šalčiui >50 ciklų.

Pagal gniuždymo stiprį plytos gali būti: 30; 25; 20; 17,5; 15; 12,5; 10; 7,5; 5; 3,5 MPa. 35 MPa ir 25 MPa plytos naudojamos mažaaukščių pastatų sienoms mūryti. Apdailos plytos turi būti ne žemesnės kaip 10 MPa, o kaminams naudojamos – ne žemesnės kaip 12,5 MPa. Pagal atsparumą šalčiui keraminės plytos būna F15, F25, F35, F50, F75, F100, F125.

2.1 pav. Keraminės plytos

Šiuo metu sienoms mūryti dažnai naudojami tuštymėti keraminiai blokai, kurių matmenys: ilgis 19,7; 24,7; 28,5; 38,7 cm, aukštis 18,8 cm ir 23,8 cm (europinis), storis 17,5; 20; 25; 30; 40 cm. Leidžiami matmenų nukrypimai yra: ilgiui + 10 mm ir -5 mm, storiui ± 5 mm, aukščiui ± 3 mm. Šių dirbinių paviršiai daromi lygūs arba rievėti, kad geriau sukibtų su skiediniu. Mūrijimo patogumui, tam, kad blokų nereikėtų pjaustyti, gaminami pusiniai blokai. Atitvarose blokai jungiami tik horizontaliomis siūlėmis, vertikalioje plokštumoje blokai vienas su kitu jungiami įlaidiniu jungimu (vienų blokų iškyšos susijungia su kitų blokų įdubimais). Tuštymės dirbinyje gali būti išdėstytos taip, kaip pateikta 2.2 ir 2.3 paveiksluose.

2.2 pav. Tuštymių išdėstymo variantai

2.3 pav. Dirbinys su vertikaliomis kiaurymėmis ir įlaidinio sujungimo sistema

Ventiliacijos kanalų blokuose gamybos metu suformuojamos viena arba dvi stačiakampio formos kiaurymės, o kaminų blokuose

suformuojama viena apvali kiaurymė, į kurią statybos metu yra įstatomas metalinis įdėklas, apsuktas termoizoliacine medžiaga. Su dauguma blokų statybos metu patogų dirbti, nes jų storis atitinka sienų blokų storį.

Pagrindinės gaminamų tuštymėtų keraminių blokų savybės:

- tankis – 680–950 kg/m³;
- gniuždymo stipris – 7,5–10 MPa;
- atsparumas ugniai – 120–240 min., degumo klasė – A1;
- garso izoliavimas – 45–50 dB;
- šilumos varža – 0,66–2,32 m²K/W, šilumos laidumo
- koeficientas – 0,08–0,25 W/mK;
- vandens įmirkis – > 10 %;
- vieno bloko masė – nuo 10 kg iki 17,8 kg;
- atsparumas šalčiui – 25 ciklai.

Keraminiai blokai pertvaroms plonesni už sienų blokus, jų tankis 1,5–1,75 g/cm³, ilgis 397 mm, plotis nuo 80 mm iki 120 mm, o aukštis toks pat kaip ir sienų blokų (188 arba 238 mm). Pertvarų blokų gniuždymo stipris 7,5–10 MPa, atsparumas šalčiui 25 ciklai, atsparumas ugniai 90–120 min., garso izoliavimas 40–45 dB, masė nuo 5 iki 11,4 kg. Pertvarų blokai naudojami pertvaroms pastatų viduje mūryti. HD dirbiniais gali priklausyti ir keraminiai blokai atitvaroms, kurių tankis didesnis, pvz., 1,75 g/cm³. Šių blokų plotis 188–300 mm, atsparumas ugniai 180–240 min, garso izoliavimas apie 50 dB, gniuždymo stipris iki 15 MPa.

Perdangos iš keramikos surenkamos be sunkiasvorių kėlimo mechanizmų ir yra pritaikytos naujai statybai arba atliekant restauravimo darbus. Šie blokai gali būti kabinami ant betoninių arba keraminių sijų (2.4 pav.).

Jei statyboje bus naudojamos keraminės sijos, jas reikia paruošti, nes keraminiai sijų elementai yra 330 mm ilgio. Tokie elementai jungiami į siją betonu ir sustiprinami plienine armatūra. Keraminiai

perdangos blokai užkabinami specialiai tam skirtais išsikišimais bloke (2.5, 2.6 pav.) ant paruoštų ir tam tikru atstumu sudėtų sijų. Blokais užpildyta perdanga užliejama betonu, kuris armuojamas plieniniu tinklu. Minimalus betono storis virš perdangos bloko – 4 cm.

2.4 pav. Keraminis perdangos blokas

2.5 pav. Keraminė sija

2.6 a)

2.6 pav. Perdanga iš keraminių perdangos blokų ir keraminių sijų

Iš keramikos gaminami ir saramų blokai (2.7 pav.), jie jungiami į saramą betonu ir stiprinami plienine armatūra.

2.7 pav. Keraminis sąramos blokas

Keramzitas (2.8 pav.) – labai porėta biri medžiaga, kurios pagrindinė žaliava molis. Tai geras termoizoliacinės savybės turintis bei išoriniams poveikiams atsparus birus užpildas, apytiksliai 4–5 kartus lengvesnis už gamtinius analogus; keramzito sudėtyje nėra tirpiklių ar plaušinių dalelių. Keramzite vyrauja uždaros poros, kurios užima 75 % grūdelių tūrio. Ši dirbtinė medžiaga atitinka A1 klasės priešgaisrinius reikalavimus. Pagal piltinį tankį keramzitas skirstomas į 10 rūšių (piltinis tankis nuo 250 – 800 kg/m³), pagal stiprį gniuždant į 11 rūšių (gniuždymo stipris 0,6–8 MPa).

2.8 pav. Keramzito granulės

Keramzito granulės vidaus mikrostruktūra parodyta 2.9 paveiksle.

2.9 pav. Keramzito granulės vidinio sluoksnio mikrostruktūra (padidinta 300 kartų)

Dažniausiai naudojamo keramzito gniuždymo stiprio priklausomybė nuo jo piltinio tankio pateikta 2.1 lentelėje.

2.1 lentelė. Keramzito gniuždymo stiprio priklausomybė nuo jo tankio

Charakteristika	Keramzito tankis, kg/m ³			
	250–350	350–450	450–500	500–600
Gniuždymo stipris, MPa	1	1,5	2	3

Keramzitas naudojamas pamatams šiltinti, drenavimo sistemai įrengti, grindims kloti ant grunto, želdiniams formuoti; jis tinka būti užpildu tarp perdangų, įrengiant plokščius arba mažo nuolydžio

stogus, grindims lyginti. Dideli keramzito kiekiai naudojami keramzitbetonio gamybai. Iš keramzitbetonio gaminami sienų, pertvarų, pamatų blokeliai, sąramos.

Keramzito granulių dydis – nuo 2 iki 40 mm. Keramzitas, kurio granulės mažesnės nei 4 mm, vadinamas keramzito smėliu, o kurio granulės 4–40 mm dydžio, – keramzito žvirgždu.

Keramzitas pasižymi tokiomis savybėmis:

- yra lengvas;
- atsparus šalčiui;
- mažai laidus šilumai (šilumos laidumo koeficientas λ nuo 0,09 iki 0,16 W/(m · K);
- pakankamai stiprus.

Keramzitas naudojamas plokščių stogų nuolydžiams sudaryti, ertmėms užpildyti, grindims kloti, keramzitbetonio blokeliams, sąramoms gaminti.

Atsparūs šalčiui keraminiai gaminiai gali būti:

- klinkerinės fasado apdailos plytos;
- sendintos plytos;
- apdailinės klinkerio plytelės;
- čerpės.

Pagrindinės atsparių šalčiui keraminių gaminių savybės:

- atsparumas šalčiui – > 100 ciklų;
- vandens įmirkis – < 5 %;
- tankis – > 1500 kg/m³;
- gniuždymo stipris – > 20 MPa;
- šilumos laidumo koeficientas – apie 0,9 W/mK;
- degumo klasė – A1.

Neapsaugotame mūre stipriai agresyvioje aplinkoje gali būti naudojamos klinkerinės plytos, kurios pasižymi mažu vandens

įmirkiu iki 5 %, dideliu tankiu $> 2,0 \text{ g/cm}^3$ ir dideliu gniuždomuoju stipriu $> 36 \text{ MPa}$, jos ypač atsparios šalčiui, atsparumas šalčiui siekia 200 ciklų ir daugiau.

Prieš dešimtmetį išpopuliarėjo interjerai iš senų keraminių mūro elementų. Vis daugiau individualių namų ar restauruojamų patalpų savininkų įsigydavo naudotų, senų keraminių plytų, kurios jau buvo ilgai tarnavusios mūrinėse senųjų pastatų, statytų prieš Antrąją pasaulinį karą, konstrukcijose. Taip statiniui suteikiamas „senovinio autentiškumo“ įvaizdis, sukuriamas tam tikra atmosfera. Šie mūro gaminiai buvo plačiai naudojami restauruojant, atliekant įvairių patalpų dekorą, o kartais ir apdailinant individualių namų fasadus. Šios naudotos plytos buvo atrenkamos ardant senus statinius. Spaudoje prieš kelerius metus aprašyti atvejai, kai plytų pardavėjai ardydavo ir parduodavo netgi architektūros paminklus. Senųjų keraminių plytų naudojimas pastaraisiais metais buvo įgavęs tokį mastą, kad šie seni, išimti iš pastatų konstrukcijų gaminiai net buvo vežami iš Kaliningrado srities (Rusija).

Kadangi senų plytų paklausa didelė, o vietų, iš kur jų galima paimti, labai sumažėjo, vis dažniau senų plytų vietoje naudojamos „sendintos“ plytos. Tokias plytas gamina visi pagrindiniai keraminių plytų gamintojai. Lietuvoje tokių plytų galima įsigyti iš Vokietijos, Olandijos, Belgijos, Estijos ir net Latvijos gamintojų.

Šiuolaikinė keramikos pramonė gamina „sendintas“ plytas, labai panašias į senas, o šių gaminių savybes kontroliuoja gamintojas. „Sendintomis“ vadinamos keraminės plytos išore nesiskiria nuo senų gaminių, o kaina panaši į standartinių keraminių mūro gaminių.

Kad plytos atrodytų senos, laiko ir aplinkos paveiktos, jas galima gaminti rankomis medinėse formose arba įprastai, bet naudojant specialius volus reljefiniam paviršiui suformuoti. Pavyzdžiui, po rūšiavimo plytos gali būti sudedamos į būgnus, į kuriuos pridedama ir skiedinio. Sukant būgną, aštrūs plytų kampai bei briaunos apsitrina ir aprupa, o plytos pasidengia plona skiedinio plėvele, kuri ir pakeičia jų spalvą. Tokiu būdu paruoštos plytos atrodo kaip ilgus

metus išbuvusios mūro konstrukcijoje. Norint kokybiškai atlikti restauracijos ar dekoru darbus, reikėtų ir naudoti tokius keramikos pramonės gaminamus mūro gaminius.

Šių plytų ilgis, plotis ir aukštis varijuoja gana smarkiai. Pagal šiuo metu galiojantį standartą LST EN 771-1 HD (didelio tankio) keraminių mūro gaminių matmenų skirtumas tarp deklaruojamos ir vidutinės vertės, gautos matuojant bandinius) turi būti ne didesnis už vienos iš toliau deklaruojamų leidžiamų nuokrypių klasių vertę. Šios klasės yra T1, T2 arba Tm. T1 ir T2 klasės turi griežtai reglamentuotas ribas, iki kurių gali nukrypti gaminių matmenys, o štai klasė Tm – tai gamintojo deklaruota nuokrypa, kuri gali būti didesnė arba mažesnė kaip kitų klasių. Dažniausiai „sendintų“ keraminių plytų leidžiamosios nuokrypos atitinka Tm klasę.

Išnagrinėkime pavyzdį: paimkime keraminį mūro gaminį, kurio pagaminimo matmenys 250x120x65 mm, gamintojas deklaruoja, kad jo keraminio mūro gaminio ilgio, pločio, aukščio nuokrypos atitinka Tm nuokrypų klasės vertę ir lygios ± 15 mm. Vadinasi, plytos ilgis, plotis ir aukštis gali nukrypti nuo pagaminimo matmenų iki 15 mm tiek į mažesnę, tiek į didesnę pusę, o jei plytos leidžiamosios nuokrypos atitiktų T1 klasę, ilgis galėtų nukrypti ± 6 mm, o T2 klasę – ± 4 mm. Dėl to renkantis „sendintas“ keramines plytas, reikėtų pasidomėti leidžiamomis gamintojo deklaruotomis matmenų nuokrypomis. Esant tokioms dažnai didesnėms nei standartinių apdailinių keraminių mūro plytų matmenų nuokrypoms, su šiomis plytomis mūryti konstrukcijas gana sudėtinga, reikia aukštesnės darbų atlikimo kokybės.

Renkantis aprašytus „sendintus“ keramines mūro gaminius, nevertėtų pamiršti ir kitų svarbių reikalavimų: gniuždymo stiprio ir atsparumo šalčiui klasės, nes keraminiai gaminiai gali būti naudojami labai įvairiai, ir kiekvienu atveju reikalingas jį atitinkantis charakteristikų lygis.

2.2. Keraminių mūro gaminių konstrukcijos

Sienų konstrukcijos gali būti vienasluoksnės ir daugiasluoksnės. Vienasluoksnės (2.10 pav.) mūro sienos yra sudarytos iš vieno tipo mūro elementų, pvz., tik blokelių.

Tokioms sienoms nereikia didelės šiluminės varžos, nes mūrijami nešildomi pastatai, pvz., garažai, sandėliai ir pan.

Blokai gali būti tinkuojami, dengiami dailylentėmis, stogas turi būti nuleistas, kad ant sienos kuo mažiau pakliūtų arba visai nepakliūtų tiesioginio lietaus vandens.

2.10 pav. Vienasluoksnė mūro siena

Daugiasluoksne mūro konstrukcija (2.11 pav.) vadinama tada, kai konstrukcijoje naudojamas laikantis mūras, prie kurio pritvirtinta termoizoliacinė medžiaga, oro tarpas ir apdailinis mūras. Laikantysis ir apdailinis mūro sluoksniai vienas su kitu dažniausiai tvirtinami metalinėmis detalėmis. Ilgaamžei išorinei mūro apdailai turėtų būti naudojami tokie keraminiai gaminiai, kurių vandens įmirkis mažesnis nei 5 %.

2.11 pav. Daugiasluksnė mūro konstrukcija

Taip pat svarbus sienos vėdinimas ir apsauga nuo lietaus, nes dėl drėgmės vykstant daugkartiniams užšalimams ir atšilimams, mūras pradeda irti.

3. ŽALIAVOS EFEKTYVIAI STATYBINEI KERAMIKAI

Keramikos gamyboje naudojamos dviejų rūšių žaliavos:

- plastiškos (įvairių rūšių molis);
- neplastiškos (koreguojantys priedai – liesikliai, flusai, plastikliai, dažančios medžiagos).

3.1 Plastiškos žaliavos

Molis – nuosėdinė, dažniausiai polimineralinė, uoliena, susidariusi dūlėjant, kaolinizuojantis lauko špatams, magminėms ir silikatinėms uolienoms. Susidarymo vietoje randami moliai vadinami pirminiais. Jie dažnai būna užteršti nesuirusių uolienų nuolaužomis. Moliai, vandens arba vėjo pernešti į kitas vietas, vadinami antriniais. Antriniai moliai būna smulkesni, plastiškesni už pirminius.

Molio mineralai – tai smulkiadispersiniai hidroaliumosilikatai, kurie sumaišyti su vandeniu tampa plastiški, t.y. dalelės gali slysti viena kitos atžvilgiu. Molio mineralų prigimtis daugiausia priklauso nuo pradinės uolienos cheminės sudėties, fizinių bei cheminių sąlygų, terpės. Molio mineralų yra daugiau kaip 40.

Priklausomai nuo kristalinės struktūros, jie skirstomi į tris grupes.

- Kaolinito grupė.

Pagrindiniai mineralai – kaolinitas ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), haluazitas ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$). Išskirtinė šių moliių savybė – didelis atsparumas aukštoms temperatūroms (iki 1770 °C). Kaolinito mineralai paprastai susidaro, esant rūgščiai terpei.

3.1 pav. Kaolino mineralo SEM vaizdas

- Montmorilonito grupė.
Pagrindiniai mineralai – montmorilonitas ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$), beidelitas ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$), saponitas bei jų geležingos atmainos. Išskirtinė šių molių savybė – labai brinksta vandenyje, yra plastiški, dėl to džiovinami ir degami gana nemažai susitraukia. Montmorilonito mineralai dažniausiai susidaro neutralioje arba silpnai šarminėje terpėje.
- Hidrožėručio grupė. Tai labiausiai paplitusi, įvairios cheminės sudėties molių grupė. Pagrindiniai mineralai – ilitai. Paprastai šios grupės moliai turi nemažai priemaišų: karbonatų, lauko špatų, kvarco.

3.2 pav. Montmorilonito mineralų SEM vaizdas

3.3 pav. Ilito mineralų SEM vaizdas

3.2. Cheminė molio sudėtis

Moliai yra sudaryti iš įvairių oksidų – SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , TiO_2 , CaO , MgO , Na_2O , K_2O , SO_3 , laisvo bei chemiškai surišto vandens, organinių priemaišų.

SiO_2 – pagrindinis molio komponentas, įeinantis į įvairių silikatų sudėtį arba būna laisvas, kvarcinio smėlio pavidalo. Didėjant šio komponento kiekiui molyje, mažėja plastiškumas, susitraukimas džiustant, išdegtų gaminių stiprumas. Lietuvos moliuose šio oksido gali būti iki 65 % (3.1 lentelė).

Al_2O_3 – labiausiai pageidautinas molių cheminės sudėties oksidas, moliuose sujungtas į hidroalumosilikatus. Didėjant jo kiekiui, gerėja molio plastiškumas, atsparumas ugniai, išdegtų gaminių stiprumas. Lietuvos moliuose jo yra iki 20 % (3.1 lentelė).

3.1 lentelė. Kai kurių Lietuvos molių cheminė sudėtis

Telkinio pavadinimas	Cheminė sudėtis, %							K*
	SiO_2	Al_2O_3 + TiO_2	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	
Ukmergė	66,33	15,8	6,42	1,8	2,72	1,63	—	5,3
Rokai	49,81	18,62	7,16	7,35	3,84	0,14	—	12,1
Tauragė	47,63	18,08	7,37	8,53	3,22	3,06	0,76	11,7
Dysna	51,63	20,09	7,56	5,45	1,46	3,35	1,15	9,1
Daugėliai	44,67	13,68	5,62	13,4	4,4	2,5	0,65	14,8
Kertupis	48,70	18,43	8,52	6,8	2,5	4,52	—	11,2

K* – kaitmenys

Fe_2O_3 ir FeO – pagrindiniai molio dažantieji oksidai. Fe^{3+} buvimas gamtiniuose alumosilikatuose yra labai svarbus dėl jo gebėjimo redukuotis į Fe^{2+} , o tai sudaro galimybes intensyvuoti sukepimo reakcijas. Priklausomai nuo šio oksido kiekio molyje bei degimo aplinkos keičiasi gaminių spalva (3.2 lentelė). Lietuvos moliuose paprastai randama nuo 5 iki 9 % Fe_2O_3 .

3.2 lentelė. Fe_2O_3 įtaka keraminės šukės spalvai

Fe_2O_3 kiekis molyje, %	0,8	1,3	2,7	4,2	5,5	8,5	10
Spalva	Balta	Balsva	Šviesiai geltona	Geltona	Šviesiai raudona	Raudona	Tamsiai raudona

TiO_2 taip pat priskiriamas dažantiems oksidams. Esant didesniam šio oksido molyje kiekiui, keraminė šukė nusidažo pilka spalva. Lietuvos moliuose šio oksido būna tik iki 1 %, todėl didelės įtakos šukės savybėms jis neturi.

CaO ir MgO oksidai molyje daugiausia būna karbonatų pavidalo. Lietuvos moliuose CaO būna net iki 13 % (3.1 lentelė). CaO ir MgO oksidai turi neigiamą įtaką molio lydymosi temperatūrai ir sukepimo intervalui, sunkina keraminių gaminių išdegimą.

Na_2O ir K_2O oksidai žemina molių lydymosi temperatūrą, gerina sukepimą. Lietuvos moliuose būna nuo 2 iki 5 %.

SO_3 oksido buvimas molyje rodo, kad tenai yra gipso ir geležies sulfidų. Gipsas išsiplauna į gaminių paviršių ir sudaro baltas dėmes, geležies sulfidai išpučia gaminius, dėl to pablogėja gaminių kokybė.

Kaitmenis sudaro organinės priemaišos, chemiškai į hidroaliumosilikatus ir kristalohidratus sujungtas vanduo ir dekarbonizacijos metu išsiskiriantis CO_2 . Džiovinant gaminius, organinės priemaišos padidina jų susitraukimą, skatina plyšių atsiradimą.

3.3. Granulimetrinė molio sudėtis

Molio granulimetrinė sudėtis rodo, kiek ir kokio stambumo dalelių yra molyje. Ją sudaro kelios frakcijos.

- Smėlingoji (dalelės didesnės kaip 0,05 mm). Smėlingąją frakciją sudaro kvarcinio smėlio dalelės.
- Dulkingoji (0,05–0,005 mm). Dulkingąją frakciją sudaro lauko špatai ir kitų priemaišų dalelės.
- Molingoji (dalelės mažesnės kaip 0,005 mm). Molingąją frakciją sudarantys molio mineralai yra svarbiausia molio granulimetrinės sudėties dalis. Ji suteikia moliui pagrindinę savybę – plastiškumą. Statybinės keramikos gamyboje naudojami moliai, kuriuose molingos frakcijos būna nuo 30 iki 70 %.

Granulimetrinė molio sudėtis nustatoma plaunant per sietus (stambesnių kaip 0,05 mm dalelių) ir sedimentacijos būdu (smulkesnių kaip 0,05 mm dalelių).

3.4. Molio plastiškumas

Plastiškumu vadinama molio savybė sudaryti su vandeniu plastišką tešlą, kuri veikiamą išorinių jėgų lengvai formuojama, o toms jėgoms nustojus veikti, išlaiko suteiktą formą. Plastiškumas priklauso nuo cheminės, mineraloginės, granulimetrinės molio sudėties, grūdelių formos bei organinių priemaišų kiekio. Pagal plastiškumą moliai skirstomi į:

- labai plastiškus (drėgmės kiekis, kurio reikia formavimo masei paruošti, – nuo 25 iki 30 %);
- vidutinio plastiškumo (drėgmės kiekis, kurio reikia formavimo masei paruošti, – nuo 20 iki 25 %);
- mažai plastiškus (drėgmės kiekis, kurio reikia formavimo masei paruošti, – nuo 15 iki 20 %).

Molio plastiškumas nustatomas Attebergo (3.4 pav. a) arba Vasiljevo (3.4 pav. b) prietaisu. Lietuvos molis priskiriamas prie labai ir vidutiniškai plastiškų molių.

a)

b)

3.4 pav. Prietaisai molio plastiškumui nustatyti: (a) Attebergo prietaisas;
(b) Vasiljevo prietaisas

3.5. Molio susitraukimas džiūstant ir degant

Molio susitraukimas džiūstant ir degant – tai suformuoto gaminio tūrio sumažėjimas. Molis, džiūdamas normaliomis sąlygomis, traukiasi, nes išgaruoja molio dalelių paviršiuje esantis vanduo. Susitraukimas džiūstant ypač priklauso nuo molio plastiškumo.

Degami keraminiai dirbiniai taip pat traukiasi. Susitraukimas degant priklauso nuo daugelio veiksnių: cheminės, mineraloginės, granulimetrinės sudėties, degimo režimo ir pan. Susitraukimas degant vyksta dėl keraminės šukės sukepimo. Susitraukimas džiūstant ($S_{dž}$) ir susitraukimas degant (S_{dg}) skaičiuojamas pagal formules:

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

$$S_{dg} = \frac{l_0 - l_2}{l_0} \cdot 100, \%, \quad (3.2)$$

čia l_0 – atstumas tarp įspaudų suformuotame bandinyje, mm;

l_1 – atstumas tarp įspaudų išdžiovintame bandinyje, mm;

l_2 – atstumas tarp įspaudų išdegtame bandinyje, mm.

3.6. Molio atsparumas ugniai

Molio atsparumas ugniai – tai molio savybė, parodanti, kokioje temperatūroje kaitinamas molis tiek suminkštėja, kad bandinys deformuojasi veikiamas savo svorio. Pagal atsparumą ugniai moliai skirstomi į tokias grupes:

- ugniai atsparūs moliai (> 1580 °C);
- sunkiai lydūs moliai (1350 – 1580 °C);
- lengvai lydūs moliai (< 1350 °C).

Lietuvoje randamas molis lydosi apytiksliai 1200 °C temperatūroje ir priskiriamas prie lengvai lydžių molų.

3.7. Lietuvos telkinių moliai

Mūsų šalyje labiausiai paplitęs hidrožerutinis lengvai lydus molis.

Lietuvoje visų geologinių sistemų sluoksniuose yra molio. Jo ypač daug kambro, silūro, devono, triaso, jūros, kvartero geologinių sistemų nuogulose. Randamo molio sluoksnių praktinė reikšmė dažniausiai priklauso nuo slūgsojimo gylio. Todėl mūsų respublikos pramonėje dažniausiai naudojamas kvartero paskutinio apledėjimo metu susiklostęs molis. Šios sistemos nuogulose esantis molis slūgso paviršiuje. Kvartero geologinės sistemos moliams priklauso telkiniai Žemaičių aukštumoje Platelių–Alsėdžių apylinkėse, Baltijos aukštumose ties Rubikių ežeru (į pietvakarius nuo Alytaus). Šios genezės molio telkiniai sudaro 6,5 % Lietuvos balansinių išteklių ir yra neperspektyvūs, kadangi juose esantys parengtiniai molio ištekliai sudaro tik 480 tūkst. m³.

Lietuvoje svarbiausi ir stambiausi telkiniai, susidarę po paskutinio apledėjimo, yra tarp Kauno (Šatijai, Lapės) ir Ariogalos (Molupiai). Smulkiadispersinių, molingųjų dalelių (mažesnių už 0,005 mm) šis molis turi tiek pat kiek ir priededyninės kilmės telkiniai. Jo plastiškumo skaičius yra gana didelis. Šie telkiniai sudaro 15,4 % kvartero molio išteklių, jie yra perspektyvūs, kadangi Vidurio Lietuvoje parengtiniai stambių telkinių ištekliai sudaro 34,6 mln. m³. Šiuose telkiniuose esančio molio kokybė gera: jis dispersiškas ir plastiškas, nors telkinių sandara sudėtinga, ir intensyviai telkinius naudoti sunku. Priededyninės kilmės molio telkiniai yra nesudėtingos sandaros, molio kokybė vienoda, naudingo klodo storis pastovus.

Lietuvos keramikos pramonei svarbiausi didžiųjų baseinų molynai, kur išžvalgyta apie pusę visų pramoninių išteklių. Didžiausi

šių nuosėdų plotai žinomi Jūros–Šešupės, Kauno–Kaišiadorių, Dysnos baseinuose. Juose išžvalgyti stambiausi respublikos molio telkiniai. Šių didelio ploto telkinių sluoksnis gana storas, o juose esanti žaliava itin dispersiška. Mūšos baseine rastų telkinių plotai nemaži, tačiau ištekliai nedideli, nes šiuose telkiniuose naudingasis klotas yra plonas. Be to, šiose lygumose susiformavę derlingiausi Lietuvos dirvožemiai.

Sališkos Žemaičių aukštumos pašlaitėse beveik visi molynai susiklostė Ventos ir jos intakų baseine. Šie telkiniai nedideli, ir perspektyvus tik Užvenčio baseinas. Nemažai limnoglacialinių baseinų susidarė po paskutinio apledėjimo Baltijos aukštumų pusėje: Dusios–Obelijos, Simno–Stakliškių, Vievio–Širvintų. Čia aptinkami molio telkiniai panašios kokybės, sandaros ir didumo, kaip ir Ventos baseine. Šio tipo telkiniai sudaro 12,3 % visų kvartero molio telkinių išteklių (10 mln. m³). Dabar eksploatuojama tik keletas kvartero molynų.

Tinkamas eksploatuoti triaso molis išplitęs Akmenės rajone. Molis vidutiniškai dispersiškas, geležingas, dolomitizuotas, beveik vienalytis. Dėl labai mažo šarminių metalų kiekio, tinkamų silikatinio (1,8–2,7) ir aliuminatinio (1,7–2,8) modulių šis molis yra puiki cemento pramonės žaliava. Dabar eksploatuojamas Šaltiškių telkinys, Alkiškių molio telkinys nuo 1975 m. užkonservuotas.

Devono molis slūgso Šventosios slėnyje, Ukmergės pakraštyje, Dukstynos krantuose. Vidutinio ar smulkaus molio frakcijų kiekis kinta nuo 10,8 iki 51 %, todėl molis dažniausiai liesas, pagal telkinio vidutinę granulimetrinę sudėtį priskiriamas aleuritui (dalelių >0,01 mm skaičius didesnis už 50 %). Kadangi naudingoji iškasena turi smulkaus smėlio ar aleurito frakcijų, palyginti nekarbonatinga, tai molyje yra labai daug SiO₂ ir nemažai šarminių metalų oksidų (2,7 %). Ukmergės telkinio molis, kuriame yra organinių medžiagų, pučiasi ir tinka keramzitui gaminti. Tačiau nūnai iš šios medžiagos gaminamos įvairios keraminės plytelės, kokliai, restauracijos dirbiniai. Per metus iškasama vos 15–17 tūkst. m³ žaliavos.

Kvartero geologinės sistemos koloidinės molio frakcijos ($<0,001$ mm) sudėtyje daug pirminės medžiagos. Tai matyti iš kaolinito, chlorito ir mišriai susisluoksniavusių molio mineralų kiekio kaitos. Rytinėje Lietuvos dalyje, Dukstynos baseino molyje, nuo devono uolienų kaolinito padaugėję 15–20 %, rečiau 25 %. Hidrožėrutis čia sudaro 75–80 % (3.5 pav.).

3.5 pav. Kvartero geologinės sistemos molio žaliavos mineraloginė sudėtis

Pietvakarių Lietuvoje kaolinito yra 5 % mažiau, ir tiek pat daugiau hidrožėručio. Labai pastovus chloritų (3–5 %) kiekis.

Žemaičių aukštumos šiaurinio pakraščio molyje kartais daugiau randama chlorito (10–15 %). Kaolinito čia būna 5–10, rečiau 15 %. Dėl to hidrožėručio sumažėja iki 65–75 % (3.6 pav.).

3.6 pav. Devono geologinės sistemos molio žaliavos mineraloginė sudėtis

Aleuritinėje frakcijoje ($>0,01$ mm) daugiausia yra karbonatų (kalcito ir dolomito). Jie vidutiniškai sudaro 41,5 %. Mažiau randama kvarco, žėručio, lauko špato. Smėlio frakcijoje vyrauja kvarcas, nedaug randama lauko špato, žėručio ir karbonatų. Taigi dispersiškesnis molis yra ne toks karbonatingas ir gali būti įvairiai naudojamas.

Triaso molio koloidinė frakcija sudaryta iš hidrožėručio (50–60 %), montmorilonito (3–40 %) ir chlorito (5–10 %). Tiek daug montmorilonito kitų geologinių sistemų molyje nėra (3.7 pav.).

Smulkaus smėlio frakcija sudaryta iš kvarco (90 %), feldšpato (3–4 %), karbonatų (1 %). Aleuritinėje frakcijoje kvarcas sudaro 60 %, karbonatai 25–30 %, lauko špatas – 7 %, žėrutis – 2,5 %.

3.7 pav. Triaso geologinės sistemos molio žaliavos mineraloginė sudėtis

Remiantis šiais kriterijais, mažo poringumo keramikos dirbinių gamybai geriausiai tiktų Ukmergės, Dysnos telkinių, o iš dalies ir Krūnų telkinio devono ir kvartero geologinių sistemų moliai. Pagal karbonatų kiekį jie yra karbonatiniai.

Lietuvos moliai paprastai yra per riebus, taip pat Rokų ir Ukmergės radimviečių, todėl, gaminant plytas, juos reikia liesinti, pridedant 20–25 % liesiklių. Ukmergės molis pasižymi gana dideliu ir nepastoviu dulkių ir smėlio dalelių kiekiu. Rokų molis plastiškesnis, molyje daugiau molingų dalelių negu Ukmergės molyje. Dulkinga frakcija mažina molio rišlumą, tuomet reikia aukštesnės degimo temperatūros, o gaminiai neretai būna nepakankami tvirti ir neatsparūs šalčiui. Todėl pasirinkus Ukmergės molį, reikia parinkti ir priedus, kurie padėtų pašalinti blogą dulkingos frakcijos poveikį galutinio produkto kokybei.

3.8. Neplastiškos žaliavos

3.8.1. Liesikliai

Keramikos gamyboje kaip liesinančios žaliavos dažniausiai naudojami: smėlis, dehidratuotas molis ir smulkintas gamybos niekalas (šamotas).

Liesikliai mažina molio susitraukimą džiūstant ir degant, formavimo struktūros defektus. Smėlis – gaminių susitraukimą(,) nes lydosi aukštesnėje, nei įprasta keraminių gaminių degimo temperatūra, todėl nereaguoja su lydalu, t.y. tarsi sudaro laikantįjį karkasą.

3.8.2. Fliusai

Kaip flisuojantys priedai dažniausiai keramikos gamyboje naudojamas dolomitas, talkas, feldšpatai, maltas stiklas, metalurgijos šlakai. Fliusai didina lydalo kiekį, dėl to sumažėja gaminių degimo temperatūra.

3.8.3. Plastikliai

Kaip plastifikuojantieji priedai paprastai naudojami smulkiadispersiniai ugniai atsparūs moliai, sunkiai lydūs moliai, bentonitiniai moliai, anglies gavybos atliekos, paviršiaus aktyvios medžiagos (pvz., natrio lignosulfonatas. Šio priedo dedama nuo 0,1 iki 1,0 %).

Plastikliai naudojami, norint pagerinti per mažo plastiškumo molio formavimosi savybes. Jie mažina jautrumą džiovinant, didina išdegtų gaminių stiprumą.

4. FORMAVIMO MIŠINIO SUDĖTIES POVEIKIS KERAMIKOS SAVYBĖMS

Žinoma, kad keraminių dirbinių kokybė priklauso nuo naudojamų žaliavų (ypač pagrindinės – molio) cheminės, mineraloginės sudėties, jų telkinių susidarymo sąlygų, antrinių žaliavų gavybos technologijos ir kt. Taip pat svarbios pagrindinės naudojamo molio savybės yra plastiškumas, dispersiškumas, džiovinimo jautrumas ir pan.

Dauguma Lietuvos ir užsienio mokslininkų, siekiančių patobulinti statybinės keramikos savybes ir jos gamybą, nagrinėja, kaip galutinės keraminės šukės savybės priklauso nuo formavimo mišinio komponentų pobūdžio ir kiekio.

Išdegantys priedai – durpės, medžio pjuvenos, hidrolizinis ligninas, polistireninis putplastis, antracitas ir popieriaus gamybos atliekos – lemia keraminės šukės tankio, poringumo ir gniuždymo stiprio reikšmes. Į keraminių gaminių formavimo mišinį šių priedų dedama, kad sumažėtų gaminių svoris ir šilumos laidumo koeficientas, būtų išlaikytas reikiamas stiprumas.

4.1 pav. Popieriaus atliekos

4.2 pav. Antracitas

Medžio pjuvenos ir durpės armuoja molio masę, gerina formavimosi savybes, mažina plyšių atsiradimo tikimybę džiovinant. Bet kartu sumažina ir gaminių stiprį bei padidina vandens įmirkį. Durpės – tai organinės kilmės degioji uoliena, susikaupusi iš pelkių augalijos, kuri drėgmės pertekusiose vietose dėl deguonies trūkumo ir mikroorganizmų poveikio iš dalies sutrūnija, virsta humusu. Antracitio taip pat buvo dedama, kad sumažėtų jautrumas džiovinant ir padidėtų keraminių bandinių stiprumas. Ypač svarbus išdegančių priedų smulkinimas, jų dozavimo tikslumas, masės perdirbimo kokybė.

Naudojant didesnę kiekį išdegančių priedų, dažnai susiduriama su nuodingųjų dujų išsiskyrimu, dėl kurio padidėja gaminio savikaina, nes reikia surinkti ir utilizuoti išsiskyrusias dujas. Tose vietose, kur susikaupia daugiau priedų, arba ten, kur priedai buvo stambesni, gali

sumažėti nedidelio tūrio akučių. Taip galima pakenkti pagrindiniam tikslui – gerinti termoizoliacines keraminės šukės savybes.

Mokslininkai Antanas ir Rimvydas Kaminskai yra nustatę, kad, kaip išdegantį priedą naudojant naftos koksą, akytosios šukės makrostruktūrą apibūdinančių savybių (tankio, vandens įmirkio) parametrai yra geresni, nei naudojant pjuvenas. Tačiau tokie rezultatai gaunami tada, kai naftos koksas prieš naudojimą modifikuojamas, emuliuojant su mazuto, vandens ir aktyviųjų paviršiaus medžiagų priedais, ir kai prieš dozuojant ir maišant blokų formavimo masę, dispersija maišoma su pjuvenomis ir smėlio priedais iki žemės konsistencijos. Taip paruošta formavimo masė yra homogeniška, o išdegtos akytosios keraminės šukės makrostruktūra geriausia. Kai naudojamas nemodifikuotas naftos koksas, makrostruktūros defektingumą nusako didelis tankis ir mažas gniuždymo stipris.

4.3 pav. Naftos koksas

Šiuo metu Lietuvoje dar nėra parengtos naftos kokso paruošimo pramoninės technologijos, ir kaip išdegantys priedai naudojamos tik medžio pjuvenos. Tyrimų rezultatai parodė, kad sienų keraminėms

plytoms ir blokams (išskyrus apdailos dirbinius) medžio pjūvenų į formavimo masę galima dėti iki 8 % pagal tūrį.

Degant keraminius gaminius, kurių formavimo mišinyje buvo išdegančių priedų, degimo metu vyksta sudėtingi redukciniai bei oksidaciniai procesai. Organinių interpų išdegimą sudaro 3 etapai:

- lakiųjų organinių kuro dalelių pašalinimas;
- kuro dalies sąveika su molyje esančiais geležies junginiais ir vandens garais;
- koksinės anglies sudegimas.

Mokslininkai įrodė, kad optimaliausias išdegančių priedų kiekis formavimo masėje yra 15 %; viršijus šį priedų kiekį, tankio mažėjimas lėtėja, mažėja gniuždymo stiprio reikšmės, didėja vandens įmirkis.

Buvo atlikti tyrimai, kaip išdegantį priedą naudojant 5 mm dydžio kukurūzų miltų granules, ir nustatyta, kad galima gauti poringus, labai mažo šilumos laidumo (šilumos laidumo koeficientas 0,12 W/mK) gaminius.

Akutes keraminėje šukėje galima gauti, išgarinant didelį kiekį vandens. Tačiau įmonėse statybinės keramikos dirbiniai gaminami ekstruziniu būdu, kur vandens kiekį (20–30 % nuo masės) riboja formavimui reikalingas plastiškumas.

Mokslininkai nagrinėjo, ar galima į keramikos formavimo mišinį dėti paviršių aktyvinančių medžiagų ir taip gauti poringąją keramiką. Jie nustatė, kad, naudojant paviršių aktyvinančias medžiagas ir išdegančius priedus, galima gauti labai mažo tankio (iki 300 kg/m³) keramikos dirbinius, kurie pasižymėtų itin mažu šilumos laidumu.

Įrodyta, kad 1,42 % anglies priedo (iki 1,5 mm dydžio) formavimo mišinyje padidina poringos erdvės rezervo rodiklį iki 22 %, gaminių eksploatacinį atsparumą šalčiui – iki 42 ciklų, tačiau gniuždymo stipris sumažėja apie 33 %. Sausų durpių 4 ir 1,5 % anglies formavimo mišinyje padidina poringos erdvės rezervo

rodiklį iki 37 %, o gaminių eksploatacinį atsparumą šalčiui – iki 60 ciklų, tačiau gniuždymo stipris taip pat sumažėja. Daugiau kaip 5 % medžio pjuvenų formavimo mišinyje padidina poringos erdvės rezervo reikšmės iki 30 %, tačiau labai sumažina gaminių stiprį. Sumažinus pjuvenų kiekį iki 4 % ir pridėjus 1 % anglies, poringos erdvės rezervo ir mechaninio stiprumo reikšmės padidėja, tačiau eksploatacinis atsparumas šalčiui yra tik 48 ciklai. Medžio dulkių (3–4 %) ir anglies (1–1,5 %) priedai sudaro mažiau rezervinių porų nei toks pat pjuvenų ir durpių kiekis, gaminių mechaninis stipris nepadidėja, be to, formavimo mišinio su medžio dulkėmis paruošimas kur kas sudėtingesnis, todėl minėto priedo naudoti nereikėtų.

Keraminės šukės tankiui, stipriui, vandens įmirkiui ir kitoms savybėms didelį poveikį turi flisuojantys priedai: stiklas, mikrosilika, glaukonitas, granitas, metalurgijos šlakai, lauko špatai, kreida ir kt. Nustatyta, kad žemiausioje temperatūroje sukepimo procesas prasideda, kai naudojamas stiklas. Malto stiklo į formavimo masę dedama tam, kad susidarytų lydalas, esant žemesnei temperatūrai, ir pagerėtų gaminių stipris, atsparumas šalčiui ir kiti rodikliai. Stiklo laužas yra inertinė atlieka, kuri surenkama, rūšiuojama, pervežama, saugoma, taip pat plačiai perdirbama ir naudojama pramonėje. Malto stiklo priedas, naudojamas, gaminant keramiką, taip pat sumažina molio plastiškumą, molio formavimo drėgnį, molio džiovavimo jautrumą, susitraukimą džiovinant.

Didelę įtaką skystos fazės kiekio susidarymui turi malto stiklo smulkumas. Didėjant stiklo smulkumui, žemėja skystos fazės atsiradimo temperatūra. Tai rodo, kad dėl padidėjusio reakcijos zonos paviršiaus ploto besilydantis stiklas intensyviau reaguoja su moliu, ir maksimalus stiklo fazės reagavimo laipsnis gali lemti karščiui atsparių naujųjų susidarymą, ilginti sukepimo intervalą bei stabilizuoti sukepančią struktūrą. Maltas stiklas turi įtakos keraminės šukės sukepimui, jei jo į formavimo mišinį dedama 10 %. Didinant

malto stiklo priedo kiekį formavimo mišinyje, mažėja molio plastiškumo skaičius, formavimo drėgmė, molio jautrumas džiovinant, molio susitraukimas džiustant. Bandinių su malto stiklo priedu tankis yra didesnis (apie 2000 kg/m^3), o gniuždymo stipris padidėja daugiau kaip du kartus (daugiau kaip 40 MPa), vandens įmirkis sumažėja iki 6 % ir mažiau. Malto stiklas tolygiai pasiskirsto keraminėje šukėje, todėl labai efektyviai mažina bendrąją atvirą poringumą.

4.4 pav. Stiklo mikrostruktūros vaizdas

Malto stiklo dalelės yra labai smulkios ir netaisyklingos formos, dėl to gerai sukimba su kitais formavimo mišinio komponentais: smėliu, šamotu ir pjuvenomis.

Granito priedo kiekis formavimo masėje (10–12 %) labai mažai padidina stiprį, o keraminės šukės vandens įmirkis gaunamas netgi didesnis nei gryno molio.

Mažiausias, iki 1,1 %, keramikos vandens įmirkis gaunamas, kaip priedą naudojant 10–20 % mikrosiliką. Tačiau bandiniai, kuriuose šio priedo yra 10–20 %, deformuojasi.

Glaukonito priedas, kai jo formavimo mišinyje yra 15–20 %, sumažina keraminės šukės vandens įmirkį ir gali būti taikomas kaip priedas sukepusios keramikos gamyboje. Mokslininkai nustatė, kad, didinant glaukonitų kiekį mišinyje nuo 10 iki 30 %, bandinių spalva intensyvėja, tamsėja; lenkiamasis stipris padidėja nuo 30 iki 41 %, tankis padidėja nežymiai. Išdegus bandinius su glaukonito priedu 1050 °C temperatūroje jų įmirkis gaunamas apie 6 %.

Nefelino sienito 15 % arba volastonito 15 % priedas 1060–1150 °C temperatūroje lengvai lydžių molių formavimo masėje leidžia gauti sukepusią keraminę šukę, kurios įmirkis ≤ 2 %.

Flusuojantieji priedai (lauko špatas, perlitas 4.5 pav.) retai sutinkami gryni. Uolienose jie užteršti dažančiais oksidais. Plonasienių dirbinių gamyboje naudojami lauko špatai, kurie savo sudėtyje turi ne daugiau kaip 0,3 % dažančiųjų oksidų, šarmų ne mažiau nei 12 %.

4.5 pav. Perlitas

Plačiau naudojami pegmatitai – kalio lauko špatų uolienos, turinčios kvarco intarpus. Žemiausią sukepimo temperatūrą (apie 1200 °C) turi kalio lauko špatai.

Nustatyta, kad 7–16 % flusuojančių priedų (lauko špatų, perlito) formavimo mišinyje nepagerino keraminės šukės fizikinių-mechaninių bei struktūrinių savybių. Didesnis šių priedų kiekis padidina keraminės šukės bendrąjį susitraukimą, lenkiamąjį stiprį ir sumažina vandens įmirkį. Yra atlikta mokslinių darbų su skirtingais lauko špato priedais ir nustatyta, kad optimalus šio priedo kiekis yra 3–5 % sausosios medžiagų masės. Tokiu atveju lauko špato priedas sumažina keraminės šukės vandens įmirkį, atvirą poringumą, padidina tankį ir stiprį lenkiant. Jeigu dedant 3 % lauko špato priedo bandinių, degimo temperatūra pakeliama 50 °C, tai gaunamas panašus efektas – vandens įmirkis sumažėja 2,5 %, atviras poringumas 5 %, padidėja tankis, lenkimo stipris. Didesnis nei 8 % lauko špato priedas, net ir pakėlus degimo temperatūrą, keraminės šukės savybes veikia tik neigiamai.

Tačiau buvo atlikta ir tokių tyrimų, kurie parodė, kad, padidinę lauko špatų kiekį formavimo mišinyje iki 65 %, gautume keraminės šukės vandens įmirkį, artimą nuliui, o padidinę kvarco kiekį mišinyje iki 65 %, labai sumažintume degamąjį bandinių susitraukimą (nuo 11,35 iki 3,32 %).

Smulkiadispersinis dolomito priedas didina gaminių eksploatacinį atsparumą šalčiui, tačiau stambesnis dolomitas blogina daugumą galutinių keramikos savybių. Kreida didina keraminės šukės mechaninį stiprumą, tačiau eksploatacinis atsparumas šalčiui gaunamas iki 49 šaldymo ir atšildymo ciklų.

Flusuojantieji priedai gali būti naudojami ir maišant juos įvairiomis dalimis. Formavimo masėse, kuriose buvo panaudoti keli flusuojantieji priedai, sukepimo procesas vyksta intensyviau.

Vertingi tyrimų rezultatai gauti tiriant, kaip aliuminatinių dirbinių poringumą veikia albumino ir krakmolo kiekiai formavimo

mišinyje. Į formavimo mišinį įdėjus albumino, bandiniuose susidaro daugiau uždarytų ir daug mažiau atvirų porų. Krakmolas padidina susisiekančių porų skaičių.

Čekijos mokslininkai nustatė, kad aguonų grūdėliai keramikoje sudaro daugiau uždaresnių porų, o tokių bandinių tankis gautas apie 2500 kg/m^3 , išdegant mišinį 1570°C temperatūroje.

Liesinantiems priedams priklauso neplastinės medžiagos: smėlis, šamotas ir kt. Liesinantys priedai mažina susitraukimą (gaminiamis džiūstant nesusidaro defektų), tačiau sumažina ir masės plastiškumą.

4.6 pav. Keraminio pusgaminio irimas džiovinant

Žinoma, kad keraminių gaminių kokybė priklauso nuo liesinančio priedo kiekio ir jo granulometrinės sudėties.

Mokslininkai nustatė, kaip galutinės keraminio dirbinio savybės priklauso nuo smėlio smulkumo ir jo kiekio mišinyje. Nustatyta, kad optimalus liesiklio dalelių dydis yra $(0,14\text{--}0,63) \text{ mm}$ ribose, didesnės dalelės mažina gaminių stiprį, mažesnės – molio rišlumą ir plastiškumą. Tokia formavimo mišinio sudėtis leidžia gauti

maksimaliai eksploatuojant atsparią šalčiui keramiką: molio mineralų (21–34 %), kvarco (0,005–0,05 mm smulkumo; 48–67 %), kvarcinio smėlio (0,05–1,25 mm smulkumo; 10–23 %). Kvarcinis smėlis, kurio dalelių stambumas 0,14–0,315 mm, yra mažai efektyvus, o < 0,14 mm neefektyvus, naudojant jį kaip priedą džiovinimo savybėms pagerinti. Toks smulkiadispersinis, turintis daug dulkingos frakcijos tiesiklis nesudaro stambių porų, sumažina molio plastiškumą ir rišlumą. Stambios liesiklio dalelės, didesnės nei 0,63 mm, pablogina ne tik gaminio paviršiaus kokybę, bet ir keraminės šukės stiprumo savybes.

Liesiklio kiekio, kartu ir SiO_2 , sumažinimas formavimo masėje, termiškai apdorojant, sukelia gaminių pūtimąsi (4.7 pav.).

4.7 pav. Gaminių pūtimasis termiškai apdorojus

Yra nagrinėta, kaip nuo mišinio cheminės sudėties (silicio, aliuminio, kalio, natrio, kalcio, magnio ir kitų oksidų kiekio formavimo masėje) priklauso galutinės fizikinės-mechaninės ir struktūrinės keramikos savybės. Nustatyta, kad aliuminio oksido kiekis didina keraminės šukės atsparumą ugniai, o kalcio oksidas

mažina gaminio stiprį. Dideli minėtų (Al_2O_3 ir CaO) oksidų kiekiai labiausiai lemia galutinę keraminio dirbinio kokybę. Susidarę naujų (kalcio hidroksido ir kalcio karbonato) kiekiai iki 1 %, degant pusgaminius ($920\text{--}940$) $^{\circ}\text{C}$ temperatūroje, sumažina galutinių keramikos dirbinių gniuždomąjį stiprį (50–60 %) ir iki 30 % padidina poringumą.

Keli mokslininkai nagrinėjo, kaip keičiasi keramikos savybės nuo cheminės ir mineraloginės sudėties. Buvo nustatyta, kad kuo didesnis keraminėje šukėje bus SiO_2 kiekis, tuo gausime mažesnį gaminių stiprį ir atsparumą šalčiui. Cheminės sudėties požiūriu svarbus ir šarminių metalų buvimas aliumosilikatuose, nes kai jų daug, skatinamas žematemperatūrinis keramikos sukepimas, taip pat naudingi smulkiadispersiniai kalcio ir magnio karbonatai, dėl kurių greičiau susidaro termodinamiškai stabilūs mineralai anortitas ir diopsidas. Kuo daugiau keraminėje šukėje susidarys anortito, mulito ir kristabolito, tuo gaminy bus stipresnis ir atsparesnis šalčiui.

Nagrinėjant išdegtų gaminių ir žaliavų elementinę sudėtį, randama anglies (C), natrio (Na), magnio (Mg), silicio (Si), kalio (K), kalcio (Ca), titano (Ti), geležies (Fe) ir deguonies (O). Be minėtų elementų gali būti ir nedideli kiekiai kitokių. Pagrindiniai elementai sudaro oksidus (SiO_2 , FeO , Fe_2O_3 , Al_2O_3 , CaO , MgO , TiO_2 , Na_2O , K_2O), kurie nustatomi žaliavose ar/ir keraminio gaminio šukėje.

Vieno iš elementų – anglies gali būti tiek organinių, tiek ir neorganinių junginių sudėtyje. Organiniai junginiai, kuriuose yra anglies, gali būti molis, pjuvenos, durpės ir pan. Neorganiniuose junginiuose anglis yra karbonatų pavidalo, jų gali būti molyje, stikle.

Atlikus keraminių bandinių elementinės sudėties tyrimus ir cheminės oksidų sudėties skaičiavimą bei mechaninių ir fizikinių savybių tyrimus, buvo nustatytos tokios tendencijos: didėjant anglies bei deguonies kiekiui keraminiame gaminyje, didėja keraminių gaminių tankis ir gniuždymo stipris, o didėjant silicio ir aliuminio kiekiui, tankis bei gniuždymo stipris mažėja.

5. ANTRINIŲ ŽALIAVŲ NAUDOJIMAS EFEKTYVIAI STATYBINEI KERAMIKAI

Šiuolaikinėje statybinių medžiagų gamyboje vis dažniau naudojamos įvairios technogeninės atliekos. Taip sprendžiamos ekologinės problemos, įmonės sutaupo lėšų atliekoms išvežti ir saugoti, be to, dažnai netgi pagerinamos keraminių dirbinių savybės. Moksliniais tyrimais įrodyta, kad daugelis atliekų gali būti sėkmingai naudojamos statybinių medžiagų gamyboje, gerindamos jų savybes ir didindamos ilgaamžiškumą.

Mokslininkai ištyrė lengvalydzio ilitinio molio ir plaušinių mineralinės vatos atliekų modelinę sistemą ir nustatė, kad mineralinės vatos atliekos gali būti naudojamos sukepusios keramikos dirbinių gamyboje. Pakeitus formavimo mišinyje 20 % smėlio į mineralinės vatos atliekas ir mišinyje palikus 80 % lengvai lydaus ilitinio molio bei suformuotus bandinius išdegus 1040 °C temperatūroje, gaunama sukepusi keramika, kurios vandens įmirkis 2,02 %, o tankis 2169 kg/m³.

Nustatyta, kad bandiniuose su degtos mulitinės vatos atliekomis pramoninių šiluminių įrenginių termoizoliacinės medžiagos atlieka (5.1 pav.) susidaro iki 50 % mažesnio diametro poros ir kapiliarai. Vandens įmirkis, nustatytas, dėjus į formavimo mišinį iki 10 % mulitinės vatos atliekų, praktiškai nekinta. Visų nagrinėjamų formavimo masių vandens įmirkis, nustatytas po 72 valandų, gautas mažesnis nei 4%, vadinasi, naudojant tokią mulitinės vatos atlieką formavimo mišinyje iki 15 %, galima gaminti sukepusią keramiką. Mulitinės vatos atliekos mažina keraminės šukės tankį, struktūros nevienalytiškumą ir kapiliarinį masės srauto greitį ir ženkliai padidina gniuždomąjį stiprį. Nustatyta, kad, į formavimo mišinį įdėjus 15 % minėtos atliekos, poringos erdvės rezervas mažėja.

Atlikus tyrimus, nustatyta, kad mulitinės vatos atliekos gali būti sėkmingai naudojamos sukepusių keraminių dirbinių gamybai.

Vertinant pagal atsparumą šalčiui ir gniuždomąjį stiprį, optimaliausias šios atliekos kiekis mišinyje yra 10 %.

5.1 pav. Mulitinės vatos mikrostruktūros vaizdas

Dažnai moksliniuose tyrimuose naudojama malto stiklo atlieka. Mokslininkai ištyrė įvairių atliekinių stiklų poveikį keramikos savybėms ir nustatė, kad, naudojant šias atliekas, keramikos sukepimo temperatūra buvo sumažinta nuo 1100 iki 950 °C. Buvo naudotos ir spalvoto stiklo poliravimo atliekos, kurio pagrindinė sudedamoji dalis – silicio karbidas. Šios atliekos buvo dėta 5, 10 ir 15 %. Nustatyta, kad, naudojant tokius kiekius, galima gaminti ir mažo tankio bei ypač didelio poringumo keramiką. Mokslininkai tyrė kelių rūšių stiklo, kalkių ir rūdų kasybos nuosėdų poveikį keramikos savybėms. Nustatyta, kad, naudojant tokias atliekas ir degant bandinius pakankamai žemoje temperatūroje 880–930 °C, išlaikymas 1–3 val., galima gauti keraminius dirbinius, kurių gniuždymo stipris siekia 100 MPa, o tankis 2600 kg/m³.

Buvo ištirtas kai kurių atliekų naudojimo efektyvumas statybinių medžiagų gamybai (aliuminio turinčios anodavimo nuosėdos, geriamojo vandens filtravimo nuosėdos, nuosėd(o)s, susidarančios marmuro pjovimo ir smėlio liejimo procesų metu). Atlikus cheminės, mineraloginės sudėties, DTA tyrimus, buvo nustatyta, kad tokias atliekas galima naudoti ugniai atsparių ir cementinių medžiagų gamyboje.

M. Dondi ir kiti nustatė, kad titano turinčių atliekų, pvz., susidarančių netirpių liekanų, tirpinant titano šlako rūgštį (tionitas), perdirbimas plytų gamyboje yra technologiškai įmanomas, tik truputį pakeitus plytų gamybos technologiją. Papildžius sausą formavimo mišinį 3 % minėtos atliekos, galima pagerinti gaminamų keraminių plytų savybes. Didesnis kaip 5 % tionito kiekis formavimo mišinyje ženkliai padidina keraminės šukės vandens įmirkį, sumažina tankį, o kartu ir gniuždomąjį stiprį.

Ekperimentai su boratais parodė, kad, dedant į formavimo mišinį 3 % atliekos ir degant bandinius 1000 °C temperatūroje, vandens įmirkis padidėjo nuo 16,1 iki 18,0 %, o lenkimo stipris – nuo 27,6 iki 40,8 MPa.

Dažnai tyrėjų naudojama atlieka yra lakieji pelenai. Buvo ištirtos keraminės šukės savybės, papildžius formavimo mišinį skirtingais kiekiais lakiųjų pelenų atliekos ir išdegus bandinius skirtingoje temperatūroje (nuo 800 iki 1000 °C). Nustatyta, kad optimalus šios atliekos kiekis yra 10 %, kitaip plytos gaunamos netolygios spalvos. Lakiųjų pelenų atlieka mažina bandinių tankį, o kartu ir ultragarso sklaidimo greitį. Be to, plytos su minėta atlieka, palyginti su tradicinės sudėties plytomis, mažiau yra. Įdėjus į formavimo mišinį 20, 40, 60 ir 80 % minėtos atliekos, buvo nustatyta, kad ji mažina keraminių plytelių lenkiamąjį stiprį ir didina vandens įgeriamumą, tačiau gautos plytelės tenkina B III pagal ISO 13006 (1998) reikalavimus. Mokslininkai, naudodami lakiųjų pelenų, stiklo atliekas ir smulkiadispersinį silicio dioksida, gavo bandinius, kurių stipris siekia 300 MPa, tankis 2900 kg/m³, o vandens įmirkis mažesnis kaip

6 %. Buvo nustatyta, kad, naudojant lakiųjų pelenų priedą, medžiagos kristalinė struktūra susidaro daug žemesnėje temperatūroje. Teigiama, kad, įdėjus į formavimo mišinį 10 % akmens anglių pelenų iš šiluminės elektrinės, gaunama keramika yra nekenksminga, pasižymi aukštu cheminiu atsparumu ir geromis mechaninėmis savybėmis. Galima gaminti stiklo keramiką ir kitas keramines medžiagas su lakiaisiais pelenais be kitų priedų, ir tos medžiagos pasižymi analogiškomis, o kartais ir geresnėmis savybėmis, todėl šios atliekos patrauklios keraminių plytelių ir kitų dirbinių gamyboje.

Šamotinių dirbinių atliekinis priedas (10, 20 ir 30 % pagal masę) pradinėje formavimo mišinio sudėtyje (kuri susidaro iš lakiųjų pelenų, durpių ir molio) nulemia didesnę keraminių dirbinių gniuždymo stiprį, kuris siekia 72 MPa. Taip pat šamoto priedas, kai jo formavimo mišinyje buvo 20 %, praplėtė sukepimo intervalą nuo 20 °C, palyginti su kontroliniais bandiniais iki 40 °C.

Naftos pramonės įmonėse paprastai gausiai susidaro įvairių panaudotų katalizatorių (5.2 pav.) – jie gali būti malami ir naudojami statybinių dirbinių gamyboje. Naftos pramonės atliekos priskiriamos prie galimų betono priedų, nes susideda iš silicio dioksido ir aliuminio oksido ir veikia kaip pucolanai. Dėl ypatingos cheminės sudėties ir tinkamų charakteristikų katalizatoriaus atlieka gali būti naudojama ugniai atsparių ir keraminių dirbinių gamyboje. Nustatyta, kad naftos pramonės žaliavoje esantys sunkiųjų metalų jonai (Fe, Zn, Ni), išdegant formavimo mases skirtingose degimo temperatūrose, iš keraminės šukės neišsiplauna, arba išsiplaunantys medžiagų kiekiai neviršija leistinų. Pridedant į formavimo mišinį 7–10 % nagrinėjamos technogeninės žaliavos ir išdegant pusfabrikatį aukščiausioje 1150 °C temperatūroje, kai išlaikymas joje trunka 4 val., gauname keraminę šukę, kurios tankis 2090–2150 kg/m³, gniuždymo stipris 16–17 MPa, efektyvusis poringumas 8–10 %, o atsparumas šalčiui vienpusio šaldymo ir atšildymo būdu gautas didesnis kaip 100 ciklų.

5.2 pav. Katalizatoriaus mikrostruktūros vaizdas

Dedant į formavimo mišinį 5–10 % naudotų padangų gumos (5.3 pav.), degant pusgaminius aukščiausioje 1000 °C temperatūroje, kai degimo trukmė joje 1 val., gautos keraminių šukių charakteristikos yra tokios: bendras susitraukimas 10–16 %, šukės tankis 1551–1729 kg/m³, gniuždymo stipris 6–10 MPa, atsparumas šalčiui vienpusio šaldymo ir atšildymo būdu 33–52 ciklų. Nustatyta, kad formavimo masių su gumos atliekiniu priedu degimo metu didžiausias anglies monoksido kiekis į aplinką išsiskiria keraminių masių šildymo etape (maždaug 400 °C temperatūroje) ir siekia 0,469 % tūrio. CO emisija į aplinką neviršija leistinos ribinės vertės.

5.3 pav. Padangų sąvarta

5.4 pav. Panaudotų padangų tekstilinio kordo mikrostruktūros vaizdas

Brazilijos mokslininkai atliko tyrimus, ar galima būtų panaudoti kiaušinio lukštų atliekas gaminant keramiką. Buvo sudaryti keturi formavimo mišiniai, kuriuose kiaušinių lukštų kiekis kito kas 5 %, pradedant 0 ir baigiant 15. Nustatyta, kad kiaušinių lukštus galima naudoti keramikos gamyboje, ir optimaliausias jų kiekis 5–10%, degant pusgaminius 1150 °C temperatūroje. Tokios keramikos tankis apytiksliai 1700 kg/m³, vandens įmirkis apie 22 %, o lenkimo stipris siekia apie 16 MPa.

6. EFEKTYVIOS KERAMIKOS PUSGAMINIŲ RUOŠIMAS

6.1. Formavimo masių ruošimas

Keraminiai dirbiniai gamybos įmonėse formuojami iš įvairių formavimo masių, kurios skirstomos į tris grupes:

- sausus ir pussausius miltelius (drėgmė nuo 4 iki 12 %);
- plastiškas (drėgmė nuo 15 iki 30 %);
- šlikerius (drėgmė nuo 35 iki 55 %).

Šlikeris – tai molio suspensijos vandenyje. Šlikeriai dažniausiai ruošiami dviem būdais:

- malant molį su priedais arba be jų rutuliniais (6.1, 6.2 pav.) ar vibraciniais (6.3 pav.) malūnais;
- molį dumblinant dumblintuvuose ar propeleriniuose maišytuvuose ir maišant su priedais.

Technologiniu požiūriu geresnis pirmasis būdas. Naudojant vibracinius malūnus, šlikeris sumalamas iki analogiško smulkumo net iki 20 kartų greičiau, negu naudojant rutulinius malūnus, dėl to žymiai sumažėja energijos sąnaudos. Keičiant malimo trukmę, gaunami norimo dispersiškumo šlikeriai. Tačiau vibracinius malūnus sunkiau eksploatuoti, be to, pramonė negamina didelio našumo vibracinių malūnų. Tokiu būdu šlikeris dažniausiai ruošiamas gaminant dailiosios keramikos gaminius.

Ruošiant šlikerį antruoju būdu, molis dumblinamas, o priedai malami rutuliniais malūnais. Tai leidžia sumažinti energijos sąnaudas, tačiau tokiu būdu ruošiant formavimo mases, gerai nesumalamas molyje esantis smėlis, dėl to gali pablogėti keraminių gaminių kokybė. Gaminant statybinės keramikos gaminius, dažniausiai naudojamas šis būdas.

Technologinio proceso metu ruošiant šlikerį, reikiamo vandens kiekį galima sumažinti įdėjus elektrolitų. Dažniausiai tai būna

įvairios natrio druskos (silikatai, karbonatai, fosfatai). Į šlikerį įdėjus elektrolitų, molio dalelės atsiskiria vienos nuo kitų, vyksta deflokuliacija. Deflokuliacija priklauso nuo molio dalelių tarpusavio traukos ir atostūmio jėgų. Elektrolitų kiekis kiekvienam šlikeriui turi būti optimalus, nes jį padidinus vėl padidėja sistemos klampa. Į šlikerį dedamų elektrolitų kiekis dažniausiai svyruoja nuo 0,4 iki 0,75 %, skaičiuojant nuo sausų medžiagų masės.

Tinkamai paruoštas šlikeris turi būti mažai klampus ir takus, lėtai nusėsti veikiamas sunkio jėgų, jame neturi būti putų, dujų burbuliukų.

6 a)

6.1 pav. Rutulinis malūnas: (a) bendras vaizdas; (b) veikimo principas

6.2 pav. Rutulinis malūnas: 1 – būgnas; 2 – apsauginis sluoksnis; 3 – garso ir šilumos izoliācijas sluoksnis; 4 – apsauginis sluoksnis; 5 – pakrovimo anga; 6 – iškrovimo anga; 7 – laikiklis; 8 – malimo kūnai

6.3 pav. Vibracinis malūnas: 1 – variklis; 2 – mova; 3 – velenas;
4 – būgnas; 5 – spyruoklės

Ruošiant plastišką formavimo masę, reikia iš molio pašalinti stambius intarpus, molyje tolygiai paskirstyti priedus ir vandenį bei pasiekti, kad masė būtų gerai formuojama.

Molio apdorojimas gali būti natūralus, mechaninis arba fizikinis-cheminis. Kaip natūralus apdorojimo būdas naudojamas molio įšaldymas arba pūdymas.

Įšaldymo metodus technologiškai yra pats efektyviausias. Supurentas ir sudrėkintas molis maždaug metus laikomas ore, per tą laiką smulkiausiame molio kapiliaruose vanduo daug kartų užšąla ir atšyla. Užšalusio vandens tūris padidėja, taip suardomi ryšiai tarp molio grūdelių, ir jie savaime susmulkėja iki elementarių dalelių. Dėl to padidėja molio savitasis paviršius, sujungtos drėgmės kiekis, pagerėja formavimosi ir džiūvimo savybės.

Pūdymas – tai sudrėkinto molio išsigulėjimas. Šiuo apdorojimo būdu molis brinksta, dalis vandens pereina iš laisvos drėgmės į surištą, molio mineralų grūdeliai ir vandens molekulės persiorientuoja, dėl to pagerėja masės sukibimas. Molio pūdymas dažniausiai vyksta uždaruose sandėliuose 5–7 paras.

Mechaninį molio apdorojimą galima suskirstyti į šias stadijas:
molio pirminis trūpinimas ir dozavimas → akmenų atrinkimas → rupusis smulkinimas → smulkusis malimas → maišymas

Gamyklos žaliavas dažniausiai gauna nesmulkintas. Jos smulkinamos įvairiais įrenginiais, atsižvelgiant į medžiagos fizines savybes (kietumą, drėgnį, reikiamą smulkumo laipsnį). Molio stambių gabalų pirminiam trupinimui naudojami molio purentuvai, akmenų atrinkimui – valcai, rupiajam ir smulkiajam malimui – lygūs diferenciniai, skylėtieji valcai, statgirnės ir molio trintuvai. Molio galutinis drėkinimas ir maišymas su priedais vyksta nuolatinio veikimo dviveleniuose arba vienveleniuose maišytuvuose.

Fizikinis-cheminis formavimo masės apdorojimas pakeičia molio masės fazių (kietos, skystos, dujinės) santykį, pasikeičia ir jų sąveikos sąlygos. Pagrindiniai fizikiniai-cheminiai formavimo masės apdorojimo metodai yra šie:

- drėkinimas;
- šildymas;
- vakuumavimas;
- cheminių priedų įmaišymas.

6.2. Formavimo masių granuliometrija

Formavimo masės pagal smulkumo laipsnį skirstomos į dvi grupes:

- stambiagrūdės (didžioji dalis dalelių ar netgi visos didesnės kaip 0,5–1,0 mm);
- smulkiagrūdės (didžioji dalis dalelių ar netgi visos mažesnės kaip 0,05–0,1 mm).

Stambiagrūdės masės naudojamos ugniai atsparioms medžiagoms, statybinės keramikos dirbiniais gaminti. Tokios masės degant mažai sutankėja, dėl to mažai traukiasi, poringumas būna ne mažesnis kaip 10–15 %, vyrauja atviros poros.

Jei formavimo masė sudaryta iš plastiško komponento ir stambiagrūdžių miltelių, tai plastiškas komponentas pasiskirsto tarp stambiagrūdžių grūdelių, tokiu atveju nesunkiai pasiekiamas

reikiamas pusgaminių tankis. Formuojant pusgaminius vien iš stambiagrūdžių masių, atsižvelgiama į grūdelių matmenų įtaką gamybos procesui, išdegtų gaminių tekstūrą ir malimo įrenginio galimybes. Taip pat reikia žinoti, kad nuo grūdelių matmenų santykio priklauso visos sistemos tankis.

Yra keli pagrindiniai grūdelių parinkimo principai:

- tolydinė granulometrija (į formavimo masę įeina visų frakcijų grūdeliai);
- netolydinė granulometrija (parenkami tik kelių frakcijų grūdeliai, kitos frakcijos atmetamos. Tokiu atveju stambioji frakcija sudaro karkasą, kurio tuštumas užpildo smulkioji frakcija).

Naudojant tolydinę granulometriją, gaminių poringumas siekia 25–30 %. Norint gauti didesnio tankio pusgaminius, kur kas efektyvesnė netolydinė granulometrija. Jai keliami tokie reikalavimai:

- kiekvienas smulkesnės frakcijos grūdelis turi būti daug mažesnis nei stambesnės frakcijos grūdelių sudaromos tuštumos. Geriausias efektas gaunamas, kai atskirų frakcijų grūdelių matmenys skiriasi 8–10 kartų;
- turi būti išlaikomas optimalus atskirų frakcijų kiekybinis santykis.

Kai yra dvi frakcijos, imama 70 % stambiosios ir 30 % smulkiosios frakcijos. Naudojant tris frakcijas, imama 60 % stambiosios, 20–25 % vidutinės ir maždaug 10 % smulkiosios. Naudojant dvi frakcijas, galima gauti pusgaminius, kurių poringumas siekia 15–16 %, o naudojant tris frakcijas – 9–10 %. Naudoti daugiau frakcijų dažniausiai neapsimoka, nes poringumas mažėja nežymiai, o technologinis procesas pasunkėja.

Gaminant stambiagrūdes formavimo mases, neplastiški komponentai dažnai malami rutuliniais malūnais, juose kartu jie ir nusijojami.

Smulkiagrūdės formavimo masės naudojamos gaminti techninės keramikos gaminius, buitinį ir elektrotechninį porcelianą. Tokios masės sudarytos iš labai smulkių grūdelių, dėl to degimo metu tarp įkrovos komponentų vyksta intensyvi cheminė sąveika, pusgaminiai labai tankėja, degimo metu tiesinis susitraukimas siekia 10–20 %. Ruošiant smulkiagrūdes formavimo mases, dažnai įvertinamas bendras susmulkinimo laipsnis, o į atskirų frakcijų kiekybinę santykį dėmesio nekreipiama.

6.3. Presavimo miltelių ruošimas

Stambiagrūdė formavimo masė

Dauguma masės komponentų gaunami malant sausai, todėl maišymas paprastai derinamas su drėkinimu. Maišymui dažniausiai naudojami vienveleniai ir dviveleniai maišytuvai, periodinio veikimo maišymo statgirnės su sunkiomis girnėmis, maišytuvai su Z pavidalo mentėmis. Naudojant minėtus įrenginius, galima pasiekti reikiamą formavimo mišinio homogeniškumą. Iš pradžių maišoma sausai, vėliau drėgnai.

Ruošiant formavimo mišinius iš sausų (drėgnis 4–8 %) ar pussausių (drėgnis 8–12 %) miltelių, efektyvesni periodinio veikimo įrenginiai, nes jie intensyviau veikia mechaniškai apdorojamą medžiagą.

Smulkiagrūdė formavimo masė

Keramikos pramonėje smulkiadispersinių komponentų mišinys dažniausiai ruošiamas arba kartu šlapiai malant rutulinuose

malūnuose, arba propeleriniuose maišytuvuose maišant atskirai paruoštas suspensijas.

Purkštuvinės džiovyklos panaudojimas turi poveikį miltelių sandarai ir granulimetrijai. Gaunamų miltelių forma artima sferinei, o miltelių granulimetrija praktiškai yra vienos frakcijos, dėl to pagerėja byrėjimas, padidėja piltinis tankis, presuojant lengviau pašalinamas oras.

6.4. Pusgaminių formavimui keliami reikalavimai

Pagrindiniai pusgaminių formavimui keliami reikalavimai yra tokie:

- pakankamas jo sutankinimas formavimo metu;
- pusgaminio tankio vienodumas;
- suformuotame pusgaminyje neturi būti mechaninių defektų (įtrūkimų, mikroplyšių ir pan.).

6.5. Plastiško formavimo būdas

Plastiškas formavimas – labiausiai paplitęs keraminių dirbinių gamybos būdas. Jis remiasi sudrėkintų molių savybe sudaryti plastišką masę, kuri gali plastiškai tekėti, t.y. veikiama išorinių jėgų keisti savo formą, bet išlikti vienalytė. Tokiu būdu formuojamų gaminių drėgnis dažniausiai būna nuo 15 iki 25 %. Dažniausiai naudojami tokie plastiškojo formavimo būdai:

- išstūmimo;
- perpresavimo;
- šablonavimo.

Išstūmimo būdu iš preso išstumiamo masė pereina per formavimo galvutę ir įgauna reikiamą formą. Taip formuojamos stačiakampio gretasienio formos juostos (ištisinės, pilnavidurės arba skylėtos), cilindriniai strypeliai, vamzdeliai. Šie ruošiniai vėliau supjaustomi į reikiamo dydžio pusgaminius.

Formuojant pusfabrikačius išstūmimo būdu, naudojami sraigtiniai arba stūmokliniai presai. Sraigtiniai presai yra nuolatinio, o stūmokliniai presai – periodinio veikimo.

Sraigtiniai presai dažnai vadinami juostiniais ir gamyboje naudojami dažniau. Stūmokliniai presai naudojami tik gaminant kai kuriuos techninės keramikos gaminius, kai gamybos apimtys nedidelės.

Masė iš presų gali būti išstumama tiek horizontalia, tiek vertikalia kryptimi. Horizontalus išstūmimo būdas naudojamas gaminant masyvius gaminius, o vertikalus – gaminant tuščiavidurius, plonasienius.

Vienas iš juostinių presų trūkumų yra tai, kad masės sluoksniai juda nevienodu greičiu, dėl to tarp jų susidaro poslinkio įtempimai, ir dėl to suformuotuose pusgaminiuose atsiranda įvairių defektų. Pagrindinės technologinės priemonės, mažinančios formavimo defektus, – optimalaus masės drėgnio liesiklių kiekio ir granuliometrijos parinkimas, geras masės vakuumavimas, presavimo galvutės ilgio ir kūgiškumo reguliavimas priklausomai nuo masės savybių.

Perpresavimo būdas naudojamas, norint gauti reikiamos formos, tikslių matmenų, aštrių briaunų, stačių kampų pusfabrikatų. Ruošinys, įdėtas į formą, papildomai suspaudžiamas profiliniu štampu. Perpresavimo slėgis būna nedidelis 2–3 MPa, dėl to pusfabrikačio tankis padidėja nedaug.

Formuojant pusfabrikačius šablonavimo būdu, masė dideliu greičiu sukama formoje, o iš viršaus ją spaudžia gaminio vidinį paviršių atitinkantis šablonas. Šiuo būdu gaminami plonasieniai keraminiai gaminiai.

6.6. Miltelių presavimo formavimo būdas

Pagrindinės presavimo miltelių charakteristikos:

- vandens kiekis (gali keistis nuo 2 iki 12 %. Formuojant iš miltelių, kurių pagrindinis komponentas molis, miltelių

drėgnis būna 4–8 % – sausasis presavimas arba 8–12 % – pussausis presavimas);

- piltinis tankis (priklauso nuo miltelių savitojo tankio, vandens kiekio ir miltelių sandaros. Laisvai supylus miltelius, kieta medžiaga užima 30–45 %, vanduo – 10 %, oras – 45–65 % viso tūrio. Presavimo metu pusfabrikačio tūris sumažėja dėl porų, kurios pripildytos oro);
- granulometrija (milteliai, gauti malant molį, yra granuluoti, nes kiekvienas toks grūdelis sudarytas iš daugelio pirminių mineralinių dalelių, kurių didžiosios dalies skersmuo mažesnis nei 1 μm . Miltelių granulometrija lemia piltinį tankį ir tankį pirminėse presavimo stadijose);
- byrėjimo greitis (turi būti toks, kad vienodai užpildytą visą formą. Byrėjimo greičiui teigiamos įtakos turi sferinė grūdelių forma ir vienoda granulometrija).

Perpresavimo metu vykstančius procesus galima suskirstyti į kelias stadijas. Pradinėje – miltelių sutankinimo stadijoje – užpildomos stambios poros, dalelės juda lygiagrečiai su jas spaudžiančiu presavimo štapu. Šioje stadijoje milteliai nesuardomi ir nedeformuojami. Antroje stadijoje grūdelių persislinkimą lemia deformacijos reiškiniai. Padidėja kontaktų tarp atskirų dalelių paviršius ir visos sistemos tankis.

Presuojant miltelius, didelę reikšmę turi ne tik kietos, bet ir skystos bei dujinės fazių pokyčiai. Kapiliaruose ir porose esantis vanduo išspaudžiamas į didesnes poras. Jeigu vandens daug, tai jis užpildo visas poras, t.y. sistemoje nelieka oro. Tokios sistemos daugiau sutankinti beveik neįmanoma. Toks tankis vadinamas kritiniu, o jį atitinkantis slėgis – kritiniu presavimo slėgiu. Viršijus šį slėgį, pasireiškia tik tampriosios deformacijos.

Spaudžiant formavimo masę, porose esantis oras gali būti išstumiamas iš formos, suspaudžiamas porose, iš dalies persiskirsto pusgaminyje. Presavimo pradžioje oras daugiausia išstumiamas iš

formos. Vėliau siaurėjant ir užsidarant kapiliarams, oro išstūmimas iš formos lėtėja ir gali visai nutrūkti. Tinkamai vykdant presavimo procesą, porose esančio oro slėgis neviršija 0,2–0,3 MPa. Supresuotame pusgaminyje dažniausiai lieka nuo 25 iki 40 % pradinio oro kiekio. Pašalinus perpresavimo slėgį, vyksta grįžtamasis plėtimasis, jis sudaro nuo 1–2 iki 7–8 %. Dėl grįžtamojo plėtimosi gali atsirasti matomų arba paslėptų plyšių, jie išryškėja pusgaminis laikant arba džiovinant.

Miltelių presavimo savybes galima reguliuoti keičiant slėgį arba įmaišant paviršių aktyvinančių medžiagų (PAM). PAM sumažina mineralinių dalelių kietumą arba pagerina dalelių suvilgymą, dėl to mažėja trintis.

6.7. Liejimo būdas

Galimi du liejimo būdai:

- vandeninių suspensijų liejimas į poringas (dažniausiai gipsines, bet gali būti ir keraminės arba plastmasinės) formas. Gipsas sugeria vandenį, o formos vidiniame paviršiuje susiformuoja pusgaminis. Pusgaminio stiprumo užtenka, kad galima būtų išimti iš formos, transportuoti ir džiovinti;
- karštų suspensijų su išlydytais plastikiais liejimas į metalines formas. Tokių suspensijų dispersinė fazė (dažniausiai vaškas, parafinas) atiduoda šilumą metalinei formai ir sustingsta.

Norint gaminti gaminius šiais būdais, visas šlikerio tūris turi būti pakankamai homogeniškas, neturi pakisti laikomas ar liejamas. Šlikeris turi būti ir labai takus.

Iš vandeninių suspensijų pusgaminiai liejami nupylimo ar pripylimo būdu. Liejant nupylimo būdu, kai ant formos vidinio paviršiaus susidaro pakankamo storio gaminys, likęs šlikeris nupilamas. Gaminant pripylimo būdu, procesas tęsiasi tol, kol

formavimo masės prisipildo visas formos tūris. Nupylimo būdu gaminami plonasieniai gaminiai, pripylimo – storasieniai pilnaviduriai arba tuščiaviduriai gaminiai.

Pusgaminio sienelės formavimosi greitis reguliuojamas šiais būdais:

- pašildžius šlikerį ir formą, pusgaminis susiformuoja 2 kartus greičiau (šlikerį galima šildyti tik iki 35 °C temperatūros, esant aukštesnei, galimi tiksotropijos reiškiniai);
- vakuumuojamas šlikeris arba forma;
- vibruojamas šlikeris su forma;
- liejama slegiant.

Formuojant gaminius liejimo būdu, gali išryškėti tokie defektai:

- plyšiai (atsiranda dėl nevienodų pusgaminio dalių arba tam tikrų formos dalių drėgnio, per mažo masės rišlumo);
- pusgaminio pažeidimas jį imant iš formos (atsiranda dėl per didelio pusgaminio ir formos drėgnio);
- liejimo dėmės atsiranda, kai šlikeris pilamas iš viršaus – jis taškosi į formos sieneles;
- nevienodo storio pusgaminio sienelės (atsiranda ne laiku nupylus šlikerį arba blogai surinkus formą).

7. DŽIOVINIMO IR DEGIMO METU VYKSTANTYS PROCESAI IR JŲ POVEIKIS KERAMIKOS SAVYBĖMS

Suformuotuose keraminiuose pusgaminuose yra drėgmės, todėl prieš degant ją reikia pašalinti. Išdžiovinti pusfabrikačiai turi būti pakankamai stiprūs, kad degimo krosnyje juos būtų galima sudėti vieną ant kito. Pusfabrikačiuose neturi atsirasti defektų (plyšių, įtrūkių ir t. t.). Dažniausiai reikalaujama, kad liekamojo drėgnio kiekis neviršytų 1–3 %.

Keraminių gaminių džiovinimo procesas skirstomas į tris periodus:

- šildymo;
- pastovaus džiovinimo greičio;
- mažėjančio džiovinimo greičio.

Šildymo metu pusgaminiai sušyla. Nusistovi pastovi jų paviršiaus temperatūra ir šiluminė pusiausvyra tarp šilumos kiekio, kurį akumuliuoja medžiaga, ir šilumos kiekio, reikiamo drėgmei išgarinti. Toliau pusgaminio džiovinimo greitis yra pastovus ir lygus drėgmės garavimo nuo atvirų paviršių greičiui. Drėgmė garuoja nuo pusgaminio paviršiaus, tačiau jis išlieka drėgnas, nes vanduo difunduoja iš vidinių sluoksnių. Mažėjant džiovinimo greičiui, džiūvimas laipsniškai lėtėja, nes mažėja drėgnis. Pusgaminio paviršiuje susidarius pusiausvirajam drėgniui, džiovinimo greitis tampa lygus nuliui, t. y. iš medžiagos drėgmė daugiau jau nebešalinama.

Keraminė formavimo masė susideda iš kietų viena prie kitos prisišliejusių dalelių, vandens ir oro pūslelių. Įmaišytas į formavimo mases vanduo plona plėvele aptraukia kietas daleles ir užpildo poras tarp jų. Drėgnesnių formavimo masių kietos dalelės padengtos storesnėmis plėvelėmis, sausesnių – plonesnėmis.

Džiovinant pusfabrikatą, drėgmė pradeda garuoti nuo jo paviršiaus. Išgaravus nuo paviršiaus, jos koncentracija vidiniuose sluoksniuose pasidaro didesnė, ir atsiranda drėgmės gradientas tarp vidinių ir paviršinių pusgaminio sluoksnių. Drėgmės judėjimo pusgaminuose mechanizmas ir greitis priklauso nuo drėgmės ryšio su medžiaga, jos sandaros, temperatūros bei drėgnumo, poringumo ir kt.

Pusgaminiai džiūdami traukiasi, jų masėje dėl atsiradusio drėgmės gradiento vyksta įvairūs tūriniai pokyčiai, kurie sukelia vidinius įtempimus. Tiesinis susitraukimas paprastai kinta nuo 6 iki 10 %, kas atitinka tūrio sumažėjimą 17–26 %. Kai vidiniai įtempimai viršija pusfabrikačio stiprį tempiant, jis sutrūkinėja.

Džiovinant vykstančius tūrinius keraminių pusgaminų pokyčius galima suskirstyti į tris stadijas:

- pirmojoje susitraukimas yra tiesiog proporcingas išgarintos drėgmės kiekiui. Joje dalelės suartėja, bet dar nesusiliečia;
- antrojoje nėra proporcijos tarp susitraukimo ir išgarintos drėgmės kiekio. Susitraukimas vis labiau atsilieka nuo vandens kiekio mažėjimo. Molio dalelės susiliečia, o ištuštėjusios poros prisipildo oro;
- trečiojoje stadijoje molis nebesitraukia, mažėjant drėgniui laipsniškai didėja pusgaminio poringumas.

Pavojingiausia yra pirmoji ir iš dalies antroji džiovinimo stadijos, nes čia pusgaminiai traukiasi, todėl tuo metu turi būti džiovinama lėtai. Trečiojoje stadijoje, kai pusgaminuose lieka apie 10–15 % vandens, galima juos džiovininti greitai.

Keramikos pramonėje dažniausiai naudojami tokie pusgaminų džiovinimo būdai:

- konvekcinis;
- radiacinis;
- džiovinimas aukšto dažnio srovėmis;

- džiovinimas mikrobangomis;
- kontaktinis elektrinis;
- sudėtinis.

Plačiausiai keramikos pramonėje naudojamas konvekcinis džiovinimo būdas. Džiovinant šiuo būdu, drėgmė išgaruoja dėl šilumos, kurią pusgaminiui perduoda judantis šilumnešis (karštas oras arba panaudotos krosnių dujos). Toks džiovinimo būdas paprastas ir pakankamai pigus, tačiau pusgaminiuose dažnai atsiranda įvairių plyšių.

Radiacinio džiovinimo būdu drėgmė išgaruoja dėl šilumos, kuri perduodama spinduliuojant nuo įkaitusių paviršių. Šis būdas dažniausiai naudojamas plonasieniams gaminiams džiovinti.

Džiovinant aukšto dažnio būdu, pusgaminio tūris įsyla vienodai, veikiamas aukšto dažnio srovių. Tačiau dėl šilumos mainų su aplinka ir drėgmės garavimo nuo paviršiaus vidiniai sluoksniai būna šiltesni už išorinius. Šis būdas plačiai naudojamas džiovinant storasienius keraminius pusgaminčius.

Džiovinant kontaktiniu elektriniu būdu, per elektrai laidžią medžiagą leidžiama kintamoji elektros srovė. Šis metodas ekonomiškai, todėl plačiai naudojamas.

Statybinės keramikos įmonėse pusgaminiai dažniausiai džiovinami tunelinėse džiovyklose (7.1 pav.). Džiovyklą sudaro tunelis, kuriame bėgiais juda vagonėliai su pusgaminiais, sukrautais ant lentynų. Tunelinės džiovyklos ilgis būna nuo 30 iki 36 m, aukštis – 1,4–1,7 m, plotis – 1,15–1,4 m.

7.1 pav. Tunelinės džiovyklos principinė schema: 1 – kamera;
2 – vagonėliai; 3 – ventiliatoriai; 4 – kalorifieriai

Keraminių medžiagų degimo metu vyksta fizikiniai ir cheminiai procesai, kurie nulemia susidarančių fazių sudėtį ir kiekį, struktūrinių elementų dydį, formą ir tarpusavio išsidėstymą, keraminio gaminio masės ir tūrio pokyčius.

Paprastai molio degimo metu struktūriniai elementai juda arba skystos fazės pavidalu, arba difunduojant katijonams iš vieno kristalų gardelių į kitas, arba augant vieniems kristalams iš kitų (rekristalizacija), arba sublimacijos ir kondensacijos būdu, esant aktyviai dujų fazei.

Keraminių gaminių degimo metu vykstančius procesus sąlygiškai galima suskirstyti taip:

- sorbcinio, chemiškai nesurišto vandens pašalinimas (100–300 °C);
- organinės kilmės priemaišų suardymas (200–400 °C);
- geležies deguoninių junginių oksidacijos-redukcijos reakcijos (200–900 °C);
- sulfidų oksidavimas, druskų susidarymas ir jų suardymas (400–1000 °C);
- hidroksilinio vandens pašalinimas – dehidratacija (450–900 °C);

- molio kristalinės struktūros suardymas – amorfizacija (600–900 °C);
- karbonatų suirimas – dekarbonizacija (600–950 °C);
- naujų stiklingų ir kristalinių fazių susidarymas (600–1200 °C).

Džiovinant iki 105 °C temperatūros, pusgaminis netenka drėgmės, keliant temperatūrą iki 200 °C, netenka absorbcinio vandens ir susitraukia. Susitraukimas baigiasi(,) esant apytiksliai 250 °C temperatūrai. Pusgaminų struktūra šiuo periodu dar nesikeičia.

Organinių priemaišų kiekis molyje, gaminant statybinės keramikos gaminius, keičiasi nuo 0,5 iki 2,0 %. Natūralios organinės priemaišos molyje pradeda skilti, esant ≈ 220 °C temperatūrai. Didesnėje kaip 300 °C temperatūroje pamažu prasideda kietų organinių medžiagų oksidavimas. Anglies išdegimo greitis, kylant temperatūrai, didėja ir yra didžiausias, kai ji 450–500 °C. Organinių medžiagų likučiai sudega tik 900 °C temperatūroje.

Apie geležies oksidų redukcinius-oksidacinius pokyčius aliumosilikatinių pusfabrikačių degimo metu duomenų yra nedaug. Degimo metu gali susidaryti ne tik geležis, bet ir tarpiniai oksidai ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{FeO} \rightarrow \text{Fe}$; $\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{Fe}$ (kai temperatūra yra aukštesnė nei 572 °C), jei jie tam tikroje temperatūroje yra patvarūs. Kai temperatūra žemesnei nei 572 °C, FeO nestabilus. Geležies oksidų redukcijos procesams įtakos turi pradinė žaliavos sudėtis, jos granulometrija, sukepimo laipsnis, dujų difuzijos keraminėje medžiagoje greitis ir kt.

Dažnai molyje būna dispersinių geležies sulfidų priemaišų, kurios aukštesnėje temperatūroje gali sukelti pusgaminio pūtimąsi ir net suirimą. Jei molyje yra kalcio ir magnio karbonatų, degimo metu išsiskiria CaO ir MgO, su jais reaguoja sieros oksidai, sudarydami netirpius ar mažai tirpius sulfatus, kurie sunkiai suardomi net degant

aukštoje temperatūroje. Todėl eksploatuojant gaminius, dirbinio paviršiuje gali atsirasti išsūdų, apnašų.

Literatūroje nurodyta, kad iš molio mineralų chemiškai surištas vanduo pašalinama 450–500°C temperatūroje. Tokio vandens pašalinimo priežastis ir greitis priklauso nuo molio mineralų prigimties (struktūros), jų dalelių dispersiškumo. Po dehidracijos vyksta tam tikri pokyčiai molio mineraluose.

Molio sudėtyje nemažą priemaišų dalį sudaro karbonatai (CaCO_3 , MgCO_3 , dolomitas). Kaitinant jie skyla, išsiskiria CO_2 . Karbonatų skilimas prasideda, esant 650 °C, o baigiasi – 800–900 °C temperatūrai. Karbonatų skilimo procesui poveikį daro mineralizatoriai, dujų terpė, šarminiai ir žemės šarminiai metalai.

Naujos fazės gali susidaryti visuose pusgaminio terminio apdorojimo etapuose. Anksčiausiai prasideda geležies junginių fazinis virsmas, o vėliausiai jis daro įtaką termodinamiškai stabiliausių, taip pat tarpinių fazių susidarymui. Jei kurios nors bazinės medžiagos aktyvumas tam tikru metu tam tikroje temperatūroje tampa maksimalus, ir jei tuo pat metu sistemoje egzistuos kita aktyvi grupė, iš jų abiejų būtinai susidarys nauja fazė, kuri gali būti termodinamiškai stabili arba ne.

Sukepimu vadinamas pradinių mažai sujungtų grūdėtų mišinių tankėjimo, tvirtėjimo ir sulipimo į gabalus reiškinys. Sukepimas, kuris yra galimas tiek kietojoje fazėje, tiek dalyvaujant skystajai ir dujinei fazei, keliant temperatūrą ir didinant slėgį, vyksta tam tikru greičiu. Esant absoliučiam sukepimui, gaunamas beporis, idealiai tankus gaminy. Tačiau kartais dėl vakancijų, kurios yra didesnės mažų porų paviršiuose nei didelių, sukepinant medžiagą mažos poros užsipildo medžiaga, o didelės dar labiau padidėja. Dėl to bendras pusfabrikačių poringumas nesumažėja, kinta tik porų dydis – tokį procesą galima vadinti vidiniu sukepimu. Šis procesas naudingas, nes sumažėja tarpfazinis paviršius, o kartu ir paviršinė energija.

E. Geguzinas sukūrė formulę, pagal kurią apskaičiuojamas kritinis poros spindulys. Kai $r > r_{kr}$, tai pora auga, o kai $r < r_{kr}$, tai pora užsipildys medžiaga.

$$r_{kr} = 2\sigma V_0 \xi_0 / kT\Delta, \quad (7.1)$$

$$\Delta = \xi_r - \xi_0. \quad (7.2)$$

čia: σ – tarpfaziniai paviršiaus įtempiai; V_0 – pradinis tūris; ξ_0 – pradinė vakancija, atsilaisvinanti esant reikiamai temperatūrai; ξ_r – poros paviršiaus vakancijos koncentracija; k – Bolcmano konstanta; T – absoliutinė temperatūra. Didinant sukepimo laiką, Δ mažėja, sistema artėja prie pusiausvyros, kai $\Delta = 0$, r_{kr} artėja į begalybę, vadinasi, kai nevyksta vakancijos perėjimas, kietafazis sukepimas baigiasi.

Išorinis sukepimo požymis yra sukepančio kūno matmenų sumažėjimas, o sukepimo proceso varomoji jėga tuo didesnė, kuo didesnė sistemos paviršiaus energija. Jos dydis priklauso nuo dalelės savitojo paviršiaus, struktūros defektingumo, dalelių tarpusavio kontakto netobulumo. Didėjant gaminių sukepimo laipsniui, didėja jų tankis, tvirtumas, kietumas, tūrio pastovumas, esant aukštai temperatūrai, cheminis atsparumas, šilumos laidumas, mažėja dujų ir vandens pralaidumas ir kt.

Dažniausiai sukepimas yra skirstomas į du tipus:

- kietafazį;
- skystafazį.

Kietafazis sukepimas toks, kuris vyksta dėl kietos medžiagos masės kėlimosi, ir pasireiškia bandinio matmenų sumažėjimu. Čia nėra nei skystos, nei dujinės fazės, ir veikia tik temperatūra. Toks sukepimas dažniausiai pasiekiamas gaminant techninę keramiką.

Statybinės keramikos technologijoje plačiausiai paplitę tie sukepimo procesai, kuriuose dalyvauja skystoji fazė. Skystafazis sukepimas toks, kai sukepimo metu poras tarp grūdelių užpildo

skystoji fazė. Jei skystosios fazės kiekio užtenka, tai visos poros bus užpildytos, grūdėliai persigrupuos, ir medžiaga susitrauks. Šio sukepimo varomoji jėga yra lydalo tarpfazinis paviršiaus įtempimas, dėl kurio uždaroje apvalioje poroje atsiranda neigiamas slėgis. Veikiant šiam slėgiui, poras užpildo lydalas, o grūdėliai suartėja. Sukepimo, dalyvaujant skystajai fazei, greitis yra proporcingas skystosios fazės paviršiaus įtempiui ir atvirkščiai proporcingas grūdelių spinduliui bei skystosios fazės klampai.

Skystafazio sukepimo metu skystoji ir kietoji fazės sąveikauja tarpusavyje. Šį procesą galima suskirstyti į tris stadijas:

- pirmoji, kurioje, atsiradus skystajai fazei, grūdėliai suartėja. Tarp dviejų šalia esančių sukepamos medžiagos grūdelių atsiranda vilgančio lydalo sluoksnelis, įgaunantis įgaubto menisko formą. Dėl paviršiaus įtempimo jėgų atsiranda perteklinis slėgis, kuris yra nukreiptas į menisko kreivumo centrą. Šis slėgis stumia skystį iš kontakto zonos ir suartina kietus grūdėlius, dėl to dalelės labiau susiglaudžia, ir poras užpildo lydalas;
- antroji, kurioje kietoji fazė tirpsta skystojoje, o ši prisisotinusi kristalინasi. Iš pradžių kristalai tirpsta kontakto vietose ir suartėja, o medžiaga susitraukia. Maži kristalai gali visiškai ištirpti, tačiau didesni auga lydale, ir vyksta rekristalizacija;
- trečioji, kurios metu pasibaigia rekristalizacija ir sutankėjimas, formuojasi standus karkasas.

Pagrindiniai faktoriai, lemiantys sukepimo procesą, yra šie:

- temperatūra ir laikas;
- žaliavų smulkumas;
- kristalinės gardelės defektiškumo laipsnis.

Temperatūra yra pagrindinis faktorius, veikiantis sukepimo greitį ir laipsnį. Temperatūros pakėlimas greitina difuziją, mažina skystosios fazės klampą, didina sukepimo greitį, mažina poringumą iki atitinkamos maksimalios reikšmės. Sukepimo greitis kinta laike, t. y. intensyviausiai sukepimas vyksta iki 10 % poringumo, vėliau medžiagos tankėjimas lėtėja. To priežastys – dujų slėgio padidėjimas uždaroje porose, mažėjant jų dydžiui, vakancijos difuzijos didėjimas nuo vidinių porų paviršiaus iki grūdelių centro. Taip pat sukepimą lėtina aukštoje temperatūroje vykstantis kristalų augimas. Sukepimo greitis ir laipsnis didėja, keliant temperatūrą arba esant žemesnei temperatūrai, bet ilginant bandinių išlaikymą joje.

Didelę įtaką sukepimo procesui turi grūdelių dydis ir jų pasiskirstymas pagal matmenis. Kuo mažesni grūdeliai, tuo greitesnis ir didesnis sukepimo laipsnis. Tai galima paaiškinti daugeliu faktorių: viso grūdėtojo kūno paviršiaus padidėjimu, dėl ko atsiranda daug laisvos paviršinės energijos; tarp grūdelių padidėja kontaktų kiekis, dėl to lengviau poros užpildomos kieta medžiaga. Naudojant dispersiškesnę medžiagą, kad pasiektume tą patį sukepimo laipsnį, galima temperatūrą sumažinti iki 200 °C ir daugiau. Pažymėtina, kad dėl didesnio grūdelių kontaktų paviršiaus, geriau ir greičiau sukepa polidispersiniai milteliai nei monodispersiniai arba artimi jiems.

Naudojant nepusiausvirą, netvarkingą kristalinę gardelę, galima padidinti sukepimo laipsnį ir greitį dešimtimis, o kartais ir šimtais kartų. Tokiose medžiagose labai smarkiai padidėja savidifuzija. Kristalinės gardelės defektiškumą galima padidinti dedant į formavimo masę specialiųjų priedų. Dažniausiai jie naudojami techninės ir oksidinės keramikos gamyboje. Pavyzdžiui, į keramikos, kurios pagrindas yra Al_2O_3 , formavimo masę įdėjus iki 2 % TiO_2 , sukepimo temperatūra sumažinama iki 200 °C.

Degimo režimas yra vienas svarbiausių keramikos gamybos technologinio proceso etapų. Nuo jo parinkimo labai priklauso galutinės keraminio dirbinio savybės, ypač stipris, poringumas,

tankis, vandens įmirkis, atsparumas cheminiam poveikiui. Skirtingais režimais išdegus tos pačios sudėties formavimo masės bandinius, galima gauti poringąją arba sukepusiąją keramiką. Poringoji keramika naudojama statybinėse konstrukcijose, kurios turi būti ne tik stiprios, bet ir maksimaliai nelaidžios šilumai bei pakankamai lengvos. Sukepusioji keramika naudojama didelio stiprumo konstrukcijoms, atsparioms atmosferiniams bei cheminiams veiksniams, taip pat konstrukcijoms, atsparioms dilimui. Sukepimo greičiui taip pat įtaką turi galutinė maksimali degimo temperatūra.

Dažniausiai keramikos gamybos įmonėse pusgaminių degimui naudojama tunelinė krosnis (7.3 pav.). Principinė tunelinės krosnies schema pateikta 7.2 pav.

7.2 pav. Tulinės krosnies principinė schema: a) šildymo zona; b) degimo zona (1 – krosnies kamera; 2 – oro tiekimo ir šalinimo kanalas; 3 – dujų tiekimo šalinimo kanalas; c) dujų, oro tiekimo ir šalinimo schema

7.3 pav. Bendras tunelinės krosnies vaizdas

8 KERAMINIŲ DIRBINIŲ GAMYBOS TECHNOLOGIJA

8.1. Keraminių plytų gamybos technologija

Keraminės fasadinės apdailos plytos gali būti formuojamos mechaniniu arba rankiniu būdu. Jų gamybai naudojamas molis iš eksploatuojamų atvirų karjerų. Prieš pradedant karjerų eksploataciją, reikia atlikti molio telkinio žvalgybą, kurios metu nustatomas dirvožemio sluoksnio storis, molio sluoksnio storis, gruntinio vandens lygis, molio kokybė, priemaišų kiekis, privažiavimas prie karjero ir kitos technologinės bei eksploatacinės savybės. Karjerų moliai kasami vienakaušiais ekskavatoriais, į gamyklą vežami savivarčiais automobiliais. Kasant kas 10 m, skustinai per visą molio sluoksnio aukštį imami bandiniai kalkinių intarpų kiekiui nustatyti. Smėlis kasamas vienakaušiu ekskavatoriumi ir vežamas savivarčiais automobiliais. Išdegti trupinti neatitiktiniai dirbiniai naudojami formavimo masei liesinti.

Keraminių dirbinių formavimo masė turi būti vienalytė. Formavimo masę keraminėms apdailos plytomis gali sudaryti: molis, liesikliai – smėlis ir degti trupinti neatitiktiniai dirbiniai, išdegantieji priedai, priedai druskoms surišti ir spalvai suteikti, vanduo. Visus komponentus pirmiausia reikia tinkamai paruošti ir tik tada gerai sumaišyti. Iš visų žaliavų reikia pašalinti žalingas priemaišas, taip padidėja naudingų komponentų koncentracija. Didelę reikšmę formavimo masės savybėms turi žaliavų smulkinimas. Nuo jo priklauso tiek pusfabrikačio, tiek ir išdegto dirbinio poringumas. Blogai, kai žaliavos ne tik nepakankamai, bet ir per daug susmulkintos. Formavimo masė turi būti gerai sumaišyta ir gerai formotis. Apdailos plytos formuojamos iš plastiškos tešlos, turinčios 20–25 % drėgmės. Dažnai iškastas karjeruose molis yra

išlaikomas pusę metų – pūdomas, o paruošta gamykloje formavimo masė paliekama išsigulėti 5–10 parų. Molio masės išlaikymo metu suardomi ryšiai tarp molio grūdelių, pasikeičia molio savitasis paviršius, suvienodėja drėgmė, palengvėja maišymo procesas, padidėja masės vienalytiškumas, palengvėja formavimas.

Principinė keraminių apdailos plytų technologinė schema, kai plytos formuojamos mechaniniu būdu, pateikta 9.1 paveiksle. Autotransportu (1) atvežtas į gamyklą molis išverčiamas į dėžinį tiekuvą (2), iš ten patenka ant juostinio transporterio (3), kuris gabena jį į akmenų atrinkimo valcų (4). Po valcų molis juostiniu transporteriu gabenamas į būgninę džiovyklą (5), kurioje yra išdžiovinamas iki 8 % drėgmės ir kartu smulkiai sutrupinamas.

Iš būgninės džiovyklos juostiniu transporteriu molis paduodamas į dezintegratorių (6), kuriame papildomai malamas (dalelių skersmuo iki 2 mm). Iš dezintegratoriaus elevatoriumi (7) jis patenka į sraigtinį transporterį (8), kuris molį paduoda ant sietų (9) (sieto akučių skersmuo 1 mm). Dalelės, praėjusios pro sieto akutes, patenka į molio laikymo bunkerį (10), o nepaėjusios grąžinamos į dezintegratorių pakartotiniam malimui. Paruoštas molis laikomas bunkeryje, iš kurio per juostinį svorinį dozatorių tiekiamas ant bendro žaliavų transporterio (3).

Atvežtas į gamyklą smėlis pilamas į smėlio priėmimo bunkerį su sietu, iš kurio juostiniu transporteriu pateks į smėlio bunkerį (12). Sieto akučių skersmuo 1 mm. Iš smėlio bunkerio per juostinį svorinį dozatorių (13) smėlis paduodamas ant bendro žaliavų transporterio (3).

Neatitiktiniai dirbiniai elektrovežiu (15) atvežami iš rūšiavimo aikštelės ir pilami į dėžinį tiekuvą. Iš dėžinio tiektuvo patenka ant juostinio transporterio, kuriuo paduodami į žiauninį trupintuvą (16) pirminiam trupinimui, o vėliau – į plaktukinį trupintuvą (17) smulkiam trupinimui (dalelių dydis mažesnis kaip 1 mm).

8.1 pav. Keraminių plytų gamybos principinė technologinė schema: 1 – autotransportas; 2 – dėžinis tiektuvas; 3 – juostinis transporteris; 4 – malimo valcai; 5 – būgninė džiovykla; 6 – dezintegratorius; 7 – elevatorius; 8 – sraigtinis transporteris; 9 – sietai; 10 – molio bunkeris; 11 – trupintų neatitiktinių plytų bunkeris; 12 – smėlio bunkeris; 13 – dozatoriai; 14 – bunkeris su sietu; 15 – elektrovežis; 16 – žiauninis trupintuvas; 17 – plaktukinis trupintuvas; 18 – aeroloviai; 19 – dvivelenis maišytuvas; 20 – vandens dozatorius; 21 – minklės dėžė; 22 – valcai; 23 – vakuuminis presas; 24 – apipūrkimas bitumu; 25 – transporteris; 26 – pjaustymo automatas; 27 – pakrovimo automatas; 28 – džiovyklos vežimėlis; 29 – kamerinė džiovykla; 30 – transporteris; 31 – pakrovimo automatas; 32 – krosnies vežimėliai; 33 – išlaikymo kamera; 34 – tunelinė krosnis; 35 – iškrovimo automatas; 36 – pakavimo automatas

Iš plaktukinio trupintuvo elevatoriumi susmulkinti neatitiktiniai dirbiniai pakeliami iki sietų. Dalelės, praėjusios 1 mm skersmens skylių sietus, patenka į trupintų neatitiktinių dirbinių bunkerį (11), o nepraėjusios grąžinamos pakartotiniam trypinimui į plaktukinį trupintuvą. Paruošti trupinti neatitiktiniai dirbiniai iš bunkerio (11) per juostinį svorinį dozatorių (13) dozuojami ant bendro žaliavų transporterio (3).

Per dozatorius medžiagos paduodamos ant bendrojo žaliavų juostinio transporterio, kuris visus formavimo masės komponentus nugabena į dvivelenę maišyklę (19), ir joje masė gerai išmaišoma. Paskui masė juostiniu transporteriu gabenama į kitą dvivelenę maišyklę, kurioje formavimo masė išmaišoma, paduodant į ją reikiamą kiekį vandens iš vandens dozatoriaus (20). Toliau kruopščiai išmaišyta masė gabenama juostiniu transporteriu išsigulėti į aikštelėje esančias saugyklas (21) (išlaikoma iki 24 val.) – tai padeda suvienodinti masės savybes, ypač drėgnį. Nustatyta, kad(,) sandėliuojant masę 12 val., neatitiktinių dirbinių sumažėja 30 %, išdžiovintų pusfabrikačių stipris padidėja 40 %, o degtų – 20 %.

Dirbiniai formuojami iš plastiškos tešlos, turinčios 20–25 % drėgmės. Šis metodas yra seniausias, tačiau ir šiandien tebėra labiausiai paplitęs keraminių dirbinių gamyboje. Formavimo masė iš išlaikymo sandėlių dėžiniu tiekuvu paduodama ant juostinio transporterio, kuris ją gabeną į smulkaus malimo valcų (22), atstumas tarp volų yra 0,8 mm, po valcų masė juostiniu transporteriu paduodama į vakuuminį juostinį presą (23). Apdailos plytos formuojamos juostiniu vakuuminio presu. Formuojant dirbinius tokiu presu, išsiurbiamas formavimo masės porose esantis oras, išvakuuota masė yra plastiškesnė, iš jos geriau formuojami dirbiniai, o suformuoti, išdžiovinti ir išdegti jie yra stipresni.

Išeinanti iš preso molio juosta padengiama apsaugine plėvele (24), kuri susideda iš vienos dalies bitumo ir dviejų dalių vaitspirito. Ruošiant mišinį, bitumas šildomas tol, kol pradeda tirpti, vėliau skiedžiamas vaitspiritu ir maišomas iki galutinio ištirpimo. Paruoštas

mišinys siurbliais tiekiamas į bakelį prie preso, kur yra skirstytuvas, iš kurio jis savitaka bėga ant molio juostos. Apsauginė plėvelė yra nelaidi vandeniui, todėl pro ją nevyksta drėgmės difuzija, ir ant gaminių paviršiaus nesusidaro druskų išsūdų.

Juostinio vakuuminio preso suformuota ir apsaugine plėvele padengta molio juosta pjaustoma daugiastygiu pjaustymo automatu (26) į dirbinio dydžio gabalus, ir plytų pakrovimo automatu (27) suformuoti gaminiai sudedami ant džiovinimo vagonėlių (28), iš kur stumiami į kamerinę džiovyklą (29).

Šviežiai suformuoti pusgaminiai yra nestiprūs, lengvai deformuojami, o kaitinami sutrūkinėja. Džiovinant pusgaminį stipris didėja, ir išdžiovinti pusgaminiai kaitinami nesutrūkinėja.

Kamerinėse džiovyklose džiovinimo procesas reguliuojamas, keičiant šilumnešio temperatūrą, santykinį oro drėgnį ir oro judėjimo greitį. Iš kamerinės džiovyklos džiovinimo vagonėliai nustumiami į pusfabrikačių aikštelę, ir joje pusfabrikačiai automatu (31) sukraunami į paketus. Iš paketų automatas pusfabrikačius krauna ant degimo vagonėlių (32), jie elektriniu perdavimo vežimėliu nustumiami į išlaikymo kamerą (33), o toliau – į tunelinę krosnį (34).

Degama formavimo masė virsta keramine šuke, igydama visai naujas, keraminei šukei būdingas fizikines ir mechanines savybes: pasidaro kieta kaip akmuo, nebrinkstanti vandenyje, įgauna tam tikrą atsparumą šalčiui, metalinį skambesį ir kitų vertingų savybių.

Degimo krosnyje formavimo masėje vyksta įvairios reakcijos – dažniausiai skilimo ir naujų junginių sintezės. Tų reakcijų metu visada kristalizuojasi ir persikristalizuoja naujadarai.

Keraminių plytų degimo metu vyksta šie procesai:

- 20–150 °C – pusfabrikatis išdžiūsta. Tuo metu negalima staiga kelti temperatūros, nes susidarę vandens garai pusfabrikačio šukėje išvysto didelį slėgį, ir dėl to gaminiai gali sutrūkinėti;
- 200–400 °C – išdega organinės medžiagos, suskyla sulfidai;

- 400–650 °C – vyksta molio mineralų dehidratacija, iš neišdegusių organinių medžiagų susidaro anglis, β -kvarcas virsta α -kvarcu;
- 600–1 000 °C – skyla karbonatai, ir išsiskiria CO₂. Išdega likusios organinės medžiagos, padidėja šukės poringumas;
- 1 000–1 100 °C – vyksta intensyvios kietos fazės reakcijos, išdega susidariusi anglis, sumažėja poringumas, atsiranda lydalas.

Išdegtus dirbinius reikia atvėsinti pamažu, kad nesutrūkinėtų. Dirbiniai gali būti staigiai aušinami iki 800 °C. Labai lėtai, esant 800–700 °C temperatūrai, reikia vėsinti daug stiklo fazės turinčius gaminius, nes šiame temperatūrų intervale stingsta lydalas, ir persikristalizuoja kvarcas, dėl to keraminėje šukėje gali susidaryti per dideli vidiniai įtempimai.

Iš krosnies degimo vežimėliai elektriniu perdavimo vežimėliu nustumiami iki iškrovimo automato (35), ir jis sukrauna pagamintą produkciją ant transporterio, kuriuo transportuojamos plytos kartu ir rūšiuojamos. Atitinkančios keliamus reikalavimus plytos patenka į pakavimo įrenginį (36), po kurio gali būti tiekiamos tiesiai vartotojui arba į pagamintos produkcijos sandėlį. Atrinkti neatitiktiniai dirbiniai juostiniu transporteriu siunčiami į trupintuvus, perdirbami ir naudojami kaip priedas.

Gaminant „sendintas“ plytas, po rūšiavimo jos gali būti dedamos į būgnus, į kuriuos pridedama ir skiedinio. Sukant būgną, aštrūs plytų kampai ir briaunos apsitrina ir aptrupa, plytos pasidengia plona skiedinio plėvele, kuri ir pakeičia jų spalvą. Tokiu būdu paruoštos plytos atrodo kaip ilgus metus išbuvusios mūro konstrukcijoje.

8.2. Keraminių blokų gamybos technologija

Pagrindinė keraminių blokų žaliava – molis. Molio naudojamo keraminių blokų gamyboje sudėtis gali būti apytiksliai tokia:

- SiO_2 – 50 %;
- Al_2O_3 – 20 %;
- Fe_2O_3 – 8 %;
- CaO 5–10 %;
- MgO – 4 %;
- K_2O – 4,5 %;
- Na_2O – 1 %;
- (MnO , TiO_2 , CaCO_3) – 2,5 %.

Bendras molingųjų dalelių ($< 0,005$ mm) kiekis labai didelis – iki 92 %, t. y. molis labai plastiškas, todėl būtina jį liesinti. Pagrindiniai liesikliai:

- smėlis;
- pjuvenos;
- malti neatitiktiniai dirbiniai.

Liesiklio dedama iki 30 %. Jį būtina gerai sumaišyti su moliu. Keraminių blokų gamybos schema pateikta 8.2 paveiksle.

Formavimo masę homogenizuoja paruošimo įrenginiai: dvivelenė maišyklė, kuri molio masę išmaišo, skylėti volai, kurie masę pertrina ir įtrina į molį visus priedus.

Paruošta molio masė transportuojama į sandėlį išsigulėti. Po dviejų parų iš formavimo masės formuojami dirbiniai.

Iš sandėlio molio masė kasama daugiakaušiu ekskavatoriumi ir metama ant transporterio. Transporteriais žaliavos masė keliauja į smulkaus malimo volus. Čia ji dar kartą pertrinama, formuojamos 2–3 mm plokštelės. Toliau vakuuminiam juostiniam prese molio masė išvakuuojama ir praspaudžiant pro formavimo galvutę

suformuojama tuštymėta molio juosta. Automatinis kirtimo staliukas molio juostą supjausto į reikiamo ilgio ruošinius, kurie toliau kraunami į džiovinimo vagonėlius.

8.2 pav. Keraminių blokų gamybos schema

Pusgaminiai džiovinami tunelinėse džiovyklose 50–55 °C temperatūroje, 85 % santykinėje drėgmėje. Visų šių sąlygų reikia laikytis tam, kad dirbiniai džiūtų tolygiai, nesutrūktų.

Išdžiovinti iki maždaug 5 % liekamosios drėgmės blokai vežami į tunelines degimo krosnis. Dirbiniai degami 880–900 °C temperatūroje. Degimo trukmė – 40 valandų.

Išdegti dirbiniai rūšiuojami ir kraunami ant padėklų. Sukrautus gaminius pakavimo įrenginys apsuka polietileno plėvele.

8.3. Sendintų plytų gamybos technologija

Komponentai, reikalingi formavimo masei, atvežami iš žaliavų sandėlio ir supilami į tarpinį bunkerį. Iš ten sraigtiniu dozatoriumi žaliavos tiekiamos ant žaliavų transporterio. Ant transporterio žaliavos papildomai permaišomos paskirstymo mentele ir besisukančiais grėbliais. Iš žaliavų transporterio žaliavos patenka į dvivelenę maišyklę. Joje žaliavų mišinys drėkinamas ir permaišomas. Iš dvivelenės maišyklės sudrėkintas mišinys patenka į juostinį presą, kuriame velenu perstumiamas į sraigtinį presą. Iš šio preso homogenizuota masė patenka ant pernešimo transporterio. Šiuo įrenginiu ji nugabenama į paskirstymo įrenginį. Paskirstymo įrenginys sudarytas iš paruoštos formavimo masės suskirstymo į gabalus dalies ir plačios transporterio juostos. Iš suskirstymo į gabalus įrenginio paruošta masė plytos dydžio gabalais patenka ant smėliu pabarstytos transporterio juostos, o nuo pirmos juostos masės gabalai numetami ant smėliu pabarstytos antros juostos (numetimo metu jie pasisuka, ir ant juostos nukrinta kita, dar smėliu nepadengta puse), tada ant trečios ir ketvirtos juostų. Tokiu būdu masės gabalai pasidengia smėliu iš visų pusių. Padengti smėliu masės gabalai transportuojami plačiu juostiniu transporteriu iki formavimo įrenginio. Masė formuojama tokiu būdu: nuo plačios transporterio juostos smėliu padengti homogenizuotų žaliavų masės gabalai numetami į paruoštas metalines formas apačioje. Formos yra nelygiu dugnu, jų dugnas paruoštas taip, kad gaminyje susiformuotų įduba. Formų su masės gabalais eilė uždengiama ištisine lentyna. Lentyna su prispaustomis formomis apsukama, ir formavimo masė atsiduria ant lentynos viršaus. Formos pakeliamos nuo lentynos, ir ant jos

lieka tik suformuoti pusgaminiai, kurių viršuje matomi įspaudai, suformuoti apatinės formos dalies. Lentynos surenkamos po 4 ant lentynų transportavimo vežimėlio. Viename lygyje sudedamos 4 lentynos, o lygių yra per 20. Tokiu būdu ant vieno lentynų transportavimo vežimėlio patenka daugiau kaip 1500 vienetų pusgaminų. Lentynų transportavimo vežimėlis nuveža pusgaminus į džiovyklą, kurioje palaikoma 50–80 oC temperatūra. Pusgaminiai džiovinami pašildytu oru, šilumnešio temperatūra 120–180 oC. Džiovinimo trukmė 24–45 val. Iš kiekvieno pusgaminio pašalinama 0,3–0,6 litro vandens. Išdžiovintus gaminių transportavimo vežimėliai išvežami iš džiovyklos. Jie iškraunami, atskiriama kiekviena lentyna su pusgaminiais ant jos. Lentynos sudedamos ant grandininio transporterio ir juda iki surinkimo įrenginio. Pusgaminiai nuimami nuo lentynų ir perdedami ant siaurų konvejerio juostų šonu. Į vieną vietą surenkama po eilę pusgaminų ir jie pernešami įrenginiu ant degimo vagonėlių. Ant degimo vagonėlių sukraunama po 11 aukštų pusgaminų eilių. Vagonėliai įvežami į degimo krosnį. Degimo krosnis tunelinė, jos ilgis 110 m. Vienu krovimu ant vienos vagonėlių eilės telpa 32 tūkst. vnt. pusgaminų. Krosnyje vienu metu gali būti iki 18 vagonėlių eilių, tai sudaro 500 tūkst. plytų. Degimo trukmė 80–100 val. Nuo pradinės iki 700 oC temperatūros karštis keliamas laipsniškai, o vėliau temperatūros kėlimo greitis didinamas. Plytos degamos 1800 °C aukščiausioje degimo temperatūroje. Išdegtos plytos iš krosnies iškraunamos ir sudedamos ant padėklų, aptraukiamos polietileno plėvele ir transportuojamos į sandėlius.

8.4. Keramzito gamybos technologija

Keramzitas gaunamas, degant molį sukamosiose krosnyse 1 150 °C temperatūroje. Jis gaminamas iš molio, kuriame yra 6–12 % geležies oksidų, 2–3 % šarminių oksidų ir 1–2 % organinių priemaišų. Skylant molio komponentams ir degant organinėms priemaišoms, išsiskiriančios dujos išpučia iš dalies išsilydžiusį molį.

Esant didelei temperatūrai, krosnyje žaliavos gabaliukai išsipučia ir tampa lengvomis, porėtą struktūrą bei tvirtą lukštą turinčiomis granulėmis. Keramzitas gaminamas plastiškuoju ir šlapiuoju būdu. Keramzito gamybos technologinis procesas susideda iš šių pagrindinių technologinių operacijų:

- molio išgavimo ir gabenimo į sandėlius;
- formavimo masės paruošimo;
- granulių formavimo ir džiovinimo;
- degimo ir vėsavimo;
- frakcionavimo, sodrinimo, trupinimo;
- sandėliavimo.

Gaminant plastiškuoju būdu, iš išmaišyto gerai homogenizuoto molio ir priedų skylėtais volais formuojamos apie 2 cm dydžio granulės. Jos džiovinamos būgninėje džiovykloje ir degamos trumpoje (20–40 m) sukamojoje krosnyje (8.3 pav.).

8.3 pav. Principinė keramzito gamybos schema sukamojoje krosnyje:

- 1 – suformuotų granulių pakrovimas; 2 – sukamoji krosnis; 3 – degiklis;
4 – išpūstos keramzito granulės; 5 – karštų dujų srauto kryptis

Sukamosios krosnies skersmuo 2,5–5 m, jos pasvirimo kampas 3 %. Paruoštos keramzito pusfabrikačio granulės patenka į viršutinę sukamosios krosnies dalį, krosniai sukantis, jos pamažu slenka

korpusu žemyn. Apatinėje krosnies dalyje įtaisytas dujinio ar skysto kuro degiklis. Keramzito pusfabrikačio granulės, slinkdamos krosnies dugnu žemyn, patenka į vis aukštesnės temperatūros zoną, o patekusios į aukščiausios temperatūros zoną, esančią ties degikliu, išsipučia. Granulės sukamojoje krosnyje išpučiamos per 45 min.

Degant keramzito granules, temperatūra turi būti keliama greitai, nes keliant lėtai, dalis susiformavusių dujų iš granulių pasišalina, dar joms nepasiekus plastiškos būsenos. Tam, kad keramzito granulės greitai įkaistų iki išsipūtimo temperatūros, jos pirma paruošiamos – išdžiovinamos ir pašildomos. Šie paruošimo procesai vyksta laipsniškai, iš lėto. Suintensyvinus paruošimo procesus, keramzito pusfabrikačio granulės gali sutrūkinėti.

Granuliavimas – svarbi technologinė operacija, nes nuo granulių formos priklauso gaunamo keramzito kokybė ir savybės. Suformuotos granulės turi būti tankios, be įplyšimų ir nesulipti krosnyje.

Gaminant keramzitą plastiškuoju būdu, lengvai reguliuojama žaliavų sudėtis, formavimo masės klampa, granuliavimo ir degimo procesai.

Taikant šlapiąjį būdą, molis dumblintuvuose maišomas su vandeniu, ir gauta tyrelė (šlamas) leidžiama į sukamosios krosnies grandinių zoną. Prilipusi prie grandinių, tyrelė išdžiūsta, sukepa, išsipučia, ir taip susiformuoja granulės.

Esant nestabiliai krosnies temperatūrai ar nepakankamai degimo trukmei, keramzito granulės viduryje lieka neišdegusio molio, kuris, gavęs drėgmės, ima brinkti. Tai smarkiai sumažina tiek termoizoliacines, tiek stiprumines keramzito savybes. Taip pat labai svarbu, kad degimo metu nebūtų utilizuojamos chemijos pramonės atliekos. Jos dažniausiai naudojamos kaip išsipūtimą gerinantys priedai, tačiau tai turi didelę įtaką keramzito higieninėms savybėms.

9. KERAMINIŲ GAMINIŲ KOKYBĖS KONTROLĖ

Šiuolaikinis statybinės keramikos gamybos technologijų pagrindas yra kompiuterizuota visų technologinių operacijų ir vykdomų procesų kontrolė be valdymas. Tačiau konkrečių savybių ir funkcijų statybinių keraminių dirbinių gamyba išlieka priklausoma nuo naudojamo molio ypatumų, būtinųjų priedų ir pan.

Nuo 2005 m. gruodžio 1 d. LST 1272–92 standartą pakeitė naujas Europos EN 771–1:2003+A1:2005 standartas, pagal kurį keraminiai gaminiai pradėti skirstyti pagal tankį į dvi grupes: LD (kai keraminio dirbinio tankis $\leq 1000 \text{ kg/m}^3$ ir gaminiai skirti naudoti apsaugotame mūre) ir HD (kai keraminio dirbinio tankis $> 1000 \text{ kg/m}^3$); tokie gaminiai gali būti naudojami neapsaugotame mūre). Standartas – tai susitarimo pagrindu parengtas ir pripažintas, įstaigos patvirtintas dokumentas, nustatantis bendram ir daugkartiniam naudojimui tinkančias taisykles, bendruosius principus ar charakteristikas, skirtas įvesti optimalią tvarką tam tikroje srityje. Gaminiams, produktams ir paslaugoms įmonės gali taikyti Lietuvos standartus (LST) arba rengti įmonės standartus (IST). Įmonių veikloje pirmenybė turėtų būti teikiama Lietuvos standartams, kurie yra priimti, remiantis tarptautiniais ir Europos standartais.

Keraminiams mūro gaminiams pagal naujus standartus keliami griežtesni reikalavimai: reikia įvertinti bandymų tikslumą ir gamybos proceso nepastovumą, kad gamintojo deklaruojamų ir nustatomų, pavyzdžiui, tankio reikšmių skirtumas būtų ne didesnis kaip 5–10 %, o iš vienos siuntos paimtų keraminių mūro gaminių vidutinis gniuždymo stipris nebūtų mažesnis už deklaruojamąją gniuždymo stiprio vertę. Todėl įmonės vis atidžiau siekia kontroliuoti vykdomą technologinį procesą, maksimaliai kompiuterizuodamos gamybą ir diegdamos ISO–9001:2000/LST EN ISO 9001:2001 kokybės valdymo sistemą, kuria vadovaujantis, griežtai kontroliuojamas

kiekvienas gamybos etapas, pradedant gautų žaliavų tikrinimu ir baigiant itin tiksliau atsekamuoju dirbinių ženkliniu.

Keramikos gamybos įmonėse turi būti kokybės dokumentacija, kurioje iki smulkmenų aprašyti vykdomi technologiniai procesai, nustatytos įrenginių, pusgaminių ir gaminių charakteristikos, aprašytos darbuotojams privalomos kompetencijos, pareigos ir atsakomybė.

Gamintojas (arba jo atstovas) turi parodyti savo produkcijos ir LST EN 771-1+A1: 2005 standarto reikalavimų bei deklaruojamųjų savo produkto savybių atitikties, remdamasis:

- pradiniais bandymais;
- vidine gamybos kontrole.

Kokybės kontrolės efektyvumui padidinti diegiami ir statistiniai kontrolės metodai. Gauti duomenys naudojami defektų atsiradimo priežastims nustatyti ir sprendimams, kaip jas pašalinti, priimti.

Išskyrus pradinis bandymus ir ginčo atvejus, gali būti taikomi alternatyvūs bandymo metodai, jeigu jie atitinka tokius reikalavimus:

- gali būti nurodyta pamatinių ir alternatyviųjų bandymų rezultatų tarpusavio koreliacija;
- duomenys, kuriais ši koreliacija pagrįsta, yra laisvai prieinami.

Pradiniai bandymai. Pagaminus naujo tipo gaminį, prieš tiekiant į rinką, turi būti atlikti pradiniai bandymai, kurie patvirtina, kad gaminio savybės atitinka Europos standarto LST EN 771-1:2003+A1:2005 reikalavimus ir gamintojo deklaruojamas vertes. Atitikties kontrolė – tai veiksmai ir sprendimai, atliekami pagal iš anksto priimtas taisykles, siekiant patikrinti, ar gaminys atitinka techninius reikalavimus. Atitikties kontrolė – neatskiriama gamybos kontrolės dalis.

Pradiniai bandymai kartojami, kai atliekami esminiai gamybos proceso pakeitimai, galintys pakeisti gaminio savybes:

- pradinių žaliavų kilmė;
- žaliavų rūšis;
- dozavimas;
- džiovinimo laikas ar temperatūra;
- degimo laikas ar temperatūra ir kt.

Dažniausiai tikrinami tokie gaminių parametrai:

- matmenys;
- matmenų leidžiamosios nuokrypos;
- forma;
- tankis;
- gniuždymo stipris;
- šiluminės savybės;
- atsparumas šalčiui;
- vandens įmirkis;
- pradinis vandens įgerties greitis;
- aktyviųjų tirpiųjų druskų kiekis;
- brinkimas;
- segumas;
- sukibimo stipris.

Vidinė gamyba turi būti kontroliuojama nuolat. Gamybos kontrolės sistemą sudaro vidinės gamybos kontrolės procedūros, užtikrinančios patenkančio į rinką gaminio ir standartų reikalavimų bei deklaruojamųjų verčių atitiktį.

I kategorijos keraminių mūro gaminių gamybos kontrolės sistema turi būti suplanuota taip, kad tikimybė atitikti deklaruojamąjį gniuždymo stiprį pasiektų 95% pasiklivimo lygmenį.

Pirmiausia gamintojas nustato žaliavų priėmimo kriterijus ir procedūras, užtikrinančias tų kriterijų laikymąsi. Vadinasi, kiekvieną kartą tikrinamos žaliavų charakteristikos, ir jos turi reikalavimus

atitikti. Radus neatitikčių, žaliavos gražinamos ir į tolesnį technologinį procesą nepatenka.

Gamybos proceso kontrolė. Gamybos kontrolės sistema turi būti nusistovėjusi ir dokumentuota. I kategorijos keraminių mūro gaminių gamybos kontrolės sistema turi būti suplanuota taip, kad tikimybė atitikti deklaruojamąjį gniuždymo stiprį pasiektų 95 % pasiklovimo lygmenį. Nustatomos tinkamos įrangos ir gamybos proceso charakteristikos, pateikiamas kontrolės, tikrinimų ir bandymų dažnumas bei būtinos įrenginių ir darbų eigos vertės ar kriterijai. Po kiekvieno gamybos proceso vykdoma kontrolė, neatitinkantys reikalavimų pusgaminiai šalinami ir į tolesnį gamybos procesą nepatenka. Skaičiuojama, kiek procentų neatitikčių susidaro po kiekvieno technologinio proceso, priimami sprendimai, kaip jas šalinti.

Priemonės, kurių imamas, kai reikalavimai neįvykdomi, būtina nurodyti. Visi svėrimo ir matavimo įrenginiai turi būti kalibruoti. Būtina nurodyti kalibravimo procedūrą, dažnumą, kriterijus ir atsakingą asmenį.

Užbaigto gaminio bandymas. Vidinė gamybos kontrolė apima ėminio ėmimo planą ir užbaigto gaminio bandymų dažnumą. Ėminio ėmimo ir bandymų duomenis būtina užrašyti. Ėminių ėmimo ir bandymų dažnumas turi būti nustatytas, remiantis statistiniais metodais, ir užtikrinti, kad tam tikra produkcija atitinka minėto standarto atitikties kriterijus ir keraminių mūro gaminių deklaruojamąsias vertes.

Keraminių mūro gaminių skaičius (9.1 lentelė), reikiamas nustatyti reikalavimų atitiktį, turi būti atrenkamas atsitiktiniu būdu. Bandant nesugadinti gaminiai gali būti panaudoti kitiems bandymams.

Bandymo įrenginiai, turintys įtakos bandymo rezultatams, turi būti kalibruoti, o kalibravimo kriterijai užrašomi.

Kad galima būtų atsekti, kurioje technologinio proceso vietoje ir kuriuo metu įvyko gaminio neatitiktys, gaminiai žymimi ir dokumentuojami. Pirmiausia turi būti dokumentuota žaliavų ir naudojamų medžiagų atkartojamumo ir kontrolės sistema, tada gaminių kontrolės sistema. Svarbu kuo anksčiau pastebėti neatitiktis ir kuo greičiau jas pašalinti.

9.1 Lentelė. Bandymams reikalingų gaminių skaičius

Savybė	LD gaminiams	HD gaminiams
Matmenys	10	10
Tankis	10	10
Gniuždymo stipris	10	10
Šiluminė varža	5	5
Atsparumas šalčiui	5	5
Aktyvių tirpiųjų druskų kiekis	10	10
Vandens įmirkis	—	10
Sukibimo stipris	27	27

9.1. HD ir LD gaminių reikalavimai

Standarte LST EN 771-1 pateiktoje LD keraminių dirbinių apibrėžtyje teigiama, kad mažo tariamojo sausojo tankio keraminis dirbinys (sausasis tankis $< 1,0 \text{ g/cm}^3$) gali būti naudojamas tik apsaugotame mūre.

Keraminiai LD mūro dirbiniai turi atitikti tokius standarte išdėstytus pagrindinius punktus:

- matmenis ir jų vidutinės vertės leidžiamąsias nuokrypas;
- formą;
- tariamąjį sausąjį tankį ir leidžiamąsias nuokrypas;
- gniuždomąjį stiprį;

ir papildomus punktus:

- šiluminės savybės;
- atsparumo šalčiui klasę;
- aktyvių tirpiųjų druskų kiekį;
- brinkimą;
- degumą;
- vandens garų pralaidumą;
- sukibimo stiprį.

LD mūro dirbiniais gali būti:

- dirbiniai su vertikaliomis kiaurymėmis;
- dirbiniai su vertikaliomis kiaurymėmis ir įtarpui skiediniui;
- dirbiniai su vertikaliomis kiaurymėmis ir griebimo tuštyme;
- dirbiniai su vertikaliomis kiaurymėmis ir įlaidinio sujungimo sistema;
- dirbiniai su vertikaliomis kiaurymėmis (pertvarų sienoms);
- dirbiniai su horizontaliomis kiaurymėmis ir tinkavimo grioveliais;
- dirbiniai su horizontaliomis kiaurymėmis ir įtarpui skiediniui;
- dirbiniai, užpildomi betonu arba skiediniu;
- keraminiai mūro dirbiniai mūro plokštėms.

Keraminiai HD mūro dirbiniai turi atitikti tokius standarte išdėstytus pagrindinius punktus:

- matmenis ir jų vidutinės vertės leidžiamąsias nuokrypas;
- formą;
- gniuždomąjį stiprį;
- atsparumo šalčiui klasę;

ir papildomus punktus:

- tariamąjį sausąjį tankį bei neto sausąjį tankį ir jų leidžiamąsias nuokrypas;
- vandens įmirkį;
- pradinį vandens įgerties greitį;

- šiluminės savybės;
- aktyvių tirpiųjų druskų kiekį;
- brinkimą;
- degumą;
- vandens garų pralaidumą;
- sukibimo stiprį.

HD keraminiai mūro dirbiniai gali būti:

- pilnaviduriai;
- dirbiniai su įduba;
- dirbiniai su vertikaliomis kiaurymėmis.

Šiuo metu galiojantys keraminių mūro gaminių techniniai reikalavimai, pateikti 2003 m. įsigaliojusiame standarte LST EN 771-1, teigia, kad HD gaminių kokybė, norint pasiekti patenkinamą pastato ilgaamžiškumą, apibrėžiama tokiomis savybėmis, kaip atsparumas šalčiui bei tirpiųjų sulfatų kiekis. Šios savybės standarte susietos su naudojimo sąlygomis, įskaitant aplinkos poveikio laipsnį ir įmirkimo riziką. Standartas reglamentuoja, kad, vertinant veiksnius, lemiančius aplinkos poveikį (temperatūrą, drėgnumo sąlygas, agresyviųjų medžiagų buvimą) būtina naudotis vietiniu ir nacionaliniu patyrimu.

Keraminių mūro gaminių atsparumo šalčiui klasė turi būti deklaruota pagal mūro ar mūro elementų tinkamumą neardančioje (F0), vidutiniškai ardančioje (F1) ir stipriai ardančioje (F2) aplinkoje. Pastatų fasadams ir pamatams Lietuvoje turėtų būti naudojami produktai, pritaikyti stipriai ir vidutiniškai ardančiai aplinkai. Šiuo metu galiojantys standartai stipriai ir vidutiniškai ardančią aplinką apibrėžia taip: tai aplinka, kurioje esančias statybines konstrukcijas ir jos dalis veikia didelis vandens kiekis bei šaldymo ir atitirpinimo kaita, taip pat įvairios agresyvios medžiagos: ledą tirpinančios, jūros, chloringas arba gruntinis vanduo.

Šiuo metu atsparumas šalčiui turi būti vertinamas pagal numatomoje keraminių gaminių naudojimo vietoje galiojančius

nurodymus, o atitinkamas Europos standartas (atsparumo šalčiui nustatymo metodas) įsigalios vėliau. Toks nurodymas yra dabar Lietuvoje galiojantis standartas LST 1985:2006. Pagal jį fasaduose naudojamų keraminių mūro gaminių atsparumą šalčiui galima apibūdinti atsparumo šalčiui klasėmis. Atsparumo šalčiui klasė atitinka nurodytu metodu nustatytą skaičių šaldymo ir atitirpinimo kaitos ciklą, po kurių gaminiuose neatsiranda standarte apibūdintų suirčių (duobučių, kapiliarinių, paviršinių, skersinių įtrūkių, sluoksnių, žvyninių atsilupimų, atplaišų, atskilimų, lūžių, atsisluoksniavimų). Šiame standarte leidžiamas naudoti tiek tūrinis, tiek vienpusis atsparumo šalčiui nustatymo metodas. Pagal jį nustatyta atsparumo šalčiui charakteristika apibūdina keraminių mūro gaminių tinkamumą naudoti neardančioje (F.0), vidutiniškai ardančioje (F.1) ir stipriai ardančioje (F.2) aplinkoje. Keraminių mūro gaminių atsparumas šalčiui apibūdinamas 9.2 lentelėje nurodytomis atsparumo šalčiui klasėmis.

9.2 lentelė. Atsparumo šalčiui klasės pagal LST 1985:2006

Atsparumo šalčiui klasė	Ciklų skaičius, nustatant tūriniu šaldymo ir atitirpinimo kaitos metodu	Ciklų skaičius, nustatant vienpusiu šaldymo ir atitirpinimo kaitos metodu
F.0	15	0
F.1	25	15
	35	25
	50	35
	75	50
	100	75
F.2	—	100

Gamintojas gaminio etiketėje arba gaminį lydinčiuose prekės dokumentuose turi nurodyti ne tik atsparumo šalčiui klasę, ciklą

skaičių, bet ir bandymo metodą, pavyzdžiui *F2/100/vienpusis* žymimas gaminy, kurio atsparumas šalčiui buvo nustatytas vienpusiu šaldymo ir atšildymo metodu, atliekant 100 ciklų bandymą, priskiriamas F2 atsparumo šalčiui klasei. Aptartasis keraminių mūro gaminių atsparumo šalčiui nustatymo standartas galios, iki įsigalios atitinkamas Europos standartas, kurį šiuo metu rengia Europos standartizacijos komiteto (CEN) technikos komitetas CEN/TC 125 *Masonry (Mūras)*.

Naujais įsigaliosiančiame standarte pagrindinis dėmesys bus kreipiamas tik į keraminių mūro gaminių nustatymo rezultatus, gautus vienpusiu šaldymo ir atitirpinimo kaitos metodu.

9.2. Keraminių gaminių sertifikavimas ir ženklinimas

Pagaminus naujo tipo gaminį, prieš tiekiant į rinką, turi būti atlikti pradiniai tipo bandymai, patvirtinantys, kad gaminio savybės atitinka Europos standartų reikalavimus ir gamintojo deklaruojamas vertes. Siekiant konkuruoti rinkoje, parodant, kad gaminiai atitinka Europos standartų reikalavimus, gaminiai yra ženklinami CE ženklu. Ženkliname turi būti pateikta tokia informacija:

- sertifikavimo įstaigos atpažinimo numeris;
- gamintojo pavadinimas arba atpažinimo ženklas bei registracijos adresas;
- paskutiniai du ženklavimo metų skaičiai;
- EB atitikties sertifikato arba vidinės gamybos kontrolės sertifikato numeris;
- nuoroda į Europos standartą;
- gaminio aprašymas: pavadinimas, matmenys, numatytas panaudojimas ir kt.;
- informacija apie pagrindines charakteristikas.

10. EFEKTYVIOS KERAMIKOS STRUKTŪRINIŲ RODIKLIŲ VERTINIMAS

Statybinė keramika susideda iš kietosios medžiagos ir porų bei kapiliarų sistemos. Poros gali būti uždaros arba susisiekiančios ir atviros. Keramikos struktūrą galima vertinti skirtingais metodais. Dažnai naudojami porozimetrai porų dydžiui ir kiekiui įvertinti, mikroskopai, kuriais tiriama mikro- ir nanostruktūra. Nustatant ir apskaičiuojant struktūrinius rodiklius, galima naudoti ir paprastesnius struktūros tyrimo metodus. Šis struktūrinių rodiklių nustatymo metodas pagrįstas skysčių ir kapiliarinių jėgų sąveika. Dėl šios sąveikos skysčiai užpildo poringasias erdves, ir gali būti kiekybiškai įvertinamas tiek nelygus paviršius, tiek įvairaus pobūdžio ir dydžio defektai ar tiesiog pati poringoji erdvė.

Vandens įmirkis $W_h, \%$ – tai savybė įgerti skystį ir jį įgertą sulaikyti.

Šis rodiklis padeda įvertinti medžiagos poringumą, pagal jį keramika skirstoma į poringąją ir sukepusiąją. Jeigu vandens įmirkis, nustatytas po 72 val., mažesnis nei 5 %, gaunama sukepusioji keramika, jei didesnis už 5 % – poringoji.

Vandens įmirkis nustatomas atmosferiniame slėgyje (20 ± 5) °C temperatūros vandenyje.

Tyrimai gali būti atliekami su įvairiais keraminiais mūro gaminiais ar suformuotais iš atitinkamos masės ir išdegtais bandiniais. Jeigu bandymui pasirenkamos plytos, jos turi būti perpjaunamos per pusę ir džiovinamos iki pastovios masės, esant 110 ± 5 °C temperatūrai. Bandiniai aušinami eksikatoriuje su bevandeniu kalcio chloridu ir laikomi ten tol, kol bus tiriami, kad neįgertų vandens iš aplinkos. Prieš tyrimą bandiniai pasveriami elektroninėmis svarstyklėmis, ir nustatoma bandinio masė (m_0). Tada jie pamerkiami į vandenį bandinių sotinimo vandeniu vonioje (svarbu, kad neliestų dugno, jie turi būti padėti ant

specialių grotelių, kad iš visų pusių vandenį įgertų vienodai). Vandens lygis virš bandinių turi būti ne mažesnis nei 2 cm. Bandiniai vandenyje išlaikomi 72 ± 1 val. Tačiau naudinga bandinius pasverti po 5, 30, 60 min., 1, 2, 5, 24, 48 ir 72 val. mirkymo, kad galima būtų įvertinti vykstančius vandens migracijos procesus. Iš vonelės išimti bandiniai apšluostomi drėgnu audeklu ir pasveriami elektroninėmis svarstyklėmis (m_1). Tada pagal formulę apskaičiuojamas bandinių įmirkis normaliomis sąlygomis:

$$W_h = \frac{m_1 - m_0}{m_0}, \% \quad (10.1)$$

m_0 – išdžiovinto iki pastovios masės bandinio masė, g;

m_1 – įmirkyto bandinio masė, g.

Bandinio efektyvusis poringumas parodo efektyvių porų ir kapiliarų procentinį kiekį bandinyje. Jis skaičiuojamas pagal formulę:

$$W_e = \rho \frac{m_1 - m_0}{m_0} \cdot 100, \% \quad (10.2)$$

ρ – bandinio neto tankis, g/cm^3 .

Nustatyta, kad minimalus grubiosios keramikos eksploatacinis atsparumas šalčiui gaunamas, kai keraminės šukės efektyvusis poringumas nuo 24 iki 28 %. Išėjus už šių ribų, keramikos eksploatacinis atsparumas šalčiui išauga. Priimta, kad pagal efektyviojo poringumo reikšmę 26 % statybinės keramikos gaminiai skirstomi į dvi grupes dėl tikslesnio keraminių dirbinių eksploatacinio atsparumo šalčiui prognozavimo. Pirmą grupę, kai keraminių gaminių efektyvusis poringumas yra lygus arba mažesnis už 26 %. Šioje grupėje ilgaamžė keramika gaunama, kai keraminės šukės poringumas erdvės rezervas didesnis kaip 30 %, didelis struktūros

nevienalytiškumo laipsnis (> 2 vnt.), o kapiliarinis masės srauto greitis įgyja labai mažas reikšmes (iki $0,1 \text{ g/cm}^2$). Antra grupė, kai efektyvusis poringumas yra didesnis už 26% . Šioje grupėje ilgaamžė keramika gaunama, kai keraminės šukės poringos erdvės rezervas taip pat didesnis kaip 30% , mažas struktūros nevienalytiškumo laipsnis ($< 0,5$ vnt.), o kapiliarinis masės srauto greitis įgyja gana dideles reikšmes ($> 1 \text{ g/cm}^2$).

Kai kurie keraminės šukės struktūriniai rodikliai gali būti nustatomi kapiliarinio pasiurbimo būdu. Normaliomis sąlygomis gali būti nustatoma bandinių didžiausia ir mažiausia kapiliarinio pakilimo pagal sudrėkinimo frontą vertė h_{max} ir h_{min} (10.1 pav.). Norint nustatyti minėtus struktūrinius rodiklius, bandiniai džiovinami iki pastovios masės džiovykloje, esant $110 \pm 5^\circ\text{C}$ temperatūrai. Tada aušinami eksikatoriuje su bevandeniu kalcio chloridu ir ten laikomi tol, kol bus tiriami. Bandiniai darbine plokštuma žemyn sudedami ant padėklo su atramomis, kuris pripildytas vandens taip, kad pasirinkta bandinių plokštuma su juo kontaktuotų ($2\text{--}3 \text{ mm}$). Bandymo trukmė kontroliuojama sekundometru. Po 5 minučių ant kiekvieno bandinio pieštuku užfiksuojamas visų jo plokštumų sudrėkimo kontūras, ir bandiniai sudedami atgal ant padėklo. Po $30 \pm 1 \text{ min.}$ jie apšluostomi drėgnu audeklu ir pasveriami (m_2). Pasvėrus išmatuojamas anksčiau pieštuku užfiksuotas sudrėkimo kontūras h_{max} ir h_{min} pagal 10.1 paveiksle pateiktą pavyzdį. Šis rodiklis gali būti nustatomas po 5, 30, 60, 120 ir 300 min. Kapiliarinio pakilimo pagal drėkinimo frontą vertė yra struktūrinis rodiklis, parodantis efektyviųjų porų ir kapiliarų sąlyginį ilgį.

Struktūros netolygumui nustatyti naudojamas struktūros nevienalytiškumo laipsnio rodiklis, kuris apskaičiuojamas pagal formulę:

$$N = \frac{h_{max} - h_{min}}{h_{min}}, \text{ vnt} \quad (10.3)$$

10.1. pav. Sudrėkimo kontūro h_{max} ir h_{min} matavimo pavyzdys

h_{max} – didžiausia kapiliarinio pakilimo pagal drėkinimo frontą vertė, mm, nustatyta po 5 min.

h_{min} – mažiausia kapiliarinio pakilimo pagal drėkinimo frontą vertė, mm, nustatyta po 5 min.

Taigi struktūros nevienalytiškumo laipsnis leidžia įvertinti efektyviųjų kapiliarų struktūros netolygumą pagal jų ekvivalentinę ilgį ir yra svarbus eksploatacinio atsparumo šalčiui veiksnys.

Kitas svarbus struktūrinis rodiklis yra kapiliarinis masės srauto greitis, kuris parodo efektyviųjų porų ir kapiliarų sąlyginį skersmenį. Jis apskaičiuojamas pagal formulę:

$$g = \frac{m_2 - m_0}{S}, \text{ g/cm}^2 \quad (10.4)$$

m_0 – išdžiovinto iki pastovios masės bandinio masė, g;

m_2 – įsotinto kapiliarinio pasiurbimo būdu normaliomis sąlygomis šaldymo kryptimi bandinio masė, g.

S – bandinio darbinio paviršiaus plotas, cm^2 .

Struktūrinės bandinių savybės nustatomos ir vakuumavimo būdu (10.2 pav.). Atliekant ciklinį bandinių vakuumavimą, galima vertinti

jų bendrąjį atvirą poringumą. Bendrojo atviro poringumo rodiklis charakterizuoja visą atvirą susisiekiančią keraminio bandinio poringąją erdvę makrostruktūros ir mikrostruktūros aspektu.

Bandymas atliekamas su išdžiovintais bandiniais – jie dedami į eksikatorių ir vakuumuojami. Sistema vakuumuojama iki 1,92 – 2,22 kPa (–0,98 – –1,02 atm). Po 50–60 min. vakuumavimo eksikatorius pripildomas vandens taip, kad bandiniai būtų visiškai apsemti. 20–30 min. jie laikomi tokioje aplinkoje, o paskui į sistemą įleidžiama oro. Praėjus 20–30 min., sistema vėl vakuumuojama. Toks cikliškas procesas kartojamas keletą kartų. Pabaigoje sistema pripildoma oro, eksikatorius atidaromas, bandiniai išimami ir 24 valandoms perkeliama į vonią su vandeniu, kurio temperatūra $20 \pm 0,5$ °C. Išmirkius bandiniai pasveriami hidrostatinėmis svarstyklėmis, randama jų masė vandenyje m_3 , tada jie apšluostomi drėgnu audeklu ir pasveriami, randama jų masė ore m_4 . Masė m_3 reikalinga tikslesniam tūriui apskaičiuoti pagal formulę:

$$V = \frac{m_4 - m_3}{\rho_V} \quad (10.5)$$

m_3 – įmirkyto vakuume bandinio masė vandenyje, g;

m_4 – įmirkyto vakuume bandinio masė ore, g.

ρ_V – vandens tankis, g/cm³.

Atlikus šį tyrimą, galima nustatyti bendrąjį atvirą bandinio poringumą, kuris charakterizuoja visą atvirąją susisiekiančią keraminio bandinio poringąją erdvę makrostruktūros ir mikrostruktūros aspektu.

Bendrasis bandinio poringumas W_R apskaičiuojamas pagal formulę:

$$W_R = \frac{m_0}{V} \cdot \frac{m_4 - m_0}{m_0} \cdot 100, \% \quad (10.6)$$

10.2. pav. Bandinių vakuumavimo prietaiso schema: 1 – vakuuminis siurblys; 2 – bandiniai; 3 – vakuuminis eksikatorius; 4 – vakuuminė žarna; 5 – vakuuminis kranas; 6 – vakuumetras; 7 – vandens garų sugėriklis; 8 – indas su vandeniu

Žinant bendrojo atviro poringumo rodiklio vertę, galima įvertinti sąlyginį porų ir kapiliarų sienelės storio rodiklį, kuris nusako svarbią medžiagos struktūros ypatybę.

Sąlyginis porų ir kapiliarų sienelės storis D apskaičiuojamas pagal formulę:

$$D = \frac{100 - W_R}{W_R}, \text{ vnt.} \quad (10.7)$$

Vienas iš svarbiausių struktūrinių rodiklių, turinčių didelį poveikį keraminių gaminių ilgalaikiškumui atsparumo šalčiui aspektu, yra poringos erdvės rezervas. Šis rodiklis lemia tą bandinio poringosios erdvės dalį, kuri iš pradžių nėra užpildyta vandeniu, bet pamažu prisipildo ciklinių bandymų metu. Vanduo, veikiamas skirtingos temperatūros, keičia būseną ir ardo gaminį.

Kuo didesnę poringos erdvės rezervą gausime, tuo paprastai bus didesnis keraminio kūno tūrinis ir eksploatacinis atsparumas šalčiui.

Poringosios erdvės rezervas R_p apskaičiuojamas pagal formulę:

$$R_p = \left(1 - \frac{W_E}{W_R}\right) \cdot 100, \% \quad (10.8)$$

Bandinių sotinimas vakuume gali būti atliekamas ir kapiliarinio pasiurbimo būdu. Bandymui naudojami išdžiovinti iki pastovios masės $110 \pm 5^\circ\text{C}$ temperatūroje bandiniai. Jie vakuumuojami eksikatoriuje iki $1,92 - 2,22 \text{ kPa}$ ($-0,98 - -1,02 \text{ atm}$) $50-60 \text{ min.}$ Tada į sistemą įleidžiama tiek vandens, kad jis kontaktuotų su bandinio darbinio paviršiumi. Šis bandymo etapas turi vykti $10 \pm 1 \text{ min.}$, išlaikant sistemoje anksčiau minėtą vakuumavimo lygį, trukmė kontroliuojama sekundometru. Baigus bandymą, sistema priildoma oro, eksikatorius atidaromas, bandiniai pasveriami svarstyklėmis, ir randamos masės m_5 ir m_6 . Kapiliarinis masės srauto greitis vakuume šaldymo ir statmena šaldymo kryptiai apskaičiuojami pagal 10.9 ir 10.10 formules.

Kapiliarinis masės srauto greitis vakuume šaldymo kryptimi G_1 apskaičiuojamas pagal formulę:

$$G_1 = \frac{m_5 - m_0}{S}, \text{ g/cm}^2 \quad (10.9)$$

Kapiliarinis masės srauto greitis vakuume statmena šaldymo kryptiai G_2 apskaičiuojamas pagal formulę:

$$G_2 = \frac{m_6 - m_0}{S}, \text{ g/cm}^2 \quad (10.10)$$

11. STATYBINĖS KERAMIKOS ILGAAMŽIŠKUMAS PAGAL ATSPARUMĄ ŠALČIUI

Didžioji Lietuvos dalis yra drėgno klimato zonoje, o pajūryje – nuolat drėgno, kas dar labiau pablogina pastatų eksploatacijos sąlygas. Neretas vaizdas, ypač pajūrio zonoje, yra atsilupinęsios, atpleišėjusios ar ištrupėjusios gyvenamųjų ir pramoninių pastatų sienos. Gera, jei prarandamas tik estetinis vaizdas, tačiau pastatų konstrukcijų laikomoji galia, laikui bėgant, silpnėja, ir galiausiai sienos sugriūva.

Pagrindinė problema galima būtų įvardinti pastatų konstrukcijų ilgalaikiškumą. Dažniausiai irimas prasideda dėl mažo mūro gaminių atsparumo šalčiui, drėgmei ir korozijai. Pagrindiniai atmosferiniai reiškiniai, lemiantys išorinių sienų paviršiaus ilgalaikiškumą, yra saulės spinduliuotė, temperatūros svyravimai, oro drėgnumas, krituliai, vėjas, oro teršalai. Dėl šiluminės saulės spinduliuotės padidėja atitvarų paviršiaus temperatūra. Vasarą atitvaros išorinis paviršius gali įkaisti taip, kad jo temperatūra bus du ir daugiau kartų didesnė už aplinkos temperatūrą. Žiemą šiluminė saulės spinduliuotė sukelia atodrėkius. Temperatūros pokytis išoriniame apdailos paviršiuje gali siekti 50 °C per parą, todėl medžiagos gali pradėti irti dėl skirtingų temperatūrinių plėtimosi koeficientų, t. y., kai vienos medžiagos šildamos plečiasi daugiau, o kitos mažiau, ir dėl skirtingų tūrio pokyčių atsiranda plyšiai.

Dažnai pastatų sienos sudrėksta, lyjant įstrižajam lietu. Taip pat dažni atvejai, kai, atšilus orams žiemą, lietus papildomai drėkina sienas, sukeldamas pavojų staigaus atšalimo atveju. Tada išorinėje sienos pusėje, ledui plečiantis, tai yra, didėjant vandens tūriui, pereinant vandeniui iš skystos į kietą būseną ir vis didėjant ledo kiekiui, atsiranda įtrūkūs. Pasak mokslininkų V. Paukščio, R. Samajausko ir R. Bliūdžiaus, labiausiai išorinis atitvarų paviršius įmirksta ne tada, kai iškrinta gausios liūtys, bet tuomet, kai lyjant

pučia vėjas, o pastato paviršiai apiplaunami sukūriais. Konstrukcijų sudrėkimas priklauso ne vien nuo lietaus intensyvumo ir trukmės, bet ir nuo vėjo stiprumo bei krypties. Ypač kenkia gaminių ilgaamžiškumui rūgštūs lietūs. Be to, užterštame ore daug cheminių medžiagų, kurios chemiškai ir mechaniškai veikia išorinius apdailos sluoksnius. Lietuvos geografinė padėtis itin nepalanki tolimų užteršto oro pernašų požūriui, nes vyraujantys pietvakarių ir vakarų vėjai pučia nuo labiausiai užterštų Vakarų ir Vidurio Europos regionų.

Remdamiesi ilgamečiais pajūrio ir visos Lietuvos pastatų fasadų stebėjimais, mokslininkai nustatė, kad labiausiai suyra pastato sienos, eksploatuojamos vakarų ir pietvakarių zonose, tada – pietų, pietryčių ir rytų, o ilgiausiai nepakitę, be pastebimų irimo požymių išlieka pastatų fasadai, orientuoti šiaurės, šiaurės vakarų ir šiaurės rytų kryptimi. Tai galima paaiškinti tuo, kad pagal atliktus ilgamečius meteorologų tyrimus Lietuvoje vyraujantys vėjai yra vakarų ir pietvakarių krypties. Jų kartojimasis yra 17 % per metus, o pavyzdžiui, šiaurės rytų krypties – 8 %.

Ypatingą dėmesį reikia skirti konstrukcijų saugojimui nuo drėgmės, dengiant dvišlaičius su pailgintais kraigais stogus. Tai būtų svarbu ne tik statant naujus namus, bet ir renovuojant senus, statant papildomus aukštus ir pan.

Keraminių gaminių irimo pobūdis priklauso ir nuo vidinės porų bei kapiliarų struktūros. Jeigu keraminiame kūne daugiausia didelio spindulio kapiliarų, drėgmė gali migruoti pagal ir prieš šilumos srautą. Kadangi dideliuose kapiliaruose vandens užšalimo tikimybė reali, tai bendras viršslėgis priklausys nuo drėgmės migracijos prieš šilumos srautą galimybių ir dėl to bus skirtingas. Suprantama, jog tūrinio šaldymo atveju, kai kapiliarai dideli, vanduo paviršiniuose sluoksniuose sparčiai užšąla, ir vandens migracija prieš šilumos srautą ribojama. Vienpusio šaldymo atveju, kai palengva užšąla tik vienas paviršius, o ledo srautas sklinda gilyn į bandinį, drėgmės migracija šaldymo kryptimi neribojama. Atsižvelgiant į tai, galima

tikėtis, jog greičiau suirs tie bandiniai, kurie šaldomi iš visų, o ne iš vienos pusės.

Kai keraminiame dirbinyje vyrauja kapiliarai su mažu spinduliu, vandens užšalimo juose tikimybė mažesnė, procesas lėtesnis, o migracija vyksta šilumos nukreipimo kryptimi. Darydami prielaidą, kad abiem šaldymo atvejais vandens kiekis bandiniuose yra vienodas, matyti, jog galima tikėtis skirtingų jo sankaupų šaldomuose paviršiniuose sluoksniuose. Vienpusio šaldymo atveju tikėtina didesnė sankaupa dėl vienpusio kryptinio srauto, o tūrinio šaldymo atveju – mažesnė, nes vanduo migruos ir išsiskirstys visų šaldomo bandinio paviršių link. Dėl to tikimybė, kad tokie bandiniai turės didesnę atsparumą šalčiui tūrinio šaldymo atveju, palyginti su vienpusiu, yra didesnė. Tačiau minėti teoriniai dėsningumai, kai bandinių destruktiją vertiname pagal paviršiaus suirimo požymius, greičiausiai būtų būdingi idealiai (pagal mikro- ir makrostruktūrą) keramikai. Iš tikro tai sunkiai tikėtina, kadangi skiriasi gaminių struktūra. Tai lemia skirtingas lokalines vandens sankaupas paviršiuose ir visą viršslėgį. Taigi keraminio kūno destruktijos priežastys yra kryptingas skirtingos fazinės būsenos vandens (skysčio, garų, plastiško ledo) judėjimas porų, kapiliarų ir defektų erdvėje. Dėl tokio judėjimo po tam tikro laiko šaldomame kūno paviršiuje atsiranda suirimų.

Eksplotacinį atsparumą šalčiui, kaip fasadinės keramikos fizikinį rodiklį, galima apibūdinti jos geba pasipriešinti defektų prisipildymui vandens dėl migracijos procesų. Nustatyta, kad, naudojantis tūrinio šaldymo metodika, galima išbrokuoti faktiškai gerą produkciją – arba atvirkščiai. Todėl tūrinio šaldymo ir atšildymo metodo siūloma atsisakyti kaip neatspindinčio procesų, vykstančių gamtinėmis (eksplotacinėmis sąlygomis).

Lietuvoje šiuo metu galiojantis keraminių mūro gaminių atsparumo šalčiui įvertinimo standartas leidžia nustatyti ne tik vienpusį atsparumą šalčiui, kuris imituoja sienų eksploatacijos sąlygas, bet pasirinktinai gali būti nustatomas ir tūrinis atsparumas

šalčiui. Labai svarbu, kad į rinką tiekiami gaminiai atitiktų konkrečios šalies klimato ypatumus. Lietuvos klimato sąlygomis gaminiai, skirti naudoti stipriai ardančioje aplinkoje (pavyzdžiui, pajūrio zonoje, kur drėgna ir vyrauja minusinės temperatūros), turi atlaikyti ne mažiau kaip 300 ciklų, nustatytų vienpusiu šaldymo būdu pagal šiuo metu galiojantį standartą. Lietuvoje atliktais ilgamečiais keraminių plytų tyrimais buvo nustatyta, kad, atšildant bandinius, surinktame mūro fragmente būtina drėkinti darbinį paviršių ne mažiau kaip 8 valandas.

Mūsų klimato zonoje būtų svarbu įvertinti pastatų orientaciją pagal pasaulio šalis, nes atlikti ilgamečiai tyrimai rodo, kad sienų orientacija pasaulio šalių atžvilgiu turi labai didelę įtaką jų ilgaamžiškumui. Todėl siūloma gaminius skirstyti pagal eksploatacijos sąlygų kategorijas. Jei gaminiai numatomi naudoti tik vidinėms sienoms, jų atsparumo šalčiui deklaruoti nebūtina. Jei keraminiai dirbiniai bus iš dalies apsaugoti nuo tiesioginio atmosferinių kritulių ant jų patekimo, tai atsparumo šalčiui klasė priklausomai nuo orientacijos pasaulio šalių atžvilgiu svyruos nuo 5 iki 75. Keraminiams apdailos gaminiams, naudojamiems fasadams, ir jų elementams, neapsaugotiems nuo atmosferinių kritulių, būtų skiriamos dvi klasės: dirbiniams, skirtiems mūryti šiaurės kryptimi, 100 klasė, o rytų, pietų ir vakarų kryptimis – 125. Bandinių atsparumą šalčiui siūloma vertinti suirusiu paviršiaus plotu. Jei apdailos paviršius suardomas daugiau nei 3 %, partija turi būti priskiriama žemesnei, nei numatyta, atsparumo šalčiui klasei. Paprastai tokie keraminiai gaminiai pasižymi mažu poringumu.

Mažo poringumo keraminės plytos gali būti naudojamos apdailintame arba neapdailintame bei tinkuotame mūre, inžinerinių statinių ir laikančiąjame mūre vidutiniškai ardančioje ir stipriai ardančioje aplinkoje (F II ir F III klasės pagal gaminių panaudojimo sąlygas pateikta LST 1413.12:1998 „Statybinis skiedinys. Bandymo metodai. Tinko ir kitokios apdailos atsparumo šalčiui nustatymas vienpusio šaldymo būdu“). Pagal reikalavimus F II kategorijos

apdailai būtina išlaikyti 75 ciklus vienpusiu šaldymo ir atitirpinimo metodu, o F III kategorijai – 125 ciklus. Jei mažo poringumo keramika bus naudojama grindiniams grįsti, tai pagal standartą LST 1428.19:1998 „Betonas. Bandymo metodai. Atsparumo šalčiui nustatymas vienpusio šaldymo būdu“ vidutiniškai ardančioje aplinkoje esantys gaminiai priskiriami II ilgaamžiškumo kategorijai. Tokios ilgaamžiškumo kategorijos gaminių atsparumas šalčiui turi būti ne mažesnis kaip 75 ciklai vienpusiu šaldymo ir atitirpinimo būdu, o III ilgaamžiškumo kategorijai priskiriamų gaminių atsparumas šalčiui – ne mažesnis kaip 150 ciklų.

Įrodyta, kad vienpusis šaldymo ir atitirpinimo bandymo metodas modeliuoja plytų eksploatacijos sąlygas mūre. Anksčiau galiojęs LST 1272–92:1992 standartas reglamentavo, kad pajūrio kraštui skirti išorės sienų mūro plytų atsparumas šalčiui būtų nustatomas tik vienpusio šaldymo ir atitirpinimo būdu. Šiuo metu galiojantys keraminių mūro gaminių techniniai reikalavimai pateikti 2003 metais įsigaliojusiam standarte LST EN 771-1 teigia, kad HD gaminių kokybė, norint pasiekti patenkinamą pastato ilgaamžiškumą, yra apibūrinama tokiomis savybėmis, kaip atsparumas šalčiui bei tirpiųjų sulfatų kiekis. Šios savybės standarte yra susietos su naudojimo sąlygomis, įskaitant aplinkos poveikio laipsnį ir įmirkimo riziką. Standartas reglamentuoja, kad, vertinant veiksnius, lemiančius aplinkos poveikį (temperatūrą, drėgnumo sąlygas, agresyvių medžiagų buvimą) būtina naudotis vietiniu ir nacionaliniu patyrimu. Keraminių mūro gaminių atsparumo šalčiui klasė turi būti deklaruota pagal mūro ar mūro elementų tinkamumą neardančioje (F0), vidutiniškai ardančioje (F1) ir stipriai ardančioje (F2) aplinkoje.

Kaip jau anksčiau buvo minėta, keraminė šukė yra poringa medžiaga, o jos atsparumas šalčiui – fizikinė savybė, rodanti medžiagos sugebėjimą išlaikyti tam tikras nustatytas fizikinių parametrų ribas (stiprį gniuždant, masę, matmenis ir kt.), kai ji po pradinio įmirkio vandenyje yra pakaitomis šaldoma ir atitirpinama. Klasikinis tūrinio šaldymo ir atitirpinimo metodas nepakankamai

atskleidžia šią keraminės medžiagos savybės fizikinę prasmę. Keraminės medžiagos, esančios pastato išorėje, ilgaamžiškumą apibūdina eksploatacinis atsparumas šalčiui. Remiantis žinomomis teorinėmis prielaidomis, eksploatacinį atsparumą šalčiui galima apibūdinti kaip poringo kūno laipsniško dispergavimo procesą, nulemtą judėjimo reiškiniu. Destrukcijos priežastis yra vandens ir plastiško ledo judėjimas poringoje medžiagoje (11.1 pav.). Pasipriešinimą destrukcijai lemia gaminių struktūros ypatybės.

11.1 pav. Keraminių gaminių destrukcijos pavyzdys

Nevienalyčių ir anizotropinių statybinės keramikos gaminių, turinčių savo tūryje diskretines defektines zonas, besikeičiančias su tam tikro dispersiškumo poromis ir kapiliarais, suirimas vyksta pagal labiausiai tikėtiną suirimo mechanizmą, aprašomą termodinaminiais dėsniais.

Pirmame etape vandeniu užpildomos atviros poros ir kapiliarai. Šaldant bandinius vienpusiu šaldymo ir atitirpinimo būdu, vanduo migruoja šilumos srauto kryptimi, taigi užsipildo diskretinės defektinės zonos, kuriose lengviausiai susidaro ir auga ledo kristalai. Toliau šaldant ir atitirpinant bandinius vienpusiu būdu, veikiant

vandeniui, didėja vandens kiekis ir visiškai užpildo defektines paviršines zonas, didėja įtempimai ir deformacijos, kuriems veikiant, vystosi vidiniai struktūriniai suirimai. Tokiu būdu susijungia diskretinės defektinės zonos ir įtrūkiai. Dėl to mažėja lokalinis stipris. Vystosi frontalinis paviršinis gaminių apdailinio sluoksnio suirimas. Gaminių suirimo pavyzdys pateiktas 11.2 paveiksle.

11.2 pav. Gaminių esančių mūro konstrukcijoje suirimo pavyzdys

Paviršiaus suirimo pobūdis, greitis ir tolesnis jo plėtimasis priklauso nuo defektinių zonų pasiskirstymo tūryje, jų dydžio ir orientacijos, vyraujančių porų ir kapiliarų dispersiškumo, įskaitant ir rezervines poras, taip pat nuo drėkinimo sąlygų ir temperatūrinio vienpusio šaldymo ir atitirpinimo režimo, nuo kurio priklauso tam tikri maksimalių įtempimų ir deformacijų poslinkiai.

Eksplotacinis keraminių gaminių atsparumas šalčiui ypač priklauso nuo jų porų ir kapiliarų erdvės užpildymo vandeniu laipsnio arba likusios poringosios rezervinės erdvės. Vienas iš rodiklių, labiausiai charakterizuojančių porų ir kapiliarų užpildymu vandeniu laipsnį, yra keraminės šukės įmirkis. Šukės įmirkis

nustatomas keliais būdais: mirkant gaminius 24 valandas arba juos virinant 4 valandas. Pagal atliktus tyrimus tikslesnė gaminių charakteristika gaunama, bandinius mirkant 72 valandas, įmirkis virinant gaunamas, juos mirkant 20 valandų vandenyje ir dar papildomai virinant 4 valandas. Gaminių įmirkis vakuumuojant gaunamas, naudojant specialią metodiką, aprašytą 10 skyriuje.

Pradėjus gaminius cikliška vienpusiu būdu šaldyti ir atitirpinti, pavojingose – dažniausiai paviršinėse – gaminio vietose atsiranda žymūs įtempimai ir deformacijos, kurios vystosi ir plečiasi, iki pasirodo pirmieji irimo požymiai. Atliekant tolesnius eksploatacinio atsparumo šalčiui bandymus, keraminio gaminio šaldomas paviršius visiškai suyra.

Paprastos ir klinkerinės plytos, naudojamos fasaduose, turi ir skirtingą vandens absorbciją per apdailinį sluoksnį: paprastos plytos absorbuoja $23 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0,5}$, o klinkerinės – tik $3 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0,5}$. Įrodyta, kad ši lengvai bandymų metu nustatoma struktūrinė charakteristika smarkiai lemia keramikos gaminių atsparumą šalčiui.

12. EFEKTYVIOS KERAMIKOS SAVYBIŲ PRIKLAUSOMYBĖ NUO DŽIOVINIMO IR DEGIMO REŽIMŲ

Suformuotuose keraminiuose pusgaminiuose visada yra drėgmės, kurią prieš degant reikia pašalinti. Džiovinimo procesas turi užtikrinti pakankamą pusgaminių stiprumą, kad degimo krosnyse juos būtų galima dėti vieną ant kito. Be to, džiovinimo metu turi pasibaigti keraminių bandinių tūrio pokyčiai, susiję su drėgmės pašalinimu, kad neatsirastų defektų: plyšių, įtrūkių, nuskilimų ir t. t.

Žinoma, kad labiausiai statybinės keramikos kokybę lemia parinkta formavimo masės sudėtis ir degimo režimas. Šia kryptimi dirba dauguma Lietuvos ir užsienio mokslininkų, tačiau taip pat didelį dėmesį reikėtų skirti ir keraminio pusgaminių džiovinimo etapui, nes netinkamas keraminių pusgaminių džiovinimas gali būti pagrindinė defektų atsiradimo priežastis.

Pagal standartą molio savybė sutrūkinėti džiūstant vadinama džiovinimo jautrumu, ir pagal šią savybę molis skirstomas į tris grupes:

- labai jautrų;
- vidutiniškai jautrų;
- mažai jautrų.

Molio džiovinimo jautrumas mažėja, mažėjant molyje kaolinito mineralų kiekiui. Kad molio gaminiai būtų kokybiškesni į formavimo mišinį dedama smėlio (0,05–5 mm smulkumo), kuris ir sudaro molio masės skeletą bei neleidžia moliui smarkiai susitraukti džiovinant ir degant keraminius gaminius.

Mokslininkai nustatė, kaip keramikos pusgaminių savybės priklauso nuo medžiagos drėgnumo ir džiovinimo laiko. Jie parodė, kad kuo medžiaga sausesnė, tuo ir džiovinama bus ilgiau (tris ir daugiau parų, esant maksimaliai džiovinimo temperatūrai apie 100 °C), ir jos mechaninis stipris bus didesnis. Pavyzdžiui, kai

medžiagos drėgnumas lygus 5 %, gaunamas stipris – 0,5 MPa, o kai medžiagos drėgnumas apie 1 %, nagrinėjamos keramikos stipris – 1,6 MPa.

Nustatyta, kad parinkta maksimali džiovinimo temperatūra (džiovinta, esant 5, 25 ir 60 °C temperatūrai) turi didelį poveikį keramikos kristalizacijos būdai ir galutinės struktūros vienodumui. Vienodžiausia bandinių struktūra buvo gauta, džiovinant keraminius pusgaminius aukščiausioje, 60 °C temperatūroje.

Aukščiausia kritinė džiovinimo temperatūra yra 150 °C, o džiovinant keraminius pusgaminius aukštesnėje temperatūroje, dėl susidariusių medžiagoje vidinių įtempių atsiranda vis daugiau defektų, bandinys sutrūkinėja net nepradėjus degti.

Kituose moksliniuose darbuose buvo parodyta, kaip keraminių pusgaminių džiovinimo temperatūra lemia galutinio keraminio dirbinio kokybę. Džiovinta buvo esant 30, 50, 60, 70, ir 80 °C temperatūrai. Nustatyta, kad kokybiškiausi, įgyjantys didžiausią stiprumą (stipris kito apytiksliai nuo 2 iki 6 MPa) keraminiai dirbiniai gaunami, džiovinant pusgaminius 70–80 °C temperatūroje. Buvo nagrinėta maksimalios džiovinimo temperatūros įtaka keraminės šukės kokybei ir iširta, kaip kinta gaminio defektiškumas 10–150 °C maksimalios džiovinimo temperatūros intervale. Nustatyta, kad keraminius pusgaminius geriausia džiovinti 20–110 °C temperatūroje. Pagal minėtų darbų autorių tyrimų išvadas, iš pradžių keraminius pusgaminius reikėtų džiovinti ne mažiau kaip parą 20 °C temperatūroje, tada 6 valandas 60 °C ir dar 24 valandas 110 °C maksimalioje džiovinimo temperatūroje. Tada dirbinys džiūsta tolygiai, nesusidaro akimi matomų plyšių, todėl keraminius pusgaminius reikėtų džiovinti 85 °C temperatūroje 11 valandų ir vėliau iki pastovios masės 100 °C temperatūroje.

Vienas iš pagrindinių technologinių faktorių, lemiančių plytų ilgaamžiškumą pagal atsparumą šalčiui, yra tinkamai parinktas degimo režimas: temperatūros kėlimo greitis, aušinimo greitis, maksimalios degimo temperatūros ir išlaikymo šioje temperatūroje

parinkimas. Maksimalios degimo temperatūros pasirinkimas priklauso nuo mineraloginės žaliavos sudėties, lydymosi temperatūros ir sukepimo intervalo, žaliavos paruošimo kokybės, krosnies parametrų, kurioje išdegami gaminiai, ir degimo trukmės. Svarbu, kad išdžiovinti gaminiai, pateikiami degimui, turėtų minimalų įtrūkų kiekį, nes pagrindinis įtrūkų susidarymo momentas plytose yra pusgaminių džiovinimas.

Neretai didinant degimo temperatūrą, didėja keraminės šukės gniuždymo stipris, mažėja jos efektyvus poringumas. Tačiau tai vyksta iki tam tikros ribinės temperatūros, keliant temperatūrą ir toliau gaminiai deformuojasi, apsilydo, gaunamas degimo niekalas. Pasak mokslininkų, didėjant degimo temperatūrai nuo 900 iki 1150 °C, gniuždymo stipris padidėja 10 MPa. Efektyvus poringumas, didinant maksimalią degimo temperatūrą, tolygiai mažėja iki 4 kartų. Vidutinis porų ir kapiliarų spindulys, padidinus temperatūrą nuo 900 iki 1050 °C, padidėja 2 kartus. Šio rodiklio sumažėjimas ryškus, toliau keliant temperatūrą nuo 1100 iki 1150 °C. Taip nežymiai pakėlus temperatūrą, vidutinis porų ir kapiliarų spindulys sumažėja ~ 4 kartus. Didžiausias gniuždymo stipris būna išdegus 1100 °C maksimalioje degimo temperatūroje. Tačiau šias priklausomybes autoriai nustatytė nagrinėdami konkretų molį.

Pagal kitų autorių atliktus darbus, degimo temperatūros įtaka ryškiai jaučiama, išdegus tas formavimo mases, kuriose naudojami priedai. Pavyzdžiui, lauko špato, geležies oksido (Fe_2O_3), kvarco priedas daro didesnę įtaką keraminės šukės savybėms, jei formavimo masė degama aukštesnėje, nei įprasta, temperatūroje.

Išnagrinėjus degimo temperatūros poveikį aliumosilikatinėms medžiagoms, galima apibendrinti, kad, kaitinant miltelių pavidalo mišinius, pradinių kristalinių medžiagų tūris didėja. Didėjant temperatūrai, didėja ir kristalų susilietimo paviršius, atsiranda tarpkristalinė difuzija, lydima grūdelių kristalinės zonos padidėjimo ir mišinio poringumo sumažėjimo. Sudaromos sąlygos cheminių reakcijų vyksmui, atsiranda kieta fazė ir poros, palengvinančios

reaguojančių medžiagų difuziją ir jų cheminius virsmus. Šias sukepimo procesų stadijas, nagrinėdami sukepimo procesus, išskiria ir kiti autoriai.

Tam tikrose kaitinimo temperatūrose susidariusios skystos, o kartais ir dujinės fazės yra svarbūs faktoriai, lemiantys cheminių virsmų greitį ir mechanizmą. Naujai susidarę cheminiai junginiai su tankesniu atomų išsidėstymu kristale nei pradinėje medžiagoje yra reaguojančio mišinio susitraukimo priežastis – jei atomai išsidėstę ne taip tankiai, mišinys plečiasi. $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ir $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ junginių susidarymas iš pradinių oksidų sukelia mišinio išsiplėtimą, o $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ – susitraukimą. Taigi kristalų gardelės parametru kitimas dėl polimorfinių virsmų yra medžiagos išsiplėtimo ar susitraukimo priežastis. Kylant temperatūrai, didėjant kristalų, kontaktiniam paviršiui stiprėja miltelių pavidalo mišinio ryšiai, ir susidaro porėta sukepusi keraminė šukė. Šukės kontaktinio paviršiaus padidėjimas padidina jos tankį ir sumažina poringumą. Minimalaus poringumo šukė vadinama klinkeriu. Atsiradus ir didėjant skystos fazės kiekiui šukėje, ji suminkštėja. Toliau kaitinant išsilydo. Normalioje sukepimo procesų eigoje šukėje neturi atsirasti per didelis skystos fazės kiekis, o tuo labiau susidaryti lydalas.

Temperatūriniu sukepimo intervalu vadinamas tas temperatūrų intervalas, kuriame mišinio cheminiai virsmai pasibaigia, o auga tik susidarę kristalai, ir šukė tankėja. Šiame temperatūrų intervale šukė pasižymi fazinės sudėties pastovumu. Reikia pažymėti, kad, norint gauti kokybišką pagal sudėtį ir struktūrą keraminę šukę, svarbi išlaikymo trukmė aukščiausioje degimo temperatūroje. Nustatyta, kad, sukepinant mišinį temperatūroje, artimoje šukės susitraukimo pradžiai, išlaikymas tokioje temperatūroje turėtų būti 2 kartus ilgesnis nei tokioje, kurioje šukė intensyviai traukiasi, ir 4 kartus ilgesnis nei tokioje, kurioje šukė pradeda minkštėti.

Pagal autorių atliktus tyrimus su skirtingos sudėties formavimo masėmis, matyti, kaip kinta skirtingose temperatūrose išdegtos keraminės šukės fazinė sudėtis. Nagrinėjant Lietuvos teritorijoje

esančius molius, matyti, kad devoninio tipo molyje nuo 1000 iki 1100 °C pakėlus degimo temperatūrą, kvarco kiekis sumažėja 9 % (nuo 40 iki 31 %). Nuo 14 iki 3 % sumažėja lauko špatų kiekis, hematito kiekis padidėja nuo 2 iki 6 %. Amorfinės fazės kiekis padidėja nuo 33 iki 57 %.

Degimo režimas – vienas iš svarbiausių keramikos gamybos technologinio proceso etapų. Nuo jo parinkimo labai priklauso galutinės keraminio dirbinio savybės, ypač stipris, poringumas, tankis, vandens įmirkis, atsparumas cheminiam poveikiui. Išdegus skirtingais režimais tos pačios sudėties formavimo masės bandinius, galima gauti poringąją arba sukepusiąją keramiką. Į poringąją arba sukepusiąją keramiką dirbiniai skirstomi pagal jų vandens įmirkį, kuris charakterizuoja ir galutinio keraminio gaminio efektyvųjį poringumą.

Poringoji keramika naudojama statybinėse konstrukcijose, kurios turi būti ne tik stiprios, bet ir maksimaliai nelaidžios šilumai bei pakankamai lengvos. Sukepusioji keramika naudojama didelio stiprumo konstrukcijoms, atsparioms atmosferiniams bei cheminiams veiksniams, taip pat konstrukcijoms, atsparioms dilimui. Pagal naują standartą poringąją keramiką iš dalies apibūdina LD pavadinimo gaminiai, o sukepusiąją – HD tipo.

Sukepimo greičiui didžiausią įtaką turi galutinė maksimali degimo temperatūra. Todėl daug Lietuvos ir užsienio mokslininkų stengiasi rasti galutinių keramikos savybių ir maksimalios degimo temperatūros priklausomybę.

Buvo parodyta, kaip išlaikymo maksimalioje (880–930 °C) temperatūroje laikas (tirta nuo 0 iki 5 valandų, kas vieną valandą) lemia keramikos iš molio, kuriame yra 10 % aliuminio oksido, (suformuotos, naudojant trijų skirtingų stiklo rūšių priedą: A, B, C) stiprį, tankį ir poringumą. Nustatyta, kad, neišlaikant pusgaminių maksimalioje temperatūroje, gaunamas dirbinys su mažų porų struktūra ir 30 MPa stipriu. Sukepinant keraminius pusgaminius 5 valandas 930 °C temperatūroje, jau susidaro volastonito mineralai,

poros didėja, dirbinio stipris siekia 90 MPa. Tankis, naudojant B ir C rūšies stiklą, ilginant sukepimo intervalą, didėja, o naudojant A rūšies stiklą, iki trijų valandų išlaikymo beveik nekinta, o išlaikant maksimalioje temperatūroje ilgiau kaip 3 valandas, pradeda mažėti.

Mokslininkai yra ištyrę, kaip nuo maksimalios degimo temperatūros priklauso tokios galutinio keraminio gaminio savybės: tankis, bendrasis susitraukimas, vandens įmirkis ir stipris. Nustatyta, kad, pakėlus degimo temperatūrą nuo 750 iki 950 °C, keraminės šukės tankio reikšmės padidėja iki 11 %, bendrojo susitraukimo – iki 56 %, stiprio – iki 75 %, o vandens įmirkio reikšmės sumažėja iki 8 %. Kiti mokslininkai nustatė, kad, pakėlus maksimalią degimo temperatūrą nuo 800 iki 900 °C, tankio reikšmės padidėja 10 %, bendrojo susitraukimo – 5 %, stiprio – 80 %, o vandens įmirkio reikšmės sumažėja nuo 25,61 iki 0,64 %. Buvo parodyta, kad, pakėlus maksimalią degimo temperatūrą nuo 700 iki 800 °C bendrojo susitraukimo, tankio ir stiprio reikšmės pakinta nežymiai. Pavyzdžiui, bendrasis susitraukimas padidėjo 3 %, tankis sumažėjo 1 %, tik stipris padidėjo iki 25 %. Mokslininkai teigia, kad keramikos tankis ir stipris didėja, keliant temperatūrą tik iki tam tikros ribos. Pagal jų atliktus tyrimus, medžiagos tankio ir stiprio reikšmės didėja, keliant degimo temperatūrą nuo 900 iki 1100 °C (tankio reikšmės padidėja nuo 1800 iki 2200 kg/m³, stipris – nuo 10 iki 26 MPa) ir minėtų rodiklių reikšmės pradeda mažėti keliant maksimalią degimo temperatūrą nuo 1100 iki 1200 °C (tankio reikšmės sumažėja nuo 2200 iki 2000 kg/m³, stipris – nuo 26 iki 22 MPa). Atvirkštinės priklausomybės buvo nustatytos vandens įmirkio rodikliui, išdegus bandinius 900 °C temperatūroje, nustatytas vandens įmirkis 17 %, o 1100 °C temperatūroje – 4 %, 1200 °C temperatūroje – 8 %. Mokslininkai, tirdami keraminės šukės savybes iš kitokių žaliavų (naudodami sunkiai lydžią formavimo mišinio sudėtį), parodė, kad ir pasiekus 1200 °C temperatūrą, minėtų savybių kitimo tendencijos išlieka tokios pat kaip ir 900–1100 °C temperatūrų intervale. Imdami

panašų intervalą (nuo 800 iki 1100 °C), tyrimus atliko ir kiti autoriai. Jie patvirtino, kad, keliant degimo temperatūrą iki 1100 °C (nagrinėta temperatūra 875, 950, 1025, 1100 °C), gausime didesnes keraminio dirbinio tankio (tankis kito nuo 1200 iki 2300 kg/m³), bendrojo susitraukimo (nuo 6 iki 16 %) ir stiprio reikšmės (nagrinėtos sudėties keramikai nuo 5 iki 69 MPa) bei mažesnes vandens įmirkio reikšmės (nuo 23 iki 0,5 %).

Mokslininkai nagrinėjo keraminės šukės fizikinių rodiklių kitimą aukštesnės temperatūros intervale (1170–1300 °C). Išdegus keraminius pusgaminius, esant maksimaliai 1250 ir 1300 °C degimo temperatūrai, buvo atlikti rentgenografiniai tyrimai, iš kurių matyti, kad susidaro daug mulito ir α – aluminato, o esant 1300 °C temperatūrai, jau matomos ir hercinito smailės. Nustačius bandinių fizikines savybes, gauta, kad bendrasis poringumas kito nuo 33 (išdegus, esant maksimaliai 1170 °C temperatūrai) iki 13 % (išdegus, esant maksimaliai 1300 °C temperatūrai), tankio reikšmės – nuo 1300 (išdegus, esant maksimaliai 1170 °C temperatūrai) iki 2940 kg/m³ (išdegus, esant maksimaliai 1300 °C temperatūrai), vandens įmirkio reikšmės – nuo 39,5 (išdegus, esant maksimaliai 1170 °C temperatūrai) iki apytiksliai 0 % (išdegus, esant maksimaliai 1300 °C temperatūrai). Šių tyrimų rezultatų autoriai parodė, kad keramikos tankis ir stipris didėja, keičiant maksimalią degimo temperatūrą nuo 1040 iki 1080 °C.

Buvo nagrinėtas keramikos su stiklo priedu savybių (tankio, cheminės sudėties, mineraloginės sudėties, stiprumo) kitimas, degant temperatūroje nuo 600 iki 1200 °C. Atliekant tokius tyrimus, gauta iki 90 MPa stiprumo ir iki 2560 kg/m³ tankio keramika.

Labai svarbu išnagrinėti, kaip keramikos atsparumas šalčiui priklauso nuo degimo režimo, nes, parinkę geriausią degimo temperatūrą, gautume atsparius šalčiui keramikos gaminius, tinkamus naudoti itin agresyviomis pajūrio zonos sąlygomis.

Publikacijose parodytas ryšys tarp maksimalios keramikos degimo temperatūros (tirtas degimo temperatūros intervalas 800–

1100 °C) ir eksploatacinio atsparumo šalčiui. Eksploatacinio atsparumo šalčiui reikšmės, pakėlus degimo temperatūrą nuo 800 iki 1100 °C, padidėja nuo 11 iki 250 šaldymo ir atšildymo ciklų.

Ryšys tarp maksimalios degimo temperatūros (tirtas degimo temperatūros intervalas 800–1200 °C) ir eksploatacinio atsparumo šalčiui bei stiprumo atsispindi ir kitų autorių darbuose. Kuo aukštesnė maksimali degimo temperatūra, tuo gaminys labiau sukepa, ir gaunamas didesnis keraminės šukės eksploatacinis atsparumas šalčiui bei gniuždymo stipris. Minėti autoriai parodė sąryšį tarp vandens įmirkio, išotinio koeficiento, porų ir kapiliarų pasiskirstymo medžiagoje pagal jų dydį ir kai kurių kitų rodiklių bei nustatė, kad eksploatacinio atsparumo šalčiui neįmanoma prognozuoti pagal kurį nors vieną keraminės šukės fizikinį rodiklį. Pagal šių autorių atliktus eksperimentus ir padarytas išvadas, geriau tinka eksploatacinio atsparumo šalčiui prognozė pagal kelis fizikinius keraminių dirbinių savybių rodiklius.

Keramikos savybes nulemia ir degimo kameroje esanti dujų terpė. Nustatyta, kad, degant bandinius redukcinių dujų terpėje, galima gauti didesnio sukepimo dirbinius, kurių atsparumas šalčiui siekia 200 ciklų. Buvo nustatyta, kad, degant keraminius pusgaminčius redukcinėje aplinkoje, temperatūrą galima sumažinti iki 50–100 °C, ir gausime labai panašias gaminio savybes, kaip ir degant oksidacinėje dujų terpėje aukštesnėje temperatūroje.

Šią problematiką nagrinėjo N. I. Demidenka ir kt., savo publikacijose grafiškai nustatydami, kaip maksimali degimo temperatūra lemia medžiagos poringumą, vandens įmirkį, gniuždymo stiprį, šilumos laidumą.

13. KERAMINIŲ GAMINIŲ SUDĖTIES PARINKIMO IR KITŲ PAGRINDINIŲ SAVYBIŲ REGULIAVIMO GALIMYBĖS

13.1. Statistinės analizės ypatumai

Daugialypė regresinė analizė naudojama kintamojo reikšmėms prognozuoti pagal dviejų ar daugiau kintamųjų reikšmes. Regresijos lygtis yra nepriklausomų kintamųjų tiesinė kombinacija, ji aprašo geriausią prognozuojamo kintamojo įvertį. Daugialypėje regresinėje analizėje daugiausia dėmesio skiriama kintamiesiems, pagal kuriuos prognozuojama, – jų statistiniam reikšmingumui lygtyje, jų įtakoms, įtraukus ar pašalinus iš lygties kurį nors kintamąjį, ir jų tikrosios prasmės aiškinimui. Daugialypę regresinę analizę atlikdami žingsniniu metodu, galime nustatyti regresijos lygtį, įtraukdami po vieną nepriklausomą kintamąjį tol, kol patenkinamas tam tikras nustatytas kriterijus, reiškiantis, kad nauji nepriklausomi kintamieji nereikalingi. Iš tiesų svarbu, kad įtrauktas kintamasis pakeičia lygtyje jau esamų kintamųjų įtaką. Todėl yra galimybė pašalinti kintamąjį, kurio įtaka tapo nereikšminga, įtraukus naują kintamąjį.

Sakykime, kad tyrinėtojas, tirdamas požymį x , kurio vertės fiksuotos, stebėjo ir kitą požymį y ir nustatė, kad, pakitus požymio x vertei, pakinta ir y vertė. Todėl rezultatus reikėtų aprašyti analitiškai ir taip nustatyti, kokią įtaką daro vieno rodiklio dydžio kitimas kitam rodikliui.

Duomenų grupavimas ir paruošimas regresinės analizės tyrimui dažniausiai atliekamas su „Microsoft Excel“ ir „Statistica“ programomis. Duomenims apdoroti naudojama mažiausių kvadratų regresinė analizė, todėl, kad tai yra geriausia regresinės analizės forma inžineriniam pritaikymui.

Regresinė analizė vienam kintamajam $y = f(x)$ atitinka m -tosios eilės polinomą:

$$y_c = a_0 + a_1x + a_2x + \dots + a_mx^m \quad (13.1)$$

čia: $m \leq n - 1$.

Norint rasti koeficientus $a_0, a_1, \dots, a_m$ pirmiausia nustatomas skirtumas tarp priklausomo kintamojo y_i ir polinominio y_{ci} :

$$d_i = y_i - y_{ci} \quad (13.2)$$

čia: y_{ci} yra polinomo vertė taške (x_i, y_i) . Dydžių y_i ($i = 1, 2, \dots, n$) nuokrypių kvadratų suma yra:

$$D = \sum_{i=1}^n (y_i - y_{ci}). \quad (13.3)$$

Iš lygčių (13.1) ir (13.2) gauname:

$$D = \sum_{i=1}^n \left[y_i - (a_0 + a_1x + \dots + a_mx^m) \right]^2. \quad (13.4)$$

Diferencialas dD iš $m + 1$ nepriklausomų koeficientų:

$$dD = \frac{\partial D}{\partial a_0} da_0 + \frac{\partial D}{\partial a_1} da_1 + \dots + \frac{\partial D}{\partial a_m} da_m. \quad (13.5)$$

Norint minimizuoti nuokrypių kvadratų sumą, reikia, kad $dD = 0$. Tai daroma taip:

$$\frac{\partial D}{\partial a_0} = 0 = \frac{\partial}{\partial a_0} \left\{ \sum_{i=1}^n \left[y_i - (a_0 + a_1 x + \dots + a_m x^m) \right]^2 \right\}.$$

$$\frac{\partial D}{\partial a_1} = 0 = \frac{\partial}{\partial a_1} \left\{ \sum_{i=1}^n \left[y_i - (a_0 + a_1 x + \dots + a_m x^m) \right]^2 \right\}. \quad (13.6)$$

$$\frac{\partial D}{\partial a_m} = 0 = \frac{\partial}{\partial a_m} \left\{ \sum_{i=1}^n \left[y_i - (a_0 + a_1 x + \dots + a_m x^m) \right]^2 \right\}.$$

Randomi regresijos koeficientai a_0 ir a_m :

$$a_0 = \frac{\sum x_i \sum x_i y_i - \sum y_i \sum x_i^2}{(\sum x_i)^2 - n \sum x_i^2}, \quad (13.7)$$

$$a_m = \frac{\sum x_i \sum y_i - n \sum x_i y_i}{(\sum x_i)^2 - n \sum x_i^2}. \quad (13.8)$$

Apskaičiuojamas imties standartinis nuokrypis. Regresinėje analizėje dažnai naudinga žinoti vidutinio standartinio nuokrypio matą nuo regresinės kreivės (s_e). Jis yra lyg eksperimentinių duomenų nuokrypio nuo regresinės kreivės indikatorius. Vidutinio standartinio nuokrypio matas apibrėžiamas kaip kvadratinė šaknis iš normuotos klaidų nuokrypio kvadratų sumos:

$$s_{xy} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y_{ci})^2}{v}}. \quad (13.9)$$

Čia: $v = n - (m+1)$ – laisvės laipsnių skaičius. Mažos s_e reikšmės rodo nedidelį nuokrypį nuo regresinės kreivės. Jei duomenų ryšys aprašomas tiesine lygtimi:

$$y = a + bx, \quad (13.10)$$

tai šioje lygtyje regresijos koeficientas a vadinamas postūmiu, o b – posvyriu.

Ryšio dėsningumas gali būti tiriamas, taikant tokius funkcijų tipus: tiesinį ($y = a + bx$), kvadratinį ($y = a + bx^2$), laipsninį ($y = ax^b$), rodiklinį ($y = ab^x$), laipsninį rodiklinį ($y = ax^b \cdot c^x$), hiperbolinį ($y = 1/(a+bx)$), trupmeninį racionalųjį ($y = x/(a+bx+cx^2)$), modifikuotą eksponentinį ($y = ae^{bx}$), Tornkvisto ($y = ax/(b+x)$), polinominį ($y = a + bx_1 + cx_2 + \dots + d x_1 x_2 + \dots + bx_1^2 + cx_2^2 + \dots$) ir matematinį modelį su lūžio tašku ($y = a + bx$) ($y < const.$) + ($y = a + bx$) ($y > const.$). Matematiniam ryšiui nustatyti pasirenkama ta funkcija, kuri tiksliausiai aprašo duomenų pasiskirstymą, taip pat įvertinama, ar daugiamaciai koreliacijos ir determinacijos koeficientai artimiausi vienetui. Koreliacijos koeficientas rodo dvi kintamųjų ryšio savybes. Viena jų – ryšio stiprumas, reiškiantis, kaip vienas požymio kitimas priklauso nuo kito požymio. Kita – ryšio kryptis.

Koreliacijos koeficientas R gali būti apskaičiuojamas taip:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{\sqrt{\left[\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \right] \left[\sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)^2 \right]}}. \quad (13.11)$$

Koreliacijos koeficiento vertės gali būti tik tarp -1 ir $+1$. Esant griežtam ryšiui tarp x ir y , reikšmių pora (x_i, y_i) bus tiesėje. Esant teigiamam tiesės polinkio koeficientui, turėsime $R = +1$, o neigiamam, -1 . Teigiamą koreliaciją rodo, kad požymiai kinta viena kryptimi – arba abiejų reikšmės didėja, arba abiejų mažėja. O neigiama – kad, vieno požymio reikšmės didėjant, kito reikšmės mažėja, ir atvirkščiai. Kuo arčiau reikšmės išsidėsčiusios prie tiesės, tuo didesniu laipsniu koreliacijos koeficientas artėja prie vienetų. Jeigu du dydžiai nepriklauso vienas nuo kito, tai jie neturi koreliacinio ryšio, ir $R = 0$, jeigu reikšmių pora (x_i, y_i) yra tiesėje, tai $R = 1$. Jeigu $R = 0$, vadinasi, nėra tiesinio ryšio, bet tai nereiškia, kad x ir y visiškai nepriklauso vienas nuo kito. Jeigu $R = 1$, tai nereiškia, kad priklausomybė tarp x ir y tiesinė, o tik tai, kad šie dydžiai priklauso vienas nuo kito. Kadangi literatūroje nepavyko rasti griežtai nustatytų terminų, kada koreliacija laikoma silpna, o kada labai stipria, buvo remtasi tokiais pasiūlymais: kai $R < 0,2$ – koreliacija labai silpna, ryšio nėra; kai $0,2 < R < 0,4$ – silpna koreliacija, silpnas ryšys; kai $0,4 < R < 0,7$ – vidutinė koreliacija, vidutinis ryšys; kai $0,7 < R < 0,9$ – stipri koreliacija, stiprus ryšys, ir kai $R > 0,9$ bus labai stipri koreliacija.

Modelio tinkamumą parodo determinacijos koeficientas R^2 , kuris yra dydžių bendrų dispersijų santykis:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y'_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}, \quad (13.12)$$

čia: y'_i – prognozuojama reikšmė, t. y. Reikšmė, apskaičiuota pagal sudarytas empirines lygtis,

y_i – eksperimentų metu nustatyta reikšmė,

$\bar{y}$ – eksperimentų metu nustatytų reikšmių vidurkis.

Aišku, kad $0 \leq R^2 \leq 1$, kuo R^2 vertė yra arčiau vieneto, tuo parinkta regresinė kreivė geriau tinka eksperimentiniams duomenims aprašyti. Pavyzdžiui, kai $R^2 = 0,8$, galima teigti, kad 80 % y reikšmių paaiškinamos nepriklausomu kintamuoju x .

Lygties kintamųjų reikšmingumas nustatomas pagal Stjudento kriterijų. Jei rodiklio reikšmė didesnė nei etaloninėje lentelėje (kai tiriamieji 40 bandinių, esant 0,05 reikšmingumo lygmeniui, Stjudento kriterijaus statistinėje lentelėje nurodyta reikšmė yra 2,02), tai rodiklis laikomas reikšmingu.

13.2. Formavimo mišinio sudėties parinkimas

Keramikos gamybai tinkamos formavimo masės sudėties parinkimas gali būti atliekamas ekstremaliųjų eksperimentų planavimo metodu „sudėtis–kokybė“. Taikant šį metodą, reikia pasirinkti viršutinių ir apatinių faktorių kitimo lygius nagrinėjamų medžiagų formavimo masei sudaryti. Išnagrinėjime pavyzdį, jei mišiniui bus naudojami trys komponentai: molio mišinys, flusuojantis priedas (perlitas) ir liesinantis priedas (išdegtų neatitiktinių gaminių skaldelė) (13.1 lentelė). Faktorių kitimo lygius reikia pasirinkti pagal literatūroje pateiktus duomenis apie galimus konkrečių liesinančių ir flusuojančių priedų kiekius. Medžiagų kiekiai gali būti užrašomi masės % arba vieneto dalimis.

13.1 lentelė. Viršutiniai ir apatiniai faktorių kitimo lygiai

Faktorių lygiai	X_1 molio mišinio kiekis, $\times 100 \%$	X_2 fluso kiekis, $\times 100 \%$	X_3 liesiklio kiekis, $\times 100 \%$
Viršutinis	0,84	0,26	0
Apatinis	0,74	0,06	0,1

Šie faktorių kitimo lygiai pasirinkti, remiantis išnagrinėtos literatūros duomenimis ir atsižvelgiant į gamyklose naudojamas formavimo masių sudėtis. Naudotas planavimo metodas leidžia sumažinti eksperimentų skaičių ir objektyviai, matematiškai pagrįstai įvertinti formavimo masių komponentų įtaką gaminių kokybei.

Tyrimuose naudoto molio mišinio sudėtis: 80 % Ukmergės radimvietės molio ir 20 % Rokų radimvietės molio. Norint pagerinti galutinio produkto savybes, į formavimo masę įmaišyta perlito. Liesikliu panaudotas trupintas bandinių niekalas (toliau skaldelė). Jei Ukmergės ir Rokų molį įvardintume kaip atskirus komponentus, turėtume sudaryti ne trikampę, o daugiakampę diagramą, o atliekami skaičiavimai būtų sudėtingesni. Tačiau šiuos molius galime sujungti į vieną mišinį ir įvardinti kaip vieną komponentą, nes proporcijų santykis buvo patvirtintas anksčiau atliktais tyrimais.

Pažymėjus šiuos ribinius duomenis trikampėje diagramoje, buvo gautas lygiagretainis (13.1 pav.). Jo viršūnės ir įstrižainių susikirtimo taškas atitinka būsimų formavimo masių sudėtis. Iš penkių formavimo masių sudėčių formuojami bandiniai (jų kiekis priklauso nuo norimų nustatyti rodiklių). Bandiniai džiovinami ir degami pasirinktose temperatūrose. Nenaudojant tokios eksperimentų planavimo programos, bandinių skaičius žymiai padidėja.

13.1 pav. Trikampę formavimo masių sudėčių parinkimo diagrama

Bandinių kokybė gali būti įvertinta pagal tokius rodiklius:

- bendrąjį susitraukimą Y_1 ;
- tankį Y_2 ;
- įmirkį, po 72 val. mirkymo vandenyje normaliosiomis sąlygomis, Y_3 ;
- stiprį lenkiant Y_4 ;
- stiprį gniuždant Y_5 ;
- atsparumą šalčiui Y_6 .

Pagal trikampę diagramą gautos formavimo mišinių sudėties pateiktos 13.2 lentelėje. Ukmergės ir Rokų molio kiekiai apskaičiuoti pagal atitinkamą santykį 4:1.

13.2 lentelė. Pagal trikampę diagramą gautos formavimo masių sudėtys

Žymėjimas	Masės sudėtis, %			
	Ukmergės molis	Rokų molis	Perlitas	TBN*
1	59,2	14,8	16	10
2	67,2	16,8	6	10
3	59,2	14,8	26	–
4	67,2	16,8	16	–
5	63,2	15,8	16	5

TBN* – išdegtų trupintų gaminių skaldelė

Lygiagrečių bandymų rezultatų patikimumas tikrinamas Stjudento kriterijumi su 95 % rezultatų patikimumu. Stjudento kriterijaus apskaičiuota reikšmė turi būti didesnė už statistinių duomenų lentelėje pateiktas reikšmes. Tai rodo, kad gautų bandymo rezultatų dispersija atitinka nurodytą patikimumą. Pagal regresinių lygčių koeficientus ir jų absoliutinius dydžius galima spręsti apie formavimo masės komponentų poveikio į bandinių stiprumines charakteristikas dydį. Regresinės lygtys gautos mažiausių kvadratų metodu.

Gautos bandinių savybių skaitinės vertės įrašomos į atitinkamas trikampės diagramos sritis, kaip pateikta 13.2 paveiksle – jame parodytos ir bendrojo susitraukimo reikšmės.

13.2 pav. Tiesės, suskirstančios formavimo masių sudėtis pagal bendrąjį susitraukimą (%)

Pagal atliktą regresinę analizę bendrasis susitraukimas (Y_1) išreiškiamas lygtimi:

$$Y_1 = 74,0 \cdot X_1 + 71,0 \cdot X_2 + 63,0 \cdot X_3 - 63,59. \quad (13.13)$$

Randamas šios lygties daugiamatis koreliacijos koeficientas, kuris yra 0,932, o determinacijos koeficientas – 0,868, standartinė įvertio klaida $s_e = 0,514$.

Įrašius gautas reikšmes į šį plotą, gaunamos tiesės, suskirstančios formavimo masių sudėtis pagal bandinių bendrąjį susitraukimą. Iš 13.2 pav. matyti, kad didžiausią poveikį bendrajam bandinių susitraukimui turi trupintas bandinių niekalas. Kuo didesnis jo kiekis mišinyje, tuo mažiau bandiniai susitraukia. Matyti, kad didžiausio bendrojo susitraukimo sritis, kai formavimo masės sudėtis yra tokia:

molio mišinys – 79,5–84 %, perlitas – 14,5–20,5 %, skaldelė – 0–1,5 %.

Tokios priklausomybės skaičiuojamos kiekvienam numatytam rodikliui. Įvertinus visus rodiklius, išvedama bendroji lygtis, pagal kurią nustatoma optimali formavimo mišinio sudėtis.

13.3. Keramikos savybių reguliavimo galimybės, keičiant džiovinimo ir degimo parametrus

Norint nustatyti džiovinimo ir degimo režimų įtaką galutinėms keramikos charakteristikoms, džiovinimo ir degimo etapai išreiškiami per sąlyginius ploto vienetus, kad vienu metu būtų galima įvertinti temperatūros ir išlaikymo laiko joje, t.y. gautą bandinių šilumos kiekį. Skaičiavimo metodikos pavyzdžiai pateikti pagal 13.3 paveikslą.

Šios skyriaus dalies tikslas buvo parodyti, kaip, reguliuojant kiekvieno degimo režimo etapo dydį (išreikštą sąlyginiais ploto vienetais), galima keisti galutinio keramikos gaminio fizikines-mechanines ir struktūrines savybes.

Kaip pavyzdys pateiktas vienas iš galimų degimo režimų. Paskutinis degimo etapo vertinimas užbaigiamas, kai temperatūra pasiekia 400 °C, nes vėliau degimo krosnyje bandiniai aušta lėčiau, negu nustatyta pagal programą. Be to, iki šios temperatūros keraminio bandinio struktūra jau būna susiformavusi, ir ženklų pakitimų nebeįvyksta.

13.3 pav. Degimo režimų etapai

Pirmiausia degimo režimas suskirstomas etapais: temperatūros kėlimo, išlaikymo maksimalioje temperatūroje ir temperatūros kritimo. Tada apskaičiuojamos gautų plotų reikšmės (13.3 pav.):

$$y_1' = 0,5 \cdot 1100 \cdot 11 = 6050, \quad (13.14)$$

$$y_2' = 1100 \cdot 3 = 3300, \quad (13.15)$$

$$y_3' = 0,5 \cdot (1100 - 400) \cdot 10 = 3500. \quad (13.16)$$

Taip įvertinami visi degimo režimai, ir gauta didžiausia sąlyginių plotų suma prilyginama 100. Tada taikoma triskaitė taisyklė (šiuo atveju didžiausias plotas buvo 38550 pagal lentelę 13.3). Taigi:

$$y_1 = (6050 \cdot 100) / 38550 = 15,69, \quad (13.17)$$

$$y_2 = (3300 \cdot 100) / 38550 = 8,56, \quad (13.18)$$

$$y_3 = (3500 \cdot 100) / 38550 = 9,08. \quad (13.19)$$

Kaip jau buvo minėta, nuo degimo režimo parinkimo labai priklauso galutinės keraminių dirbinių savybės ir kokybė. Jeigu bandiniai bus per mažai išdegti, neįgaus pakankamo stiprumo,

atsparumo šalčiui ir pan., o jei perdegs, gausim juos pakitusios formos, sutrūkinėjusius. Taip pat labai svarbu tinkamai parinkti kiekvieno degimo režimo etapo dydį, nes per greitai kaitinami ar aušinami bandiniai įgis daug defektų. Mokslininkai dažniausiai nagrinėja išlaikymo maksimalioje temperatūroje etapo (maksimali temperatūra ir išlaikymo joje laikas) įtaką galutinėms keramikos savybėms, nors labai svarbi ir bandinių įkaitinimo bei aušinimo eiga.

Išdegti pagal 16 skirtingų degimo režimų keraminiai bandiniai, kurių matmenys $70 \times 70 \times 70$ mm, buvo panaudoti fizikiniais-mechaniniams ir struktūriniais rodikliams nustatyti. Gautų rodiklių vidutinės reikšmės pateiktos 13.3 ir 13.5 lentelėse.

13.3 lentelė. Keraminių pusgaminių degimo režimai

Partija	Temperatūros kilimo etapas y_1 , vnt.	Išlaikymo maksimalioje temperatūroje etapas y_2 , vnt.	Temperatūros kritimo etapas y_3 , vnt.	Maksimali degimo temperatūra, °C
1	12,84	7,00	6,49	900
2	38,52	21,01	12,97	900
3	13,55	7,39	7,13	950
4	40,66	22,18	14,27	950
5	42,80	23,35	23,35	1000
6	28,53	15,56	15,56	1000
7	14,41	5,45	9,62	1050
8	44,94	24,51	18,55	1050
9	15,34	8,37	12,26	1075
10	30,67	16,73	17,51	1075
11	14,14	8,48	9,84	1090
12	31,10	16,96	17,90	1090
13	31,10	28,27	35,80	1090
14	31,39	17,12	18,16	1100
15	15,69	8,56	9,08	1100
16	47,08	25,68	27,24	1100

13.4 lentelė. Fizikinių-mechaninių rodiklių vertės

Partija	ρ x_1 , kg/m ³	S_B x_2 , %	R_{gn} x_3 , MPa	ν x_4 , m/s
1	1295	4,40	5,72	1926
2	1299	4,83	5,79	2115
3	1290	5,87	5,75	2237
4	1302	6,12	6,04	2258
5	1349	6,41	6,82	1785
6	1310	6,53	6,38	1919
7	1312	5,94	8,33	2435
8	1375	6,15	9,52	2498
9	1420	7,46	12,28	3328
10	1506	10,41	11,09	2636
11	1502	11,44	15,65	2965
12	1545	12,43	13,92	2646
13	1577	12,57	15,79	2979
14	1594	13,35	14,20	2810
15	1513	9,94	16,75	3056
16	1626	14,70	15,93	2873

čia: ρ – tankis; S_B – bendrasis susitraukimas; R_{gn} – gniuždymo stipris; ν – ultragarso bangų sklaidimo greitis

13.5 lentelė. Struktūrinių rodiklių vertės

Partija	R_p x_5 , %	N_h x_6 , vnt.	H_{max} x_7 , mm	g x_8 , g/cm ²	W_h x_9 , %
1	24,29	0,584	34,4	0,561	27,99
2	25,48	0,541	35,2	0,648	28,06
3	23,80	0,386	36,8	0,811	26,26
4	25,81	0,369	37,0	0,809	25,60
5	23,58	0,358	37,2	0,803	28,56
6	21,36	0,268	42,8	0,931	26,62
7	29,38	0,271	38,4	0,768	25,60
8	31,48	0,249	39,6	0,842	17,42
9	37,02	0,183	43,6	0,770	15,51
10	31,52	0,440	49,4	0,882	13,35
11	42,90	0,189	54,6	1,045	12,77
12	42,22	0,363	51,2	0,725	13,09
13	38,73	0,106	61,2	1,095	14,15
14	44,21	0,212	62,4	1,137	12,05
15	45,12	0,205	63,0	1,154	11,87
16	48,21	0,065	61,8	0,934	11,42

R_p – poringos erdvės rezervas; N_h – struktūros nevienalytiškumo laipsnis; H_{max} – maksimalus kapiliarinio pakilimo pagal drėkinimo frontą greitis; g – kapiliarinis masės srauto greitis; W_h – vandens įmirkis

Iš 13.3 ir 13.5 lentelių matyti, kad degimo režimo parinkimas labai smarkiai lemia galutines keramikos savybes. Keičiant degimo režimą, o visas kitas technologines sąlygas paliekant tas pačias, labiausiai kito: bendrasis susitraukimas – nuo apytiksliai 4

(pirmosios ir antrosios partijų) iki 15 % (šešioliktosios partijos), gniuždymo stipris – nuo apytiksliai 6 (pirmosios–trečiosios partijų) iki 16 MPa (penkioliktosios, šešioliktosios partijų), poringos erdvės rezervas – nuo apytiksliai 24 (pirmosios–šeštosios partijų) iki 50 %, (penkioliktosios, šešioliktosios partijų), struktūros nevienalytiškumo laipsnis – nuo apytiksliai 0,02 (keturioliktosios–šešioliktosios partijų) iki 0,6 vnt. (pirmosios, antrosios partijų) ir vandens įmirkis – nuo apytiksliai 10 (penkioliktosios, šešioliktosios partijų) iki 30 % (antrosios, penktosios partijų). Dėl labai didelio galutinio keraminio dirbinio kokybės kitimo reikia išsamesnių kiekvieno degimo etapo įtakos keramikos savybėms tyrimų. Tada atliekama eksperimentinių duomenų statistinė analizė.

13.4. Empirinių lygčių sudarymas ir jų prasmė

Atlikus fizikinių-mechaninių rodiklių statistinę ir regresinę analizes, buvo sudarytos 13.20–13.22 empirinės lygtys.

Empirinė 13.20 lygtis parodo, kaip tankį veikia degimo režimo etapų dydžiai prieš ir už lūžio taško – 1450 kg/m^3 .

$$x_1 = (1282 - 22,09y_1 + 16,99y_2 + 43,10y_3) (x_1 < 1450) + (1485 + 7,230y_1 - 34,55y_2 + 35,55y_3) (x_1 \geq 1450). \quad (13.20)$$

Prieš lūžio tašką gaunami mažesnio tankio dirbiniai, ir jų tankis bus tuo mažesnis, kuo bus ilgesnis temperatūros kilimo etapas ir mažesni išlaikymo maksimalioje temperatūroje ir temperatūros kritimo etapai. Už lūžio taško gaunami didesnio nei 1450 kg/m^3 tankio gaminiai. Čia degimo režimo etapų įtaka tankio rodikliui jau yra kitokia: temperatūros kilimo ir kritimo etapų didinimas tankį veikia teigiamai, o išlaikymo maksimalioje temperatūroje etapo didinimas – neigiamai. Tankį prieš ir už lūžio taško vienodai veikia tik temperatūros kritimo etapas. Kuo šis etapas bus ilgesnis, tuo gausime didesnio tankio keraminę šukę. Tai galima paaiškinti tuo, kad šiame degimo etape galutinai susiformuoja vidinė dirbinio

struktūra, ir ji bus tuo stabilesnė, tolygesnė ir turės mažiau defektų, kuo gamins lėčiau vės.

Empirinė lygtis 13.21 parodo, kaip bendrąjį susitraukimą veikia degimo režimo etapų dydžiai.

$$\begin{aligned} x_2 = (4,857 - 0,323y_1 + 0,200y_2 + 0,769y_3) (x_2 < 9,343) + \\ (10,65 + 0,426y_1 - 2,063y_2 + 2,017y_3) (x_2 \geq 9,343). \end{aligned} \quad (13.21)$$

Matome, kad čia reikšmingiausias yra taip pat temperatūros kritimo etapas, per kurį galutinai susiformuoja gaminio struktūra. Kuo jis bus didesnis, tuo keraminis dirbinys labiau trauksis. Kitų degimo etapų ženklai kinta priklausomai nuo norimos gauti bendrojo susitraukimo reikšmės. Pavyzdžiui, jei norėsime gauti bendrąjį susitraukimą, mažesnę už 9,343 % (13.21 lygtis), turėsime mažinti temperatūros kilimo ir temperatūros kritimo etapų dydžius bei didinti išlaikymo maksimalioje temperatūroje etapo vertę. Jeigu norėsime gauti bendrąjį susitraukimą, didesnę už 9,343 % (13.21 lygtis), turėsime didinti temperatūros kilimo ir kritimo etapus ir to sąskaita sumažinti išlaikymo maksimalioje temperatūroje dydį.

Gniuždymo stiprio ir degimo režimo etapų priklausomybė pateikta 13.22 empirinėje lygtyje.

$$\begin{aligned} x_3 = (5,720 - 1,035y_1 + 0,599y_2 + 2,281y_3) (x_3 < 11,43) + \\ (15,89 - 0,239y_1 + 1,140y_2 - 1,063y_3) (x_3 \geq 11,43). \end{aligned} \quad (13.22)$$

Pagal sudarytos 12.20 empirinės lygties ženklus matyti, kad kuo didesnę norėsime gauti gniuždomąjį stiprį, tuo ilgesnį išlaikymo maksimalioje temperatūroje etapo dydį turėsime parinkti ir to sąskaita sumažinti temperatūros kilimo bei kritimo etapų vertes. Iš 13.22 lygties ženklų ir kintamųjų dydžių matyti, kad labiausiai gniuždomąjį stiprį didina išlaikymo maksimalioje temperatūroje etapas. Taip gali būti, nes šiame degimo etape vyksta medžiagos sukepimas, mažėja jos poringumas, ir susidaro tvirtas vidinis medžiagos karkasas, kuris leidžia bandiniams atlaikyti didesnes gniuždomąsias apkrovas.

Empirinė lygtis 13.23 parodo, kaip degimo režimo etapų dydžiai lemia ultragarso bangų sklidimo greičio reikšmes bandinyje.

$$\begin{aligned} x_4 = & (2500 - 456,5y_1 + 325,7y_2 + 43,10y_3) \quad (x_4 < 2585) + \\ & (3075 + 0,985y_1 - 80,75y_2 + 94,90y_3) \quad (x_4 \geq 2585). \end{aligned} \quad (13.23)$$

Ultragarso bangų sklidimo greitis didės, kai didinsime temperatūros kritimo etapą. Taip yra dėl to, kad paskutiniame degimo etape galutinai formuojasi vidinė bandinio struktūra, ir kuo šis etapas didesnis, tuo gaminyje įgyja mažiau defektų, o ultragarso bangų sklidimo greitis ir įvertina struktūros defektiškumą. Išlaikymo maksimalioje temperatūroje etapas prieš ir už lūžio taško (2585 m/s) veikia skirtingai, pavyzdžiui, norint gauti didesnės už 2585 m/s ultragarso bangų sklidimo greičio reikšmes, šį etapą reikės sumažinti ir padidinti temperatūros kilimo ir temperatūros kritimo etapų dydžius. O norint gauti mažesnę už 2585 m/s ultragarso bangų sklidimo greitį, reikės padidinti temperatūros kritimo, išlaikymo maksimalioje temperatūroje etapų vertes ir sumažinti temperatūros kilimo dydį.

Dabar panagrinėsime atvirkštinės priklausomybės empirines lygtis ir nustatysime galutines degimo režimo įtakas fizikinėms-mechaninėms keramikos savybėms.

Empirinė lygtis 13.24 rodo, kad teigiamiausiai temperatūros kilimo etapo dydį veikia norimos gauti bendrojo susitraukimo rodiklio reikšmės.

$$\begin{aligned} y_1 = & (44,55 - 0,030x_1 + 0,547x_2 - \\ & 0,145x_3 + 0,0037x_4) \quad (y_1 < 27,28) + \\ & (-0,140 + 0,055x_1 + 1,654x_2 + 0,041x_3 - 0,025x_4) \\ & (y_1 \geq 27,28). \end{aligned} \quad (13.24)$$

Pagal sudarytos empirinės lygties 13.24 ženklus matyti, kad kuo didesnės bendrojo susitraukimo vertės parinksime, tuo didesnę temperatūros kilimo etapą gausime. Kitos pasirinktos fizikinių-

mechaninių rodiklių reikšmės temperatūros kilimo etapą prieš ir už lūžio taško (27,28 vnt.) veikia skirtingai. Pavyzdžiui, kuo mažesni tankį norėsime gauti, tuo mažesnę (iki lūžio taško 27,28 vnt.) temperatūros kilimo etapo vertę parinksime, ir kai medžiagos tankį norėsime gauti didesni, temperatūros kilimo etapas bus didesnis už 27,28 sąlyginių vienetų reikšmes. Tokias pat priklausomybes gavome ir atvirkštinėje 13.20 lygtyje.

Išlaikymo maksimalioje temperatūroje etapą (13.25 empirinė lygtis) medžiagos tankio ir bendrojo susitraukimo rodikliai prieš ir už lūžio taško veikia su tokiomis pat tendencijomis.

$$y_2 = (-10,49 + 0,014x_1 - 0,038x_2 - 0,095x_3 + 0,0003x_4) (y_2 < 15,99) + (19,29 + 0,0001x_1 - 0,401x_2 + 0,959x_3 - 0,0016x_4) (y_2 \geq 15,99). \quad (13.25)$$

Kai norėsime gauti didesni tankį (iki 1450 kg/m^3 (lygtis 13.20), išlaikymo maksimalioje temperatūroje etapo reikšmės reikės didinti. Kai norėsime gauti didesni kaip 9,343 % bendrąjį susitraukimą (empirinė lygtis 12.19), išlaikymo maksimalioje temperatūroje etapą reikės mažinti. Jei norėsime gauti didesnes gniuždymo stiprio reikšmes, ši degimo etapą reikės padidinti, kai jo dydis (y_2) didesnis kaip 15,99 sąlyginio vieneto reikšmė. Norimos gauti ultragarso bangų sklaidimo greičio vertės išlaikymo maksimalioje temperatūroje degimo etapą įtakoja taip: iki išlaikymo maksimalioje temperatūroje 15,99 sąlyginio vieneto reikšmės (13.25 lygtis), didinant ultragarso bangų sklaidimo greitį, šis degimo etapas didėja, o nuo 15,99 sąlyginio vieneto reikšmės – mažėja. Šie teiginiai sutampa su prieš tai iškeltais 13.23 sudarytos empirinės atvirkštinės lygties aprašomaisiais teiginiais.

Empirinė lygtis 13.26 parodo, kaip galima keisti temperatūros kritimo etapo dydį priklausomai nuo norimų gauti nagrinėjamų fizikinių-mechaninių rodiklių reikšmių.

$$y_3 = (7,561 - 0,003x_1 + 0,377x_2 - 0,060x_3 + 0,0002x_4) (y_3 < 11,26) + (-79,00 + 0,043x_1 - 0,071x_2 + 1,244x_3 + 0,0046x_4) (y_3 \geq 11,26). \quad (13.26)$$

Pagal 13.26 sudarytos empirinės lygties ženklus matyti, jog teigiamiausiai temperatūros kritimo etapą veikia ultragarso bangų sklaidimo greičio reikšmės. Kiti parinkti fizikiniai-mechaniniai rodikliai temperatūros kritimo etapą prieš ir už lūžio taško (11,26 vnt.) veikia skirtingai. Pavyzdžiui, kuo didesnės tankio ir gniuždymo stiprio reikšmės nusistatysime, tuo didesnę temperatūros kritimo etapą reikės parinkti.

Iš 13.6 lentelėje pateiktų 13.20–13.26 empirinių lygčių, sudarytų pagal atitinkantį eksperimentinių duomenų išsibarstymą matematinį modelį su lūžio tašku, daugiamačių koreliacijos ir determinacijos koeficientų matyti, kad tarp degimo režimo etapų ir fizikinių-mechaninių rodiklių yra labai stiprus ryšys. Determinacijos koeficientas yra didesnis už 0,7, vadinasi, matematinis modelis labai gerai tinka eksperimentiniams duomenims aprašyti. Vidutinio standartinio nuokrypio reikšmės yra nedidelės, taigi teorinės ir faktinės vertės mažai skirsis.

13.6 lentelė. Empirinių lygčių 13.20–13.26 daugiamačiai koreliacijos R ir determinacijos R^2 koeficientai, vidutiniai standartiniai nuokrypiai s_e

Lygtis	R	R^2	s_e
13.20	0,982	0,965	21,0 kg/m ³
13.21	0,972	0,944	0,73 %
13.22	0,908	0,825	1,77 MPa
13.23	0,924	0,854	173,9 m/s
13.24	0,937	0,877	4,20 vnt
13.25	0,902	0,813	3,25 vnt
13.26	0,850	0,723	2,92 vnt

Naudojant matematinį modelį su lūžio tašku, gautos 13.20–13.26 empirinės lygtys, kurios parodo struktūrinių rodiklių ir degimo

režimo etapų priklausomybę. Lygtys 13.32–13.34 parodo atvirkštinį sąryšį: tarp atskirų degimo režimo etapų ir struktūrinių rodiklių reikšmių.

Iš empirinės lygties 13.27 galima konkrečiau spręsti apie degimo režimo etapų ir poringos erdvės rezervo sąryšį.

$$x_5 = (27,46 - 4,909y_1 + 3,153y_2 + 9,421y_3) (x_5 < 34,78) + (41,56 - 0,249y_1 + 2,997y_2 - 3,398y_3) (x_5 \geq 34,78) \quad (13.27)$$

Pagal šios empirinės lygties ženklus matyti, kad, norint gauti didesnę poringos erdvės rezervą, kas yra labai svarbu, siekiant gaminti eksploatuojant atsparią šalčiui keramiką, reikia parinkti didesnę išlaikymo maksimalioje temperatūroje etapo dydį ir to sąskaita sumažinti temperatūros kilimo ir kritimo etapų vertes iki leistinos ribos (kad keramika kokybiškai išdegtų, t.y. neatsirastų įtrūkių ir kitų defektų). Taip atsitinka todėl, kad išlaikymo maksimalioje temperatūroje etape vyksta intensyviausias malto stiklo, smėlio bei molio lydymasis, ir bandinyje susidaro daugiau aklinų porų.

Empirinė lygtis 13.28 parodo struktūros nevienalytiškumo laipsnio ir degimo režimo etapų sąveiką.

$$x_6 = (0,100 + 0,003y_1 + 0,013y_2 + 0,011y_3) (x_6 < 0,251) + (0,476 + 0,011y_1 + 0,015y_2 - 0,063y_3) (x_6 \geq 0,251). \quad (13.28)$$

Iš 13.28 sudarytos empirinės lygties matyti, kad iki struktūros nevienalytiškumo laipsnio 0,251 sąlyginio vieneto reikšmės sąryšio tendencijos pagal lygties ženklus yra vieno pobūdžio, o reikšmių, didesnių už 0,251 sąlyginio vieneto reikšmės, kitokio pobūdžio. Tik temperatūros kilimo etapas abiem atvejais veikia vienodai, t.y., norint gauti didesnes struktūros nevienalytiškumo laipsnio reikšmes, reikėtų didinti temperatūros kilimo dydį.

Empirinė lygtis 13.29 parodo maksimalaus kapiliarinio pakilimo pagal drėkinimo frontą greičio ir degimo režimo etapų priklausomybę.

$$x_7 = (31,20 - 1,008y_1 + 1,256y_2 + 1,358y_3) (x_7 < 48,98) + \\ (54,51 - 0,400y_1 + 1,720y_2 - 1,237y_3) (x_7 \geq 48,98). \quad (13.29)$$

Sprendžiant pagal 13.29 sudarytos empirinės lygties ženklus, temperatūros kilimo ir išlaikymo maksimalioje temperatūroje etapas maksimalų kapiliarinio pakilimo pagal drėkinimo frontą greitį veikia su tokiomis pat tendencijomis, t.y., norint gauti didesnę šio rodiklio reikšmę, reikia mažinti temperatūros kilimo dydį ir to sąskaita padidinti išlaikymo maksimalioje temperatūroje vertę. Taip turėtų vykti dėl labai greito pjuvenų išdegimo ir susisiekančių porų susidarymo. Temperatūros kritimo etapas veikia maksimalų kapiliarinio pakilimo pagal drėkinimo frontą greitį prieš lūžio tašką (48,98 mm, 13.29 lygtis) teigiamai, o už lūžio (48,98 mm, 13.29 lygtis) taško šio rodiklio priklausomybė yra neigiama. Todėl, parenkant degimo režimą, reikia į tai atsižvelgti.

Empirinė lygtis 13.30 parodo kapiliarinio masės srauto greičio ir degimo režimo etapų sąveiką.

$$x_8 = (0,623 - 0,033y_1 + 0,046y_2 + 0,036y_3) (x_8 < 0,902) + \\ (1,161 - 0,007y_1 + 0,002y_2 + 0,005y_3) (x_8 \geq 0,902). \quad (13.30)$$

Pagal 13.30 empirinę lygtį kapiliarinio masės srauto greičio ir degimo režimo etapų priklausomybės tendencijos ir prieš, ir už lūžio taško išlieka nepakitusios. Norint gauti mažesnę kapiliarinį masės srauto greitį, reikia padidinti temperatūros kilimo dydį ir mūsų atveju sumažinti išlaikymo maksimalioje temperatūroje bei temperatūros kritimo dydžius. Kadangi kuo aukštesnė bus degimo temperatūra, tuo gausime didesnę išlaikymo maksimalioje temperatūroje vertę, tuo labiau didės porų ir kapiliarų skersmuo, ir gaminyje greičiau įgers vandenį.

Empirinė lygtis 13.31 parodo, kaip kiekvienas degimo režimo etapas atskirai veikia keraminės šukės vandens įmirkį.

$$x_9 = (15,11 - 0,213y_1 + 1,152y_2 - 1,218y_3) (x_9 < 18,18) + (27,70 + 0,270y_1 + 0,144y_2 - 1,021y_3) (x_9 \geq 18,18). \quad (13.31)$$

Keraminės šukės vandens įmirkį išlaikymo maksimalioje temperatūroje ir temperatūros kritimo etapui prieš ir už lūžio taško veikia su vienodomis tendencijomis, t.y., norint gauti mažesnę vandens įmirkį, reikės padidinti temperatūros kritimo etapo dydį ir sumažinti išlaikymo maksimalioje temperatūroje etapą. Tai galima paaiškinti tuo, kad temperatūros kritimo etape galutinai susiformuoja vidinė bandinio struktūra, ir jei šis degimo periodas bus per trumpas, keraminėje šukėje atsiras daugiau defektų. Išlaikymo maksimalioje temperatūroje etapas vandens įmirkį veikia teigiamai, nes, naudojant išdegančius priedus, didėja porų dydis. Temperatūros kilimo etapas vandens įmirkį veikia priklausomai nuo lūžio taško vertės 18,81 % (lygtis 13.31). Jei norėsime gauti vandens įmirkio reikšmes, didesnes kaip 18,81 %, temperatūros kilimo etapą reikės didinti, nes šiame degimo etape intensyviausiai dega išdegantys priedai.

Toliau panagrinėsime atvirkštinės priklausomybės empirines lygtis 13.32–13.34, kurios leidžia tiksliau analizuoti degimo režimo etapų ir struktūrinių rodiklių sąryšį.

Empirinė lygtis 13.32 parodo, kaip reikia reguliuoti temperatūros kilimo etapo dydį priklausomai nuo norimų gauti struktūrinių rodiklių reikšmių.

$$y_1 = (11,52 + 0,161x_5 - 2,270x_6 - 0,141x_7 + 0,689x_8 + 0,188x_9) (y_1 < 27,28) + (27,60 - 0,549x_5 + 16,78x_6 - 0,332x_7 - 1,690x_8 + 0,559x_9) (y_1 \geq 27,28), \quad (13.32)$$

Šioje lygtyje abiem atvejais (pagal lūžio tašką) vienu tendencijų priklausomybės temperatūros kilimo etapui yra tik maksimalaus kapiliarinio pakilimo pagal drėkinimo frontą greičio ir vandens įmirkio rodikliai. Kuo mažesnę maksimalų kapiliarinio pakilimo pagal drėkinimo frontą greitį ir didesnę vandens įmirkį nusistatysime, tuo didesnę temperatūros kilimo etapą reikės parinkti.

Kiti struktūriniai rodikliai už ir prieš lūžio tašką šį degimo etapą veikia skirtingai. Jei didinsime kapiliarinį masės srauto greitį, gausime didesnę temperatūros kilimo vertę iki lūžio taško 27,28 sąlyginio vieneto vertės ir mažesnę už lūžio taško 27,28 sąlyginio vieneto vertės. Parinkti poringos erdvės rezervo ir kapiliarinio masės srauto rodikliai temperatūros kilimo etapą iki lūžio taško vertės (27,28 vnt.) veikia teigiamai, nes kuo degimo temperatūra keliama lėčiau, tuo mažiau defektų gaunama bandiniuose, juose susidaro daugiau aklinių porų, didėja poringos erdvės rezervas. Bet jei šilumos kiekis medžiagoje bus suteiktas per didelis, bandinyje susidarys daugiau susisiekančių atvirų porų, ir poringos erdvės rezervas bei kapiliarinis masės srauto greitis pradės mažėti. Atvirkštinė priklausomybė gaunama struktūros nevienalytiškumo laipsniui.

Empirinėje lygtyje 13.33 pavaizduotas išlaikymo maksimalioje temperatūroje etapo dydžio ir struktūrinių rodiklių ryšys.

$$y_2 = (-14,30 + 0,371x_5 - 6,713x_6 + 0,221x_7 + 1,644x_8 - 0,172x_9) (y_2 < 15,99) + (36,21 - 0,622x_5 - 22,53x_6 + 0,369x_7 - 7,380x_8 + 0,101x_9) (y_2 \geq 15,99), \quad (13.33)$$

Tik dviejų struktūrinių rodiklių (struktūros nevienalytiškumo laipsnio ir maksimalaus kapiliarinio pakilimo pagal drėkinimo frontą greičio) kitimo tendencijos šiam degimo etapui nepriklauso nuo lūžio taško. Didinant maksimalaus kapiliarinio pakilimo pagal drėkinimo frontą greičio ir mažinant struktūros nevienalytiškumo laipsnio reikšmes, gausime didesnę išlaikymo maksimalioje temperatūroje dydį. Kitų struktūrinių rodiklių įtaka priklauso nuo lūžio taško vertės, vienu atveju priklausomybė bus teigiama, kitu – neigiama. Pavyzdžiui, vertinant poringos erdvės rezervo rodiklį, matyti, kad iki lūžio taško 15,99 sąlyginio vieneto vertės šio struktūrinio rodiklio dydis išlaikymo maksimalioje temperatūroje etapo vertę veikia teigiamai, o už lūžio taško 15,99 sąlyginio vieneto vertės pradeda veikti neigiamai. Iš čia galima teigti, kad poringos erdvės rezervo

rodikliui geriausias išlaikymo maksimalioje temperatūroje etapo dydis bus 15,98 sąlyginio vieneto vertė. Didinti jo neverta, nes minėto struktūrinio rodiklio reikšmės gali pradėti mažėti.

Empirinėje lygtyje 13.34 parodyta, kaip norimos gauti struktūrinių rodiklių reikšmės lemia temperatūros kritimo etapo dydį.

$$y_3 = (3,991 - 0,233x_5 - 2,901x_6 + 0,229x_7 + 5,587x_8 - 0,165x_9) (v_3 < 11,26) + (33,90 - 0,768x_5 - 10,82x_6 + 0,492x_7 - 8,291x_8 - 0,303x_9) (v_3 \geq 11,26). \quad (13.34)$$

Empirinėje 13.34 lygtyje tik kapiliarinio masės srauto greičio rodiklis skirtingai veikia temperatūros kritimo etapo vertę prieš ir už lūžio taško. Kiti struktūriniai rodikliai temperatūros kritimo etapo dydį veikia nepriklausomai nuo lūžio taško vertės. Jei norėsime gauti didesnes poringos erdvės rezervą ($\geq 34,78\%$, 13.27 lygtis), struktūros nevienalytiškumo laipsnio ($\geq 0,251$ vnt., 13.28 lygtis), vandens įmirkio reikšmės ir mažesnes maksimalaus kapiliarinio pakilimo pagal drėkinimo frontą greičio ($< 48,98$ mm, 13.29 lygtis) reikšmes, turėsime parinkti mažesnę kaip 11,26 sąlyginio vieneto vertės temperatūros kritimo dydį.

Išnagrinėtų 13.27–13.34 empirinių lygčių daugiamačiai koreliacijos ir determinacijos koeficientai bei vidutiniai standartiniai nuokrypiai pateikti 13.7 lentelėje.

Iš 13.7 lentelės duomenų matyti, kad tarp struktūrinių rodiklių ir degimo režimo etapų yra labai glaudus ryšys. Determinacijos koeficientai yra didesni už 0,7, todėl matematinis modelis su lūžio tašku labai gerai atspindi eksperimentinių duomenų išsibastymą. Vidutiniai standartiniai nuokrypiai nedideli, todėl faktinės ir teorinės (apskaičiuotos pagal gautas empirines lygtis) reikšmės skirsis mažai. Kaip pavyzdį pateikiame keraminės šukės vandens įmirkio prognozuojamų ir faktinių reikšmių priklausomybę (13.4 pav.).

3.7 lentelė. Empirinių lygčių 13.27–13.34 koreliacijos R ir determinacijos R^2 koeficientai, vidutiniai standartiniai nuokrypiai s_e

Lygtis	R	R^2	s_e
13.27	0,961	0,924	2,38 %
13.28	0,881	0,777	0,08 vnt
13.29	0,892	0,795	4,63 mm
13.30	0,848	0,719	0,10 g/cm ²
13.31	0,922	0,849	2,53 %
13.32	0,939	0,883	4,11 vnt
13.33	0,906	0,822	3,17 vnt
13.34	0,888	0,789	2,54 vnt

13.4 pav. Vandens įmirkio prognozuojamų ir faktinių reikšmių priklausomybė

13.5. Empirinių lygčių naudojimo pavyzdžiai

Pateikiame kelis empirinių lygčių naudojimo pavyzdžius, kai varijuojama tik degimo režimo parinktų parametų dydžiais, o visos kitos technologinės sąlygos yra pastovios.

1 pavyzdys. Sakysime, kad norime gauti keraminę šukę su atitinkamais fizikiniais-mechaniniais rodikliais, pvz., tankiu 1500 kg/m³, bendruoju susitraukimu 12 %, gniuždymo stipriu 15 MPa, ultragarso bangų sklaidimo greičiu 3000 m/s. Tada šias

reikšmės įstatome į 13.23–13.26 lygtis ir apskaičiavę gauname tokius preliminarinius degimo režimo parametrus: temperatūros kilimo etapo dydis – 15,0 sąlyginių vienetų, išlaikymo maksimalioje temperatūroje etapo dydis – 9,5 sąlyginio vieneto ir temperatūros kritimo etapo dydis – 7,3 sąlyginio vieneto.

Kad įsitikintume šių degimo režimo parametrų patikimumu, jų reikšmės įstatome į 13.20–13.22 lygtis ir gauname, kad keraminės šukės tankis bus – 1525 kg/m^3 , bendrasis susitraukimas – 12 %, gniuždymo stipris – 15 MPa ir ultragarso bangų sklaidimo greitis – 3015 m/s. Taigi gautos reikšmės nedaug skiriasi nuo pasirinktų ir panaudojus gautus degimo režimo parametrus, galima tikėtis minėtų pagamintos produkcijos fizikinių-mechaninių savybių.

2 pavyzdys. Jei norime gauti produkciją su atitinkamais struktūriniais rodikliais, pvz., poringos erdvės rezervu 45 %, struktūros nevienalytiškumo laipsniu 0,1 vnt., maksimaliu kapiliarinio pakilimo pagal drėkinimo frontą greičiu 60 mm, kapiliariniu masės srauto greičiu 1 g/cm^2 , vandens įmirkiu 15 %, tai šias reikšmes įstatome į 13.32–13.34 lygtis ir gauname tokius degimo režimo parametrus: temperatūros kilimo etapo dydis – 13,5 sąlyginio vieneto, išlaikymo maksimalioje temperatūroje etapo dydis – 13,9 sąlyginio vieneto ir temperatūros kritimo etapo dydis – 10,2 sąlyginio vieneto.

Kad įsitikintume gautų degimo režimo parametrų patikimumu, įstatome gautas reikšmes į 13.27–13.31 lygtis ir apskaičiavę gauname, kad poringos erdvės rezervas bus 45 %, struktūros nevienalytiškumo laipsnis – 0,1 vnt., maksimalus kapiliarinio pakilimo pagal drėkinimo frontą greitis – 60 mm, kapiliarinis masės srauto greitis – 1 g/cm^2 , vandens įmirkis – 16 %. Taigi gautos reikšmės nedaug skiriasi nuo pasirinktų keraminio gaminio charakteristikų, todėl empirines lygtis galima naudoti gaminant keraminius dirbinius.

14. PAGRINDINIŲ IR KITŲ ŽALIAVŲ EFEKTYVIAI STATYBINEI KERAMIKAI TYRIMAS

14.1. Molio granulimetrinės sudėtis

Granulimetrinė molio sudėtis – tai technologinė molio savybė, parodanti, kiek ir kokio stambumo dalelių yra molyje.

Nuo granulimetrinės sudėties priklauso molio plastiškumas, susitraukimas džiūstant ir degant, gaminių stiprumas, atsparumas šalčiui.

Molio granulimetrinę sudėtį sudaro:

- stambusis smėlis, dalelės, didesnės nei 1 mm;
- vidutinio stambumo smėlis, dalelių dydis – nuo 0,25 iki 1 mm;
- smulkusis smėlis, dalelių dydis nuo 0,05 iki 0,25 mm;
- dulkės, dalelių dydis nuo 0,005 iki 0,05 mm;
- molingoji substancija, dalelės, mažesnės nei 0,005 mm.

Kiekvienos frakcijos kiekis išreiškiamas procentais absoliučiai sauso molio atžvilgiu. Smėlio frakcijos kiekis molyje nustatomas, plaunant jį pro sietus, o smulkesnės dalelės – sedimentacinės analizės būdu, t. y. pagal įvairaus dydžio dalelių nusėdimo greitį skystyje. Koks skystis moliui ir kitoms medžiagoms naudojamas granulimetrinei sudėčiai tirti, pateikta standarte LST EN 725-5.

Nedidelis smėlio kiekis (apie 7–8 %) yra naudinga priemaiša: jis sudaro molio masės skeletą, todėl džiovinami ir degami gaminiai mažiau traukiasi. Dulkių frakcija mažina molio rišlumą. Daug dulkių turintį molį sunku formuoti, be to, gaminiams reiki aukštesnės degimo temperatūros, ir dirbiniai gaunami nepakankamai tvirti bei neatsparūs šalčiui. Molingoji frakcija yra svarbiausia molio granulimetrinės sudėties dalis. Nustatyta, kad plastiškumu pasižymi tik mažesnės nei 0,005 mm dalelės. Jos būna plokštelinių formos,

todėl, suvilgytos vandeniu, lengvai slysta vienos kitomis, bet dėl traukos jėgų nepraranda ryšio. Dėl šios priežasties molingosios dalelės ir suteikia moliui pagrindinę ypatybę – plastiškumą.

Statybinei keramikai tinkamiausias molis, kuriame yra nuo 30 iki 70 % molingųjų dalelių. Lietuvos telkinių molyje mažesnių kaip 0,005 mm dalelių kiekis yra apie 30 %. Pavyzdžiui, Dysnos molyje (Ignalinos raj.) yra 36,4 %, Kertupio (Kauno Palemonas) – 35,5 %, Rokų ir Tauragės – apie 33,5 %.

Pagal dispersinių frakcijų kiekį molis skirstomas į:

- labai dispersišką (mažesnių nei 1 μ dalelių daugiau kaip 60 %);
- dispersišką (mažesnių nei 1 μ dalelių nuo 20 iki 60 %);
- nedispersišką (mažesnių nei 1 μ dalelių iki 20 %).

Medžiagos granulimetrinė sudėtis nustatoma, remiantis laminariškai judančių dalelių (mažesnių nei 2 mm) nusėdimo greičiu, kuris priklauso nuo dalelių dydžio. Molio granulimetrinei sudėčiai nustatyti naudojama Stokso lygtis:

$$v = \frac{d^2 \cdot (\rho_d - \rho_{sk}) \cdot g}{18\eta}, \quad (14.1)$$

Čia v – dalelės nusėdimo greitis, cm/s; d – dalelės skersmuo, cm;
 ρ_d – kietosios dalelės tankis, g/cm³; ρ_{sk} – skysčio tankis, g/cm³;
 g – laisvojo kritimo pagreitis, m/s²; η – dinaminė klampa, priklausanti nuo skysčio temperatūros, Pa·s.

Labai smulkias daleles (mažesnes nei 0,001 mm) smarkiai veikia skysčio molekulių šiluminis judėjimas, todėl jos beveik nenusėda, ir pagal šią lygtį apskaičiuoti dalelių nusėdimo greičio negalima.

Realiams srautams būtina įvertinti sienelių ir dalelių tarpusavio sąveikos įtaką nusėdimo greičiui. Ją įvertina suvaržymo koeficientas, priklausantis nuo indo ir dalelių skersmens santykio bei dalelių

tūrinės koncentracijos. Be to, netaisyklingos formos dalelės sėda lėčiau nei rutulio formos dalelės.

Stokso lygtis naudojama molio granulimetrinei sudėčiai nustatyti. Tam tikslui yra sudarytos lentelės (pvz., 14.1), kuriose apskaičiuota trukmė, per kurią tam tikro stambumo dalelės nusėda 10 cm (0,01 ir 0,005 mm skersmens dalelės) ar 7 cm (smulkesnės dalelės).

14.2. Molingųjų dalelių ir dulkių kiekio nustatymas

Metodo esmė. Nustatyti molingųjų ir dulkių dalelių kiekį bei molio dispersiškumą.

Naudojama įranga ir priemonės. Pipetinis prietaisas suspensijai paimti (14.1 pav.), svarstyklės, kūginė kolba, viryklė, sietas Nr. 0,63, matavimo cilindras, stiklinė lazdelė su guminiu antgaliu, lėkštelė, džiovykla, chronometras, termometras.

14.1 pav. Pipetinis prietaisas suspensijai paimti: 1 – stovas; 2 – pipetė; 3 – judančioji atrama; 4 – kolba; 5 – aspiratorius; 6 – gnybtas; 7 – indas

Bandymo eiga. Pasveriami 10 g (0,02 g tikslumu) sausų molio miltelių ir suberiama į 500 ml talpos kūginę kolbą, įpilama 150 ml distiliuoto vandens, 10 ml natrio pirofosfato ($\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$) tirpalo (40 g/l), kuris naudojamas kaip dispergentas. Tirpalas ant silpnos

liepsnos virinamas 1 val.. Atvėsinta iki patalpos temperatūros suspensija iškošiama per sieta Nr. 0,63. Sieto puses reikia apsaugoti uždedant kitą sieta, pvz., 1 arba 2 mm – sietai sudedami taip, kad išplovos ištektų per juos ir nutektų į 1 litro talpos matavimo cilindrą. Molis ant sieto plaunamas vandeniu, intensyviai maišant stikline lazdele su guminiu antgaliu, kad smulkiosios dalelės atsiskirtų ir patektų į nuoplovas. Plaunama tol, kol pro sieta pradeda tekėti skaidrus vanduo. Likutis ant sieto nuplaunamas į išdžiovintą ir pasvertą garinimo lėkštelę, ir palaukiama, kol dalelės nusės ant lėkštelės dugno. Lėkštelė su bandomąja mase džiovinama 105–110 oC temperatūroje iki pastovios masės. Suspensija matavimo cilindre praskiedžiama vandeniu iki 1 litro. Stikline lazdele, ant kurios užmautas skylėtas guminis diskas, judesiais aukštyn ir žemyn maišoma 1 min. 60 kartų per minutę greičiu. Paskui masė paliekama nusistovėti. Nusistovėjimo trukmė, atsižvelgiant į dalelių dydį ir suspensijos temperatūrą, pateikta 14.1 lentelėje.

14.1 lentelė. Molio dalelių nusėdimo greitis

Dalelių dydis, mm	Bandinio ėmimo gylis, cm	Suspensijos nusistovėjimo trukmė pagal temperatūrą			
		15 °C	20 °C	25 °C	30 °C
< 0,01	10	21 min. 06 s.	18 min. 39 s.	16 min. 35 s.	14 min. 50 s.
< 0,005	10	1 h. 24 min. 21 s.	1 h. 14 min. 34 s.	1 h. 06 min. 12 s.	59 min. 19 s.
< 0,001	7	24 h. 36 min. 26 s.	21 h. 45 min. 09 s.	19 h. 21 min. 12 s.	17 h. 17 min. 59 s.

Prieš tai patikrinama temperatūra greta pastatytame ir vandens pripildytame cilindre (ji imama lygi molio suspensijos temperatūrai). Bandiniai iš cilindro imami pipete, sujungta su aspiratoriumi (14.1 pav.).

Prietaiso aspiratorius sujungiamas su pipete, atleidžiamas gnybtas, kad vanduo iš aspiratoriaus tekėtų nuolat. Pipetės panardinimo gylis į cilindrą nustatomas iš 14.1 lentelės, atsižvelgiant į suspensijos temperatūrą. Atleidus aspiratoriaus gnybtą, į pipetę įsiurbiamą 25 ml suspensijos. Suspensijos ėmimo trukmė turi trukti ne ilgiau kaip 30 sek. Bandinys supilamas į specialius indelius ir džiovinamas 105–110 °C iki pastovios masės, tada pasveriamas. Gauti rezultatai įrašomi į 14.2 lentelę.

14.2 lentelė. Molio dalelių kiekio skaičiavimas

Rodikliai	Žymėjimas ir matavimo vienetai	Bandiniai	
		1	2
Fracijos masė nuo 0,63 mm akelių sieto	m_0 , g		
Svėrinio masė	m , g		
Išdžiovintos suspensijos bandinio masė	m_i , g		
Išdžiovintos suspensijos bandinio tūris	V_i , ml		
Dispergento masė	0,006, g		
Suspensijos tūris cilindre	V , ml		
Molio dalelių ant 0,63 mm akelių sieto kiekis	$X = \frac{m_0 \cdot 100}{m}, \%$		
Tam tikro dydžio molio dalelių kiekis	$X_i = \frac{(m_i - 0,006) \cdot V}{V_i \cdot m} \cdot 100, \%$		

Pagal formulę reikia apskaičiuoti: X – dalelių kiekį, kurių skersmuo didesnis nei 0,63 mm; X_2 ($X_2 = 100 - (X + X_3)$) – dalelių kiekį, kurių skersmuo nuo 0,01 iki 0,63 mm; X_3 – dalelių kiekį, kurių skersmuo mažesnis nei 0,01 mm; X_4 – dalelių kiekį, kurių skersmuo mažesnis nei 0,005 mm; X_5 – dalelių kiekį, kurių skersmuo mažesnis nei 0,001 mm.

Tam tikrų molio frakcijų kiekis randamas iš 14.3 lentelės. Skirtumas tarp pakartotinių tyrimų rezultatų neturi viršyti 3 %.

14.3 lentelė. Tam tikrų molio frakcijų kiekio skaičiavimas

Dalelių dydis, mm	Tam tikrų molio frakcijų kiekis, %
nuo 0,01 iki 0,005	$Y_1 = X_3 - X_4$
nuo 0,005 iki 0,001	$Y_2 = X_4 - X_5$
mažesnis nei 0,001	$Y_3 = X_5$
nuo 0,63 iki 0,01	$Y_4 = 100 - (X + Y_1 + Y_2 + Y_3)$

Išvada.....

14.3. Stambiagrūdžių molio intarpų kiekio nustatymas

Metodo esmė. Nustatyti stambiagrūdžių intarpų kiekį molyje.

Naudojama įranga ir priemonės. Indas moliui mirkyti, sietai, kurių akelių dydis 0,5, 1, 2, 5 mm, džiovykla, svarstyklės, slankmatis.

Bandymo eiga. Pasveriamas 1 kg molio, suberiama į indą, užpilama vandeniu, kurio tūris 3–4 kartus didesnis už svėrinį, ir masė gerai sumaišoma. Praėjus 1 val., mirkomo molio suspensija vėl sumaišoma ir perkošiama per 0,5 mm akelių dydžio sietą. Nuosėdos ant sieto plaunamos nesitaškančio vandens srove, kol ištekančios per sietą vanduo bus skaidrus. Ant sieto likę molio intarpai išdžiovinami iki pastovios masės 105–110 °C temperatūroje ir pasveriami 0,01 g tikslumu. Išdžiovinti molio milteliai persijojami per 1, 2 ir 5 mm akelių dydžio sietus (sietai sudedami mažėjančia tvarka). Pasveriamos liekanos ant sietų, stambiausi intarpai išmatuojami slankmačiu. Gauti rezultatai įrašomi į 14.4 lentelę.

14.4 lentelė. Stambiagrūdžių molio tarpų kiekio skaičiavimas

Rodikliai	Žymuo ir matavimo vienetai	Bandiniai	
		1	2
1	2	3	4
masė ant atitinkamo sieto: ant sieto, kurio akelių dydis 5 mm, ant sieto, kurio akelių dydis 2 mm, ant sieto, kurio akelių dydis 1 mm, ant sieto, kurio akelių dydis 0,5 mm	m_i , g m_1 , g m_2 , g m_3 , g m_4 , g		
Iš viso išdžiovinto bandinio masė	m , g		
tam tikros frakcijos kiekis ant sieto, kurio akelių dydis 5 mm, ant sieto, kurio akelių dydis 2 mm, ant sieto, kurio akelių dydis 1 mm, ant sieto, kurio akelių dydis 0,5 mm	$X_i = \frac{m_i \cdot 100}{m}$, % X_1 , % X_2 , % X_3 , % X_4 , %		
stambesnių nei 0,5 mm grūdelių kiekis	$X = X_1 + X_2 + X_3 + X_4$, %		

Pagal stambesnių nei 0,5 mm grūdelių kiekį molis skirstomas į tris grupes:

- mažo stambiagrūdžių tarpų kiekio, kai $X < 1$ %;
- vidutiniško stambiagrūdžių tarpų kiekio, kai $5 > X > 1$ %;
- didelio stambiagrūdžių tarpų kiekio, kai $X > 5$ %.

Išvada.....

14.4. Kitų žaliavų granuliometrinės sudėties nustatymas

Gaminat statybinę keramiką, kaip liesinantis priedas dažniausiai naudojamas smėlis.

Gamtiniame smėlyje gali būti organinių priemaišų: dulkių, molio dalelių, dumblo ir kt.

Smėlio granulimetrinės sudėties ir stambumo modulio nustatymas

Dalinė liekana – ant sieto liekančių grūdelių masės ir užpildo bandinio masės santykis. Suminė liekana – dalinių liekanų ant skaičiuojamojo sieto ir viršutinių (stambesniųjų) sietų suma. Smėlio stambumo modulis yra suminių liekanų ant kiekvieno sieto suma, padalyta iš šimto.

Metodo esmė. Nustatyti smėlio granulimetrinę sudėtį pagal liekanas ant sietų, sijojant sausą smėlį per standartinių sietų rinkinį.

Naudojama įranga ir priemonės. Džiovinimo spinta, svarstyklės, sietų rinkinys su apskritomis arba kvadratinėmis akutėmis.

Bandymo eiga. Smėlio bandinys išdžiovinamas $(110 \pm 5)^\circ \text{C}$ temperatūroje ir atsveriamas 1000 g smėlio. Atsvertas smėlis rankomis arba mechaniniu sijotuvu persijojamas per standartinių sietų kolonėlę. Sietai su stambesnėmis akutėmis dedami viršuje, su smulkesnėmis – apačioje. Sijoti baigiama, kai per 1 min. pro kiekvieną sietą persijojama ne daugiau kaip 0,1 % bandinio masės. Gauti tyrimo rezultatai surašomi į 14.5 lentelę, ir braižomas grafikas (14.2 pav.).

Dalinės liekanos ant kiekvieno sieto a_i , %, apskaičiuojamos pagal formulę:

$$a_i = \frac{m_i}{m} \cdot 100 \quad (14.2)$$

Čia m_i – liekanos ant skaičiuojamojo sieto masė, g; m – bandinio masė, g.

14.5 lentelė. Smėlio dalinių, suminių liekanų ir išbirų nustatymo rezultatai

Sieto akelių dydis, mm	Smėlio liekana ant sieto m_i , g	Dalinė liekana a_i , %	Suminė liekana A_i , %	Išbira B_i , %
4 (5)				
2 (2,5)				
1 (1,25)				
0,5 (0,63)				
0,25 (0,315)				
0,125 (0,14)				
0,063 (-)				
Masė P ant sietų dugno, g				
$\sum m_i + P$				
$100 \left[m - \left(\sum m_i + P \right) / m \right] < 1\%$

14.2 pav. Smėlio granulimetrinės sudėties kreivė

Suminės liekanos ant kiekvieno sieto A_i , % skaičiuojamos kaip suma dalinių liekanų ant skaičiuojamojo sieto ir stambesnių (viršutinių) sietų.

Išbiros per kiekvieną sietą B_i , %, apskaičiuojamos pagal formulę:

$$B_i = 100 - A_i, \% \quad (14.3)$$

Čia A_i – suminė liekana ant kiekvieno sieto, %.

Žinodami sumines liekanas ant kiekvieno sieto A_i , %, apskaičiuojame smėlio stambumo modulį M_s pagal formulę:

$$M_s = \frac{A_2 + A_1 + A_{0,5} + A_{0,25} + A_{0,125}}{100} \quad (14.4)$$

Čia $A_2, A_1, A_{0,5}, A_{0,25}, A_{0,125}$ – suminės liekanos ant sietų, kurių akelių dydis 2 ; 1 ; 0,5 ; 0,125 mm arba sietų, kurių akelių dydis 2,5 ; 1,25 ; 0,63 ; 0,315 ; 0,16 mm.

Pagal gautą stambumo modulį ir duomenis iš 14.6 lentelės smėlis priskiriamas vienai iš smėlio stambumo grupių.

14.6 lentelė. Smėlio grupės pagal jo stambumą

Smėlio stambumo grupės	Suminė liekana, %			Stambumo modulis, M
	0,63	0,315	0,14	
Labai stambus	35–70	60–96	90–100	2,5–3,0
Stambus	25–50	40–85	80–95	2,0–2,5
Vidutinis	12–35	30–75	70–95	1,5–2,0
Smulkus	4–30	15–50	40–92	1,0–1,5
Labai smulkus	0–10	5–36	58–80	0,7–1,0

Išvados.

14.5. Molio ir kitų žaliavų tankio nustatymas

Savituoju tankiu ρ vadinama medžiagos kietųjų fazių (absoliučiai tankios medžiagos) tūrio vieneto masė.

Dalelių tankis – tai sauso užpildo masės ir jo dalelių užimamo tūrio, įskaitant dalelėse esančias uždaras ir atviras poras, santykis.

14.5.1. Medžiagų savitojo tankio nustatymas

Metodo esmė. Nustatyti medžiagų savitąjį tankį.

Naudojama įranga. Džiovinimo spinta, porcelianinė grūstuvė, sietas, techninės svarstyklės, piknometrai, kaitinimo plytelė.

Bandymo eiga. Kad būtų galima nustatyti medžiagos kietųjų fazių (be porų) tūrį, bandinys iki nustatyto tai medžiagai smulkumo sutrinamas. Tūris nustatomas piknometriniu metodu: atsveriamas 10 g medžiagos miltelių, jie supilami į piknometrą ir užpilami distiliuotu vandeniu (ne daugiau kaip pusė piknometro tūrio) (14.3 pav., a).

14.3 pav. Piknometrų vaizdas: a – piknometras su milteliais ir vandeniu prieš statant į smėlio arba vandens vonią; b – piknometras su milteliais ir vandeniu po virinimo pripylus vandens iki brūkšnio; c – piknometras su vandeniu iki brūkšnio

Piknometre esantis vanduo su milteliais virinamas 15–20 min. Į ataušintą iki kambario temperatūros piknometrą pripilama distiliuoto vandens iki brūkšnio (14.3 pav., b), ir jis pasveriamas (m_2). Piknometras išplaunamas, vėl pripildomas distiliuoto vandens iki brūkšnio (14.3 pav., c) ir vėl pasveriamas (m_1). Rezultatai surašomi į 14.7 lentelę.

14.7 lentelė. Bandinių savitojo tankio nustatymo rezultatai

Rodiklio pavadinimas	Rodiklio žymuo ir matavimo vienetai	Bandiniai		
		1	2	3
Bandinio masė	m , g			
Piknometro su milteliais ir vandeniu masė	m_2 , g			
Piknometro tik su vandeniu masė	m_1 , g			
Miltelių tūris	$V_a = \frac{m + m_1 - m_2}{\rho_V}$, cm ³			
Savitasis tankis	$\rho = \frac{m}{V_a}$, g/cm ³			

Pastaba: $\rho_V = 1,0 \text{ g/cm}^3$ $\rho_V = 1,0 \text{ g/cm}^3$

Išvada.

14.5.2. Medžiagų piltnio tankio nustatymas

Metodo esmė. Nustatyti birių medžiagų piltnį tankį, sveriant sausą medžiagą standartiniame žinomo tūrio inde.

Naudojama įranga ir priemonės. Matavimo indas, laboratorinis samtelis, metalinė liniuotė, svarstyklės.

Bandymo eiga. Medžiaga prieš bandymą išdžiovinama (110 ± 5) °C temperatūroje iki pastovios masės ir ataušinama iki kambario temperatūros. Pasveriamas sausas, švarus 1 l (dm³) talpos matavimo indas ir pastatomas ant horizontalaus paviršiaus. Medžiaga

laboratoriniu samteliu pilama į matavimo indą iš ne didesnio kaip 5 cm aukščio nuo indo viršaus, kol pradeda byrėti per kraštus. Medžiagos perteklius metaline liniuote nubraukiamas lygiai su matavimo indo kraštais, nesutankinant medžiagos viršutinio sluoksnio.

Matavimo indas su tiriamą medžiaga pasveriamas 0,2 % tikslumu. Bandomi trys bandiniai, o gauti tyrimo rezultatai surašomi į 14.8 lentelę.

14.8 lentelė. Piltinio tankio tyrimo rezultatai

Rodiklio pavadinimas	Rodiklio žymuo ir matavimo vienetai	Bandiniai		
		1	2	3
Tuščio indo masė	m , g			
Indo su medžiagos bandiniu masė	m_1 , g			
Indo tūris	V , g/cm ³			
Medžiagos piltinis tankis	$\rho_p = \frac{m_1 - m}{V}$, g/cm ³			
Vidurkis	$\rho_{p,vid}$, g/cm ³			

Išvada.....

14.6. Molio plastiškumas

Plastiškumas – tai molio savybė sudaryti su vandeniu plastišką masę, kuri lengvai formuojama veikiant išorės jėgoms, o baigus joms veikti, išlaiko suteiktą formą. Plastiškumas yra pagrindinė molio savybė, dėl kurios galima iš jo daryti įvairios formos gaminius. Molio plastiškumo laipsnis priklauso nuo mineraloginės ir granulometrinės sudėties, priemaišų kiekio ir jų smulkumo, dalelių formos ir kt..

Molio plastiškumas nustatomas keliais būdais:

- pagal vandens kiekį, reikiamą normalios konsistencijos molio tešlai gauti;
- matuojant tešlos bandinio deformaciją, spaudžiant bandinį;
- pagal molio džiūstamąjį susitraukimą.

Kuo daugiau molyje yra smulkiųjų dalelių (mažesnių nei 0,005 mm), tuo daugiau vandens reikia joms suvilgyti. Todėl, norint gauti normalios konsistencijos masę, į plastišką molį reikia pilti daugiau vandens nei į liesą, o tai lemia didesnę galutinio gaminio susitraukimą ir defektų atsiradimo galimybę. Pavyzdžiui, labai plastiškam moliui reikia 28 % ir daugiau vandens, vidutinio plastiškumo – 20–28 % , o mažo plastiškumo – mažiau kaip 20 % vandens. Dėl šios defektų atsiradimo priežasties į keramikos formavimo masę dedama liesiklių (smėlio, šamoto ir kt.). Tačiau, esant per liesam moliui, plastiška tešla negaunama, ir formuoti dirbinių negalima. Molio plastiškumui didinti naudojami keli būdai:

- į formavimo masę įdedama riebiojo molio;
- dumbinama;
- šaldoma;
- vakuumuojama ir kt.

Molio plastiškumas apibūdinamas plastiškumo skaičiumi (P), kuris rodo, kiek ribinė tekančio molio drėgmė (toks molis teka tik specialiai sukrėstas) skiriasi nuo ribinės trupančio molio drėgmės (kai voliojant sausinama molio masė pradeda byrėti nesulimpančiais gabalėliais). Kuo molis plastiškesnis, tuo skirtumas tarp šios drėgmės reikšmių bus didesnis. Pagal plastiškumo skaičių molis skirstomas į:

- labai plastišką, $P \geq 25$;
- vidutinio plastiškumo, $25 > P \geq 15$;
- riboto plastiškumo, $15 > P \geq 7$;
- mažo plastiškumo, $7 > P \geq 3$;
- neplastišką, kai negaunama plastiška masė, $P < 3$.

Statybinei keramikai gaminti tinkamiausias molis, kurio plastiškumo skaičius 10–20 %. Lietuvoje randama vidutinio plastiškumo ir labai plastiško molio.

14.6.1. Molio plastiškumo nustatymas Vasiljevo metodu

Metodo esmė. Vasiljevo metodu nustatyti molio plastiškumo skaičių ir grupę.

Naudojama įranga ir priemonės. Prietaisas moliui smulkinti, Vasiljevo prietaisas (14.4 pav.), svarstyklės, 0,5 mm akelių sietas, lėkštelė, rėžtukas (rėžtuko galas yra kūgio formos, jo storis apačioje 1 mm, o viršuje – 2,5 mm), mentelė, piknometras.

14.4 pav. Vasiljevo prietaisas: 1 – stovas; 2 – diskas; 3 – lėkštelė; 4 – stiebelis; 5 – varžtelis; 6 – atrama; 7 – pagrindas

Bandymo eiga. Pasveriamas 100–150 g sauso molio bandinėlis. Molis smulkinamas taip, kad persisijotų per 0,5 mm akelių sieta. Iš persijotų molio miltelių pasveriamas 50 g svėrinys. Jis supilamas į lėkštutę ir pamažu maišant pilamas vanduo, kol gaunama vienodo drėgnumo plastiška tešla. Gauta masė išlyginama ant lėkštelės dugno

10–15 mm storio sluoksniu. Išlyginus tešla rėžtuku padalijama į dvi lygias dalis, dedama ant Vasiljevo prietaiso disko ir laikikliu pritvirtinama stiebelio viršuje. Atsukus laikiklį, leidžiama stiebeliui laisvai kristi ant pagrindo plokštės. Molio tešla indelyje sukrečiama, ir apatinis plyšelis susiaurėja. Kiekvieną kartą po sukrėtimo tikrinamas plyšelio plotis. Jei po trečio sukrėtimo molio tešlos plyšelis neišnyksta, papildomai įpilama 0,5–1 ml vandens, masė sumaišoma, ir bandymas kartojamas. Jeigu plyšelis išnyksta molio tešlai susijungus, sukrėtus pirmą arba antrą kartą, įdedama 1,0–1,5 g sauso molio, išmaišoma, ir bandymas vėl kartojamas. Bandymas baigiamas, kai trečią kartą sukrėtus plyšelis indo dugne pasidengia molio mase (pakanka 10–15 cm ilgio). Gauti rezultatai įrašomi į 14.9 lentelę.

14.9 lentelė. Ribinio tekančio molio drėgnio nustatymas

Rodiklis	Žymuo ir matavimo vienetai	Bandiniai		
		1	2	3
Molio tešlos masė	m_1 , g			
Sauso molio masė	m_2 , g			
Ribinis tekančio molio drėgnis	$W_1 = \frac{(m_1 - m_2)}{m_2} \cdot 100, \%$			

Norint nustatyti ribinį trupančio molio drėgnį, į lėkštutėje esančią molio tešlą įdedama susmulkinto sauso molio ir gerai išmaišoma. Plastiška tešla delnu voliojama ant plokštelės į apytiksliai 3 mm storio lazdeles tol, kol atsiranda skersinių plyšių, ir molio lazdelės pradeda byrėti skersai 3–10 mm ilgio trupinėliais. Gauti rezultatai įrašomi į 14.10 lentelę.

14.10 lentelė. Ribinio trupančio molio drėgno nustatymas

Rodiklis	Žymuo ir matavimo vienetai	Bandiniai		
		1	2	3
Molio tešlos masė	m_3 , g			
Sauso molio masė	m_4 , g			
Ribinis trupančio molio drėgnis	$W_2 = \frac{(m_3 - m_4)}{m_4} \cdot 100 \%$			

Plastiškumo skaičius (P) apskaičiuojamas pagal tokią formulę:

$$P = W_1 - W_2. \quad (14.5)$$

Gauti rezultatai įrašomi į 14.11 lentelę.

14.11 lentelė. Plastiškumo skaičiaus nustatymo rezultatai

Rodiklis	Bandiniai		Nuokrypis (tarp dviejų bandinių), %
	1	2	
Ribinis tekančio molio drėgnis (W_1), %			
Ribinis trupančio molio drėgnis (W_2), %			
Plastiškumo skaičius (P)			
Molio plastiškumo grupė			

Bandymas kartojamas du arba daugiau kartų, kol gauti rezultatai atitinka 14.12 lentelės leistinų duomenų nuokrypių reikalavimus.

14.12 lentelė. Leistini duomenų nuokrypiai

Plastiškumo skaičiaus (P) gautos reikšmės	Leistini nuokrypiai (tarp dviejų bandinių), %
mažiau nei 15	2
nuo 15 iki 25	3
daugiau nei 25	4

Išvada.

14.6.2. Molio plastiškumo nustatymas Zemaičensko metodu

Metodo esmė. Zemaičensko metodu nustatyti molio plastiškumo koeficientą.

Naudojama įranga ir priemonės. Prietaisas moliui smulkinti, Zemaičensko prietaisas (14.5 pav.), svarstyklės, 0,5 mm akelių sietas, piknometras, slankmatis.

14.5 pav. Zemaičensko prietaisas: 1 – molio tešlos bandinys;
2 – skalė; 3 – apkrova

Bandymo eiga. Pasveriamas 100–150 g sauso molio bandinėlis. Molis smulkinamas taip, kad persisijotų per 0,5 mm akelių sietą. Iš persijotų molio miltelių pasveriamas 100 g svėrinys. Į molį įpilama vandens, ir tešla padaroma tokios konsistencijos, kokios reikia gaminiams formuoti (kad gerai formuotų ir neliptų prie rankų).

Paprastai tokiai tešlai gauti reikia 17–30 % vandens, imant sausos molio masės. Iš tešlos padaromi 4,6 cm skersmens rutuliukai. Jie po vieną dedami į Zemaičensko prietaisą ir apkraunami vis didėjančia jėga tol, kol rutuliuko šonuose atsiranda plyšių. Tuo metu fiksuojama apkrova P (kg) ir rutuliuko suslėgimas a (cm), kuri parodo skalė. Gauti duomenys įrašomi į 14.13 lentelę.

14.13 lentelė. Plastiškumo koeficiento nustatymas

Rodiklis	Žymuo ir matavimo vienetai	Bandiniai	
		1	2
Apkrova	P , kg		
Rutuliuko susislėgimas	a , cm		
Plastiškumo koeficientas	$k_p = P \cdot a$, kg cm		

Plastiškumo koeficientas rodo darbą, sunaudotą molio rutuliukui suspausti, kol atsiras plyšių. Plastiškumo koeficiento reikšmė didėja, didėjant molio plastiškumui. Plastiško molio koeficientas siekia 3,0–3,5 kg cm.

Išvada.

14.6.3. Molio plastiškumo nustatymas pagal vandens kiekį, reikalingą normalios konsistencijos molio tešlai gauti, ir džiūstamąjį susitraukimą

Metodo esmė. Nustatyti molio plastiškumą pagal vandens kiekį, reikalingą normalios konsistencijos molio tešlai gauti, ir pagal molio džiūstamąjį susitraukimą

Naudojama įranga ir priemonės. Džiovykla, prietaisas moliui smulkinti, svarstyklės, 1 mm akelių sietas, piknometras, volelis, slankmatis, skardos rėmelis 50×50×10 mm.

Bandymo eiga. Molis išdžiovinamas 105–110°C temperatūroje, susmulkinamas ir persijojamas per 1 mm sieta. Vandens įpilama tiek, kad išmaišius išeitų normalios konsistencijos tešla (lengvai formuotusi ir gniaužoma neliptų prie rankų). Gauti duomenys įrašomi į 14.14 lentelę, ir apskaičiuojamas molio plastiškumas pagal vandens kiekį, reikalingą normalios konsistencijos tešlai gauti.

14.14 lentelė. Molio plastiškumo nustatymas pagal vandens kiekį, reikalingą normalios konsistencijos tešlai gauti

Rodikliai	Žymuo ir matavimo vienetai	Bandiniai		
		1	2	3
Sauso molio masė	m_0 , g			
Vandens masė mišinyje	m , g			
Vandens kiekis mišinyje	$X = \frac{m}{m_0} \cdot 100$, %			
Vidutinis vandens kiekis mišinyje	$X_V = \frac{(X_1 + X_2 + X_3)}{3}$, %			
Molio plastiškumo grupė: 1) labai plastiški, kai $X_V > 28$ %; 2) vidutinio plastiškumo, kai $20 < X_V < 28$ %; 3) mažo plastiškumo, kai $X_V < 20$ %.				

Iš gautos masės apytiksliai išpjauamas 250×150×20 mm molio bandinys ir specialiu voleliu iškočiojamas į vienodo storio plokštę. Iš paruoštos molio plokštės skardos rėmeliu išpjaujami trys 50×50×10 mm dydžio bandiniai. Jie paguldomi ant lygios plokštės, ir per jų įstrižaines smailiosiomis slankmačio kojėlėmis 50 mm atstumu viena nuo kitos įspaudžiamos nedidelės įspaudos. Paruošti bandiniai vieną parą džiovinami patalpos temperatūroje, o paskui ne mažiau kaip 1 val. džiovykloje 105–110 °C, kol sukietėja. Bandiniams išdžiūvus, slankmačiu išmatuojami atstumai tarp įspaudų. Gauti rezultatai įrašomi į 14.15 lentelę.

14.15 lentelė. Molio plastiškumo pagal susitraukimą džiūstant nustatymas

Rodikliai	Žymuo ir matavimo vienetai	Bandiniai		
		1	2	3
Atstumas tarp pažymėtų įspaudų nedžioviname bandinyje	l_0 , mm			
Atstumas tarp pažymėtų įspaudų išdžioviname bandinyje	l_1 , mm			
Džiūstamasis susitraukimas	$S_{dži} = \frac{l_0 - l_1}{l_0} \cdot 100, \%$			
Vidutinis susitraukimas džiūstant	$S_{dž, vid} = (S_{dž1} + S_{dž2} + S_{dž3})/3$			
Molio plastiškumo grupė: 1) labai plastiški, kai $S_{dž, vid} > 15 \%$; 2) plastiški, kai $10 < S_{dž, vid} < 15 \%$; 3) vidutinio plastiškumo, kai $7 < S_{dž, vid} < 10 \%$; 4) mažo plastiškumo, kai $S_{dž, vid} < 7 \%$;				

Išvada.**Kontroliniai klausimai**

1. Ką vadiname molio granuliometrine sudėtimi?
2. Į kokias grupes skirstoma molio granuliometrinė sudėtis?
3. Kokiais būdais gali būti nustatoma molio granuliometrinė sudėtis?
4. Kokia frakcija neigiamai veikia molio kokybę? Kaip?
5. Kaip skirstomas molis pagal dispersinių frakcijų kieki?
6. Kada ir kodėl negalima naudoti Stokso lygties?
7. Kaip nustatomas molingųjų dalelių ir dulkių kiekis molyje?
8. Kaip nustatomas stambiagrūdžių tarpų kiekis molyje?

9. Į kokias grupes skirstomas molis pagal stambiagrūdžių intarpų kiekį?
10. Ką vadiname medžiagos savituoju tankiu?
11. Kuo skiriasi medžiagos tankis nuo savitojo tankio?
12. Kaip nustatomi medžiagos savitasis tankis?
13. Kas yra molio plastiškumas?
14. Kokiais būdais gali būti nustatomas molio plastiškumas?
15. Kaip galima koreguoti molio plastiškumą, formuojant keraminius dirbinius?
16. Ką parodo plastiškumo skaičius?
17. Kaip skirstomas molis pagal plastiškumo skaičių?
18. Nuo ko priklauso molio plastiškumo laipsnis?
19. Kaip nustatomas ribinis tekančio molio drėgnis?
20. Kaip nustatomas ribinis trupančio molio drėgnis?
21. Kaip nustatomas plastiškumas pagal molio susitraukimą džiūstant?
22. Kaip nustatomas molio plastiškumas pagal vandens kiekį, reikalingą normalios konsistencijos tešlai gauti?
23. Kaip randamas molio plastiškumas pagal Zemjačenskio metodą?

15. TERMOGRAFINĖ MEDŽIAGŲ ANALIZĖ

Terminė analizė (termografija) atliekama, norint nustatyti molio ar kitų žaliavų savybes ir procesus, vykstančius medžiagose, jas kaitinant arba šaldant. Tai daroma specialiu prietaisu, kuris užrašo termines kreives (termogramas).

Labiausiai paplitęs termografijos tyrimo metodas yra *diferencinė terminė analizė (DTA)*. Šis metodas gali būti naudojamas terminiams procesams tirti (fiziniams ir cheminiams), medžiagos identifikacijai, kiekybinei ir kokybinei sudėčiai, terminėms konstantoms nustatyti, tiriant fazių virtimo kinetiką ir chemines reakcijas bei reakcijoms, vykstančioms kietosiose fazėse, tirti.

Diferencinė terminė analizė leidžia ištirti fazinius pokyčius ir chemines reakcijas, vykstančias medžiagai kaistant arba šalant, pagal šiuos pokyčius lydinčius terminius efektus. Šis metodas pagrįstas pagrindinėmis medžiagų savybėmis: chemine medžiagų sudėtimi ir jų struktūra, kurios atsispindi medžiagų pokyčiuose, jas kaitinant ir šaldant.

Analizė vykdoma specialia aparatūra, leidžiančia registruoti termines kreives, t. y. grafikus, atspindinčius išrinkto taško nagrinėjamoje medžiagoje temperatūros priklausomybę nuo laiko arba aplinkos temperatūros, kuri nepertraukiamai keičiasi pagal nustatytą programą.

Vykdam *DTA* analizę, šiluminiai pokyčiai, vykstantys medžiagai kaistant, registruojami kreive koordinčių sistemoje (15.1 pav.).

Jeigu šildymo proceso metu, esant kokiai nors temperatūrai, tiriamajame bandinyje įvyks faziniai arba cheminiai pokyčiai, lydimi šilumos išskyrimo arba sugėrimo, tai iškart atsiranda temperatūrų skirtumas tarp bandinio ir etalono. Šio skirtumo dydis yra proporcingas išskiriamos arba sugeriamos šilumos kiekiui. Temperatūros skirtumas registruojamas *DTA* nuokrypiu į viršų arba apačią. Šis nuokrypis nuo bazinės linijos vadinamas terminiu efektu. Terminiai efektai, atitinkantys procesus, susijusius su šilumos

sugėrimu, vadinami endoterminiais, o susiję su šilumos išskyrimu ir registruojami DTA kreivėje nuokrypiu į viršų, – egzoterminiais.

a)

b)

15.1 pav. Termograma: T – temperatūros kėlimo greitis; TG – masės kitimo kreivė; DTG – diferencinė masių pokyčio kreivė; DTA – diferencinė terminių pokyčių kreivė; 66,2°C; 499,1°C – endoterminis efektas; 651,3°C; 754,1°C – egzoterminis efektas; a – nulinė linija; b – bazinė linija

Be efektų skaičiaus, jų ženklo ir temperatūrų, kuriose jie užfiksuoti, intervalo, nagrinėjant termogramas, būtina atsižvelgti į jų intensyvumą (15.1 pav. a), piko plotą (S) ir jo formos indeksą ($I = E_p D / ED$). Terminio efekto formos indeksas leidžia nustatyti konkrečius mineralo tipus.

Endoterminius efektus sukelia šie procesai:

- absorbcinio vandens išsiskyrimas;
- kietųjų medžiagų džiovinimas;
- hidratinio vandens išsiskyrimas iš kristalohidračių (molio mineraluose);
- struktūrinio vandens išsiskyrimas (molio mineraluose);
- disociacija, išsiskiriant dujinei fazei (karbonatuose, sulfatuose, sulfiduose);
- polimorfiniai pokyčiai (α -kvarco virtimas β -kvarcu);
- skystosios fazės susidarymas; mineralo kristalinės gardelės iširimas be dujinės fazės išsiskyrimo arba išsiskiriant dujinei fazei;
- dujų garavimas.

Egzoterminius efektus sukelia tokie procesai:

- medžiagos virsmas iš amorfinės būsenos į kristalinę;
- polimorfiniai pokyčiai, susiję su perėjimu iš nepastovaus būvio į pusiausvyrą;
- koloidinės masės kristalizacija; karbonizacijos reakcijos;
- oksidacijos procesai (organinių medžiagų degimas, magnetito virtimas hematitu);
- kietųjų fazių susijungimo reakcijos.

Daugumoje medžiagų kaitinant vyksta keletas pokyčių, kurie registruojami terminiais efektais *DTA* kreivėje, būdingais tai medžiagai. Taigi dauguma medžiagų turi individualias termines charakteristikas, kurios atspindi jų pokyčius kaitinant, o tai priklauso

nuo medžiagos sudėties, struktūros, pokyčių mechanizmo ir kinetikos. Pagal termogramą galima gauti kokybinę bandinio charakteristiką.

Kartu su *DTA* naudojamas medžiagos tyrimo metodas, besiremiantis medžiagos masės pokyčiu – tai vadinamoji *termogravimetrinė analizė (TGA)*. Šis būdas leidžia nustatyti, kokie masės pokyčiai (mažėja ar didėja) vyksta, kaitinant medžiagą, ir kokie tų pokyčių dydžiai. Šios analizės rezultatas yra *termogravimetrinė kreivė (TG kreivė)*, kuri vaizduojama grafiškai: medžiagos masės pokyčio priklausomybė nuo laiko arba temperatūros. Tiriamosios medžiagos masės pokytis registruojamas automatiškai, kai nenutrūkstamai kaitinama.

Kartu su *DTA* taikomas *diferencinis termogravimetrinis metodas (DTG)*. Juo nustatomi procesai, vykstantys kartu su masės pokyčiais. *DTG* kreivė registruoja masės kitimo greitį (t. y. reakcijos greitį). *DTG* kreivė yra išvestinė nuo įprastos masės kitimo kreivės *TG* ir išreiškia šios masės kitimo greitį. *DTG* leidžia gauti teisingus duomenis net tada, kai dvi reakcijos, susijusios su masės praradimu, yra labai arti viena kitos ar iš dalies dengia viena kitą arba kai reakcijos vyksta paileiui, esant dideliems ir mažiems masės pokyčiams. Greitai vieni po kitų vykstantys procesai, kurie termogravimetrinėje kreivėje persidengia, diferencinėje-termogravimetrinėje kreivėje yra ryškiai išskiriami.

Metodo esmė. Nustatyti terminių efektų temperatūrą, jų pobūdį, intensyvumą, kaitinamos medžiagos masės pokyčius ir pagal šiuos duomenis prognozuoti efektų prigimtį.

Naudojama įranga ir priemonės. Svarstyklės, tigliai, derivatografas Q 1500D, inertinės medžiagos milteliai, tiriamosios medžiagos milteliai.

Bandymo eiga. Termografinių bandymų rezultatų tikslumas priklauso nuo: tinkamo medžiagos paruošimo analizei, jos smulkumo laipsnio, analizei reikiamo medžiagos kiekio, atsvertos medžiagos

koncentracijos, pirminio bandinio apdorojimo druskos rūgštimi arba vandenilio peroksidu.

Bandinio susmulkinimo laipsnis turi didelę reikšmę, nes, sausiai sutrinant mineralus, suardoma jų struktūra, ir atsiranda amorfinis komponentas. Mineralų, neturinčių vandens, struktūra tiriant nesikeičia (kvarco). Dėl to mineralai, kurie neturi Fe^{2+} , Mn^{2+} ir kt., ruošiami juos sutrinant iki pudros (0,0043 mm). Jeigu į bandinio sudėtį įeina didelis kiekis Fe, Mn ar kitų medžiagų, tiriant pereinančių iš žemesnės valentingumo klasės į aukštesnę, tai smulkinti jų reikia labai atsargiai ir trumpai. Tas pat galioja ir mineralams, kurie turi galinčių išgaruoti medžiagų.

Ilgai smulkinant mineralus, pvz., kaolinito, chloritų, sulfatų grupes ir kt., galima net be kaitinimo dehidratuoti ir visiškai arba iš dalies suardyti kristalinę gardelę, t. y. pakeisti struktūrą bei fizikines-chemines savybes. Šie mineralai praranda vandenį, įgauna adsorbcinį vandenį ir tampa rentgenoamorfiniai. Šiuos mineralus ruošti reikia ypač atsargiai.

Ruošiant stambiakristalinius mineralus, jų nereikia trinti, o tik smulkiai sukarpyti ir galima tirti termografiškai natūralioje būsenoje.

Tiriant molio mineralus *DTA* metodu, reikia juos susmulkinti iki <0,001 mm frakcijos, nes esančios ne molio mineralų priemaišos smarkiai pakeičia efektus, susijusius su molio mineralų pokyčiais.

Prietaisas derivatografas gali vienu metu iš vieno medžiagos bandinio automatiškai užregistruoti keturias kreives: temperatūrinę *T*, diferencinę *DTA*, termogravimetrinę *TG* ir diferencinę-termogravimetrinę *DTG*.

Tinkamai paruošus bandinius, kaitinimo krosnis pakeliama, ant tiglio laikiklio uždedamas tiglio, pilnas inertinės medžiagos. Inertinė medžiaga parenkama tokia, kurią kaitinant, nevyksta terminiai pokyčiai, taip pat jos savitoji šiluminė talpa ir šilumos laidis turi būti artimi tiriamosios medžiagos savitajai šiluminei talpai ir laidžiui. Dažniausiai naudojami korundo arba magnio oksido milteliai.

Į kitą tigli supilami tiriamosios medžiagos milteliai. Jis dedamas į kaitinimo krosnį, pasvarėliais svarstyklės gražinamos į nulinę padėtį. Šie pasvarėliai atitinka tiriamosios medžiagos masę. Prietaisas paruošiamas darbui: krosnis nuleidžiama, nustatomas temperatūros kėlimo greitis, potenciometro kanalų jautrumas, juostos slinkimo greitis, ir įjungiama temperatūros kėlimo programa.

Keraminių plytų formavimo masės termograma parodyta 15.2 pav. Į jos sudėtį įeina anortitas, kvarcas, hematitas (Fe_2O_3), špinelis (FeAl_2O_3).

15.2 pav. Bandinio termograma: TG – masės kitimo kreivė; DTG – diferencinė masių pokyčių kreivė; DTA – diferencinė terminių pokyčių kreivė (medžiaga – smulkūs milteliai)

Apibūdiant termogramas, būtina užfiksuoti pradinis duomenis ir sąlygas termogramos fiksavimo metu.

15.2 pav. termogramoje užrašytos trys kreivės. Pirmoji diferencinė terminių pokyčių kreivė (DTA). DTA kreivėje matyti pirmasis endoterminis efektas 71 °C temperatūroje, antrojo

endoterminio efekto maksimumas $501\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūroje, trečiojo – $730\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūroje. Pirmojo egzoterminio efekto maksimumas $659\text{ }^{\circ}\text{C}$, antrojo – $762\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūroje.

Antroji masės kitimo kreivė (TG) rodo masės pokytį. Žinant svarstyklių jautrumą ir pradinę medžiagos masę, galima apskaičiuoti masės pokyčius po kiekvieno efekto.

Trečioji diferencinė masės pokyčių kreivė (DTG) rodo, koku greičiu ir kokioje temperatūroje kinta bandinio masė. Tuo atveju, jei bandinio masė nepakis bandymo metu, DTG bus horizontali. Šios kreivės nukrypimas žemyn rodo, kad bandinys netenka masės toje temperatūroje, o aukštyn – kad bandinio masė didėja. Nuokrypio amplitudė rodo masės pokyčio intensyvumą.

Aprašant termogramas, reikia nurodyti egzoterminių ir endoterminių maksimumų temperatūros reikšmes ir paaiškinti jų priežastį. Tai geriausia padaryti surašant duomenis į pateiktą 15.1 lentelę (15.1 lentelėje pateiktas bandinio (15.2 pav.) termogramos paaiškinimas).

Lentelėje užrašoma:

- temperatūrų intervalas, kuriame užregistruotas efektas, T_0 – T_1 ;
 - a) terminio efekto pradžios temperatūra T_0 , t. y. DTA kreivės nuokrypio pradžia nuo bazinės linijos;
 - b) terminio efekto pabaigos temperatūra T_1 ,
- terminio efekto maksimali temperatūra (pikas, viršūnė, ekstremalus taškas) T_{max} , t. y. kreivės DTA maksimalaus nuokrypio temperatūra nuo bazinės linijos;
- terminio efekto pobūdis (endoterminis ar egzoterminis efektas);
- masės nuostoliai, mg ir % (užrašomi bendrieji masės nuostoliai nagrinėjamojo terminio efekto pabaigos temperatūros taške);

- terminio efekto amplitudė (terminio efekto aukštis, gylis) A – dydis (15.1 pav.), nustatantis didžiausią DTA nuokrypį nuo bazinės linijos, vykstant virsmo procesams tiriamojoje medžiagoje;
- terminio efekto plotas S (15.1 pav.), esantis tarp bazinės linijos (b) ir DTA kreivės;
- terminio efekto formos indeksas I , t. y. asimetrijos matas, kurį atspindi dalių santykis E_1D/ED ;
- pateikiamas terminio efekto paaiškinimas (kokie procesai sukėlė nagrinėjamąjį terminį efektą).

Jei egzoterminis efektas yra fiksuojamas siaurame temperatūrų intervale kaip intensyvus aštria viršūne ir simetriniu piku, tai rodo, kad reakcija greita, „sprogstanti“. Tokius efektus lydi naujos kristalinės fazės iš smulkiadispersinių produktų susidarymas. Egzotermio efekto išsiplėtimas, asimetriškumas būdingas lėtam, nuo aplinkos oksidacijos priklausančiam procesui. Paprastai toks efektas pagrįstas oksidacijos ir degimo procesu.

Kai kuriais atvejais pokyčiai vyksta labai artimuose temperatūrų intervaluose; tada DTA kreivėje matomi terminių efektų persidengimai arba efekto sudvigubėjimas.

Kai kuriais atvejais procesai, vykstantys medžiagoje ją kaitinant, gali būti vienareikšmiai interpretuoti tik lyginant DTA ir TG kreives su DTG , kuri leidžia nustatyti vykstančios reakcijos greitį ir kad tame pačiame temperatūrų intervale vyksta du priešingo ženklo procesai. Vadinas, detalai analizuojant DTA geometrinius elementus kartu su TG ir DTG , galima nustatyti virsmo pobūdį. Detalesnė efektų fizikinė ir cheminė analizė atliekama, kompleksiškai tiriant pradinę medžiagą iki jos pokyčių pradžios, taip pat tarpinių ir galutinių virsmų produktus rentgenografinė, optine, spektrometrine, chemine analize.

15.1 lentelė. Nagrinėjamos termogramos (15.2 pav.) charakteristikos

Termogramos charakteristika		Terminio efekto numeris		
		1	2	3
Temperatūrų intervalas T_0-T_f °C				
Efekto maksimumas T_{max} , °C				
Efekto pobūdis				
Masės nuostoliai	%/°C			
	%			
Terminio efekto amplitudė A , mm				
Terminio efekto plotas S , mm ²				
Terminio efekto formos indeksas I				
Efekto paaiškinimas				

Išvada.

Kontroliniai klausimai

1. Koks prietaisas naudojamas terminiams efektams nustatyti?
2. Kokiems procesams tirti naudojama diferencinė terminė analizė?
3. Kokie procesai sukelia endoterminius efektus?
4. Kaip nustatomi masės pokyčiai?
5. Kokie pagrindiniai reikalavimai keliami inertinei medžiagai, naudojamai terminėje analizėje?
6. Ką rodo diferencinė masės pokyčių kreivė terminėje analizėje?

16. MOLIO IR KITŲ ŽALIAVŲ DŽIOVINIMO EFEKTYVUMO TYRIMAS

Džiovinimas yra procesas, kai šiluminiu būdu iš medžiagos išgarinama drėgmė. Medžiagai džiūstant, vyksta difuzija, kurios metu drėgmė difunduoja iš vidinių sluoksnių į paviršių, o nuo jo garuoja į aplinką. Konvekcinio džiovinimo metu medžiaga džiovinama šilto oro ar dūmų sraute. Džiovinimo agentas perduoda dalį savo šilumos medžiagai ir pašalina iš jos išgaravusio vandens garą. Džiovinant šiuo būdu, džiovinamam agentui, išildytam kaloriferyje arba kūrykloje, šiluma papildomai tiekama darbo kameroje.

Medžiagoje esanti drėgmė skirstoma į laisvąją, higroskopinę ir chemiškai surištą (nelaisvą). Laisvoji drėgmė dar gali būti vadinama mechanine, arba kapiliarine drėgme, nes ji susigėrusi į medžiagos tuštumas bei didesnius kapiliarus. Ši drėgmė lengvai pašalinama medžiagą džiovinant. Higroskopinė drėgmė yra sugerta į smulkius medžiagos kapiliarus arba difuzijos būdu patekusi į medžiagos ląsteles, dar gali būti vadinama struktūrine drėgme. Ši drėgmė džiovinimo metu iš medžiagos nėra visiškai pašalinama. Chemiškai nelaisva drėgmė (kristalinė, hidratinė), džiovinant medžiagą, nepašalinama.

Kapiliarinių poringųjų medžiagų džiūvimo procesą galima suskirstyti į tris pakopas: pirmoji – medžiagos pašildymas pastoviu greičiu; antroji – džiūvimas mažėjančiu greičiu; trečioji – džiūvimas. Šias pakopas galima pavaizduoti lūžių taškų diagrama (16.1 pav.).

Pirmoje atkarpoje džiūvimas vyksta, esant pastoviam džiūvimo greičiui, kol išgaravusio vandens kiekis tiriamojo kūno paviršiuje dėl kapiliarais patenkančio vandens lieka pastovus. Džiovinamos medžiagos temperatūra T ir drėgmės garavimo greitis U didėja tol, kol susidaro pusiausvyra tarp šilumos kiekio, kurį gauna medžiagos paviršius, ir šilumos sąnaudų drėgmei išgarinti. Šildomos medžiagos temperatūra pakyla iki drėgno termometro temperatūros T_{dr} , o

drėgmė tik truputį sumažėja. Džiūvimo greitis priklauso nuo išorės sąlygų, t. y. nuo aplinkos temperatūros, reliatyvaus aplinkos drėgnumo, šilumnešio greičio, bandinių matmenų.

16.1 pav. Medžiagų džiūvimo savybių scheminė išraiška

Antroje džiūvimo atkarpoje vanduo garuoja iš gilesnių sluoksnių. Galinčio paviršiuje išgaruoti drėgmės kiekio neaprupina kapiliarais vykstantis vandens tiekimas. Našumas dėl džiūvimo mechanizmo labai sumažėja, todėl džiūvimo kreivėje pastebimas lūžis. Pagrindinis procesas vyksta medžiagos viduje, kur dominuoja vandens garų slėgis. Pastovaus džiūvimo greičio periodui būdingas stacionarusis šilumokaitos ir drėgmės kaitos procesas. Džiūvimo greitis čia priklauso nuo išorinės difuzijos. Tuo periodu džiūvimo greitis yra didžiausias, o medžiagos temperatūra pastovi. Šioje, antroje, pakopoje kreivė yra pailginta, ji pasiekia galutinį džiūvimo greitį. Šioje džiūvimo atkarpoje vandens kiekis kiekvienoje medžiagos

vietoje yra žemiau maksimalios pusiausvrosios drėgmės kiekio, tad džiūvimo kreivėje pastebimas naujas lūžis.

Džiūvimo mažėjančiu greičiu periodo pradžią atitinka taškas K , vadinamas kritiniu tašku, o medžiagos drėgmė tame taške – tai kritinė drėgmė W_K (3.1 pav.). Džiūvimui mažėjančiu greičiu didžiausią įtaką turi vidinė difuzija (drėgmės judėjimo į medžiagos paviršių procesas). Trečioje džiūvimo atkarpoje vandens išgaravimas vyksta tik pačioje medžiagoje. Mažėjant vandens kiekiui, atitinkamai mažėja vandens garų dalinis slėgis. Šio proceso pabaigoje susidaro pusiausviroji drėgmė, džiūvimo greitis priartėja prie nulio, o medžiagos temperatūra pasiekia džiovinimo agento, t. y. aplinkos temperatūrą T_0 . Pirmojo lūžio taško vieta, antrosios ir trečiosios atkarpų kreivės eiga priklauso nuo aplinkos sąlygų ir bandinio parametrų.

Kai medžiaga pasiekia kritinę drėgmę W_K , ji nustoja trauktis. Toliau medžiagą (tokią kaip molis) galima džiovinoti agresyviu režimu, nebijant, kad medžiaga sutrūkinės. Džiovinimo įrenginiuose parenkamas džiovinimo greitis priklauso nuo traukimosi įtempimų ir atsirandančių deformacijų. Daugiausia susitraukia koloidinės medžiagos ir koloidinės aktytosios kapiliarinės medžiagos.

Kad vanduo garuotų iš medžiagos, vandens garo slėgis džiovinamos medžiagos paviršiuje turi būti didesnis už vandens garo slėgį aplinkoje. Kai pasiekama drėgmės kaitos pusiausvyrą, šios reikšmės tampa lygios. Šioje temperatūroje pusiausviroji drėgmė (atitinkanti sočiųjų garų dalinį slėgį) yra vadinama higroskopiniu tašku.

Džiūvimo greitis U priklauso nuo drėgmės kiekio W , kuris išgarinamas nuo medžiagos paviršiaus ploto A per tam tikrą laiko trukmę t :

$$U = \frac{W}{A \cdot t}, \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ s}). \quad (16.1)$$

Čia: W – drėgmės kiekis medžiagoje, kg; A – medžiagos paviršiaus plotas, m^2 ; t – trukmė, s.

Kiekybiniai medžiagos drėgmės rodikliai yra santykinė ir absoliučioji drėgmė. Santykinė drėgmė W_s apskaičiuojama pagal tokią formulę:

$$W_s = \frac{W}{m + W} \cdot 100, \% \quad (16.2)$$

Čia: W – drėgmės kiekis medžiagoje, kg; m – sausosios medžiagos masė, kg.

Absoliučioji drėgmė gali būti randama taip:

$$W_a = \frac{W}{m} \cdot 100, \% \quad (16.3)$$

Džiovinamai medžiagai yra nustatomas linijinis susitraukimas L , jis gali būti apskaičiuojamas pagal tokią formulę:

$$L = \frac{l_0 - l_g}{l_g} \cdot 100, \% \quad (16.4)$$

Čia: l_0 – pradinis bandinio ilgis, m; l_g – bandinio ilgis po džiovinimo, m.

Metodo esmė. Ištirti procesus, vykstančius medžiagoje ją džiovinant. Nustatyti džiovinamos medžiagos linijinius susitraukimus ir masės pokyčius. Grafiškai atvaizduoti termometrų rodomų temperatūrų ir džiovinamos medžiagos masės kitimo priklausomybes nuo džiovinimo trukmės.

Naudojama įranga ir medžiagos. Džiovinimo stendas (16.2 pav.), svarstyklės, indikatorius, slankmatis, bandinių forma, molio milteliai, sietas, kurio akučių skersmuo 1 mm.

Bandymo eiga. Molio milteliai sijojami per sieta, kurio akučių skersmuo 1 mm. Iš tų miltelių paruošiama plastiška molio masė (jos drėgmė gali svyruoti nuo 20 iki 25 %). Masė paliekama išsigulėti nuo 3 iki 8 parų, kad drėgmė pasiskirstytų masėje tolygiai. Iš jos suformuojamas cilindro formos bandinėlis, kurio aukštis 250, o skersmuo 50 mm. Bandinėlis pasveriamas, slankmačiu pamatuojamas jo ilgis. Paskui įtvirtinamas specialiaame stende, kurio schema pateikta 16.2 pav. Tada stendas statomas ant svarstyklių (1). Prie bandinio viršutinės dalies priglaudžiamas indikatorius (4), įtvirtintas stovė (2) ir matuojantis bandinėlio susitraukimą. Stovas su bandinėliu šildomas kaitinimo elementu (5) taip, kad bandinėlio aplinkos temperatūra kiltų 0,5 laipsn./min. greičiu iki 100 °C. Ventilatorius (6) paskirsto įkaitusį orą po visą stendo ertvę. Temperatūra matuojama prie bandinio prigląustu termometru (7) (T_1) ir stende įtvirtintu termometru (8) (T_2).

16.2 pav. Bandinio džiovinimo stendas: 1 – svarstyklės; 2 – stovas;
3 – bandinys; 4 – indikatorius; 5 – kaitinimo elementas;
6 – ventilatorius; 7, 8 – termometras

Bandymo pradžioje fiksuojama indikatoriaus pradinė padėtis ir pradinė temperatūra, paskui įjungiamas kaitinimo elementas. Kas 5 minutes užrašoma bandinėlio masė ir indikatoriaus padėtis, termometrų rodmenys. Bandymas baigiamas, kai bandinys nustoja trauktis. Tada bandinys dedamas į džiovyklą ir džiovinamas $100 \pm 5^\circ\text{C}$ iki pastoviosios masės. Bandymo metu džiovinimo charakteristikos užrašomos į 16.1 lentelę. Linijinis susitraukimas apskaičiuojamas pagal 16.4 formulę, santykinė drėgmė – pagal 16.2 formulę, absoliučioji drėgmė – pagal 16.3 formulę, džiūvimo greitis – pagal 16.1 formulę.

Iš gautų duomenų braižomi grafikai:

- drėgmės W priklausomybė nuo laiko t ;
- susitraukimo L priklausomybė nuo santykinės drėgmės W_s .

16.1 lentelė. Džiovinimo proceso charakteristikų tyrimai

Džiovinimo proceso charakteristika	Džiovinimo trukmė t , min.					Išdžiovinus džiovynkloje
	0	5	10	15	...	
Bandinio masė, g						
T_1 , $^\circ\text{C}$						
T_2 , $^\circ\text{C}$						
Indikatoriaus rodmuo, mm						
Linijinis susitraukimas L , %						
Drėgmės kiekis W , kg						
Santykinė drėgmė W_s , %						
Absoliučioji drėgmė W_a , %						
Džiūvimo greitis U , $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$						

Nubraižytame antrame grafike randamas kreivės persilenkimas, kuriame kreivė pereina į pastoviųjų susitraukimų sritį. Rastas taškas atitinka kritinę drėgmę.

Išvada.

Kontroliniai klausimai

1. Kokie procesai vyksta džiūstant medžiagai?
2. Kaip skirstoma medžiagoje esanti drėgmė?
3. Į kokias pakopas galima suskirstyti akytųjų medžiagų džiūvimo procesą?
4. Nuo ko priklauso medžiagos džiūvimo greitis?
5. Kaip nustatomas medžiagos linijinis susitraukimas?
6. Kokie yra medžiagos kiekybiniai drėgmės rodikliai?
7. Kada džiovinama medžiaga nustoja trauktis?
8. Kuo skiriasi medžiagos laisvoji drėgmė nuo chemiškai nelaisvos?

17. EFEKTYVIOS STATYBINĖS KERAMIKOS FIZIKINIŲ IR MECHANINIŲ SAVYBIŲ TYRIMAS

17.1. Keraminių mūro gaminių tariamojo (bruto) sausojo tankio ir įmirkio nustatymas

Metodo esmė. Nustatyti skirtingų grupių (HD ir LD) keraminių mūro gaminių tariamąjį (bruto) sausąjį tankį ir įmirkį.

Naudojama įranga. Svarstyklės, liniuotė, indas mirkyti, džiovykla, termometras.

Bandymo eiga. Keraminių mūro gaminių įmirkis nustatomas, juos mirkant 20 ± 5 °C vandenyje 24 val. Matavimo ir svėrimo rezultatai surašomi į 17.1 lentelę.

17.1 lentelė. Keraminių mūro gaminių tariamojo (bruto) sausojo tankio ir įmirkio nustatymo rezultatai

Parametras	Žymuo ir matavimo vienetai	Bandiniai	
		1	2
Išdžiovinto gaminio masė	m , g		
Gaminio bruto tūris	V_b , cm ³		
Gaminio tariamasis bruto	$\rho_{vid} = m/V_b$, g/cm ³		
Drėgnoji masė	m_1 , g		
Įmirkis	$W = \frac{m_1 - m}{m} \cdot 100$, %		

Pirmiausia pasveriami sausi, išdžiovinti iki pastovios masės (m), gaminiai. Jie išmatuojami, ir apskaičiuojamas jų (bruto) tūris (V_b). Įmirkiui rasti gaminiai mirkomi vandenyje. Vanduo turi liesti visą gaminio paviršių, todėl jie turi būti dedami ant mažų atramų. Po 24 val. išimami iš indo ir drėgnu skuduru ar kempine nušluostomas nuo paviršiaus vandens perteklius. Bandiniai pasveriami, užfiksuojama jų drėgnoji masė (m_1).

Išvada.

17.2. Keraminių mūro gaminių neto tūrio ir tuštymėtumo nustatymas

Metodo esmė. Keraminių mūro gaminių neto tūris nustatomas, sveriant gaminius ore ir vandenyje. Jų tuštymėtumas nustatomas iš tūrio, apskaičiuoto išmatavus mūro gaminio matmenis (bruto tūrio) ir atėmus neto tūrį.

Naudojama įranga. Liniuotė, svarstyklės, hidrostatinės svarstyklės, indas gaminiams mirkyti.

Bandymo eiga. Įmirkytas gamins po bandymo, aprašyto 17.1 poskyryje, pasveriamas hidrostatinėmis svarstyklėmis, ir užrašoma jo masė vandenyje m_2 . Drėgnoji gaminio masė ore m_1 įrašoma iš 17.1 lentelės. Bandymo rezultatai surašomi į 17.2 lentelę. Tuštymėtumas apskaičiuojamas 1 % tikslumu.

17.2 lentelė. Keraminių mūro gaminių neto tūrio ir tuštymėtumo nustatymo rezultatai

Parametras	Žymuo ir matavimo vienetai	Bandiniai	
		1	2
Drėgnoji gaminio masė ore	m_1, g		
Vandenyje pasverto gaminio masė	m_2, g		
Gaminio bruto tūris	V_b, cm^3		
Gaminio neto tūris	$V_n = \frac{m_1 - m_2}{\rho_v^*}, \text{cm}^3$		
Gaminio tuštumų tūris	$V_t = V_b - V_n, \text{cm}^3$		
Tuštymėtumas	$T = \frac{V_t}{V_b} \cdot 100, \%$		

* ρ_v – vandens tankis, 1 g/cm^3

Išvada.

17.3. Matmenų, leidžiamųjų nuokrypų, formos ir paviršiaus defektų nustatymas

Metodo esmė. Nustatyti LD ir HD keraminių mūro gaminių nuokrypas, formos ir paviršiaus defektus. Mūro gaminio pavyzdžio matmenys ir paviršiai įvardijami 17.1 pav.

Naudojama įranga. Liniuotė, slankmatis, kampuočiai, gyلماتis.

Bandymo eiga. Keraminių mūro gaminių matmenų nuokrypos randamos, atliekant matavimo procedūrą. Briunų tiesumo ir paviršių plokštumo nustatymo būdas parodytas 17.2 pav.

Matuojant kiekvieną tiriamą gaminį, randama didžiausia ($+\Delta l$) ir mažiausia ($-\Delta l$) matuojamo gaminio matmenų nuokrypa nuo pagaminimo matmenų; jos įrašomos į lentelę. Tada apskaičiuojamas išmatuotų matmenų intervalas (Δl). Gauta vertė suapvalinama iki sveikųjų milimetrų skaičiaus. Formos ir paviršiaus defektai nustatomi pagal 17.3 lentelę.

17.1 pav. Mūro gaminių matmenys ir paviršiai: 1 – ilgis; 2 – plotis; 3 – aukštis; 4 – pagrindas; 5 – ilgainis; 6 – trumpainis

Nustačius, kokiai gaminių grupei priklauso gaminiai LD ar HD, apskaičiuojami reikalavimai gaminių matmenų nuokrypoms ir nuokrypų intervalams.

17.2 pav. Briauņų tiesumo ir paviršių plokštumo nustatymas

17.3 lentelė. Mūro gaminių matmenų, matmenų nuokrypų, formos ir paviršiaus defektų nustatymo rezultatai

Parametras	Žymuo ir matavimo vienetai	Bandiniai	
		1	2
Pagaminimo matmenys: ilgis plotis aukštis	l , mm		
	b , mm		
	a , mm		
Matmenų nuokrypos: ilgis plotis aukštis	$+\Delta l$, mm		
	$-\Delta l$, mm		
	$+\Delta b$, mm		
	$-\Delta b$, mm		
	$+\Delta a$, mm		
	$-\Delta a$, mm		
Matmenų intervalas: ilgis plotis aukštis	Δl , mm		
	Δb , mm		
	Δa , mm		
Briauņų tiesumo ir paviršių	Δ , mm		
Kampų nudaūimai: gylis kiekis	mm		
	vnt.		
Paūaidos ¹			

¹ Paūaidoms nustatyti taikomas vizualinis gaminių tyrimo metodas. Paūaidomis vadinamos dēms, nedideli duūimai, atskilos arba išsprogos dēl kalkinių intarpų. Jei paūaidos ant gaminio paviršiaus matomos 10 m atstumu dienos šviesoje, tai jų tipas užrašomas į lentelę ir pateikiamas tyrimo išvadosė.

Nustačius mūro gaminių matmenis, matmenų nuokrypas ir intervalus, matuotieji gaminiai pagal 17.4 ir 17.5 lenteles priskiriami tam tikroms matmenų nuokrypų ir intervalų klasėms. Prieš priskiriant tiriamųjų gaminių matmenų nuokrypas ir nuokrypų intervalus tam tikrai klasei, reikia apskaičiuoti 17.4 ir 17.5 lentelėse pateiktų klasių reikalavimus.

Šių klasių reikalavimai apskaičiuojami, imant pagaminimo matmenis iš 17.3 lentelės. Matmenų nuokrypų vertė ir matmenų nuokrypų intervalų vertė turi būti ne didesnė už vienos iš toliau 17.4 ir 17.5 lentelėse pateiktos klasės vertę.

17.4 lentelė. Reikalavimai, keliami mūro gaminių matmenų nuokrypoms $+\Delta l$, $-\Delta l$, $+\Delta b$, $-\Delta b$, $+\Delta a$, $-\Delta a$

Parametras	Nuokrypų klasė T1	Nuokrypų klasė T2
	LD gaminiai	
Nuokrypos: ilgis ir plotis	$\pm 0,4 \sqrt{\frac{\text{pagaminimo}}{\text{matmuo}}}$ mm arba 3 mm *	$\pm 0,25 \sqrt{\frac{\text{pagaminimo}}{\text{matmuo}}}$ m m arba 2 mm *
	$\pm 0,05 \sqrt{\frac{\text{pagaminimo}}{\text{matmuo}}}$ m m arba 1 mm *	$\pm 0,05 \sqrt{\frac{\text{pagaminimo}}{\text{matmuo}}}$ mm arba 1 mm *
	HD gaminiai	
Nuokrypos: ilgis, plotis ir aukštis	$\pm 0,4 \sqrt{\frac{\text{pagaminimo}}{\text{matmuo}}}$ mm arba 3 mm *	$\pm 0,25 \sqrt{\frac{\text{pagaminimo}}{\text{matmuo}}}$ m m arba 2 mm *

* Pasirenkama didesnė vertė

Išvada.

17.5 lentelė. Reikalavimai, keliami mūro gaminių matmenų intervalams Δl , Δb , Δa

Parametras	Intervalo klasė R1	Intervalo klasė R2
1	2	3
Intervalas:	LD gaminiai	
ilgis	$0,6 \sqrt{\frac{\text{pagaminimo}}{\text{matmuo}}} \text{ mm}$	$0,3 \sqrt{\frac{\text{pagaminimo}}{\text{matmuo}}} \text{ mm}$
plotis	$0,6 \sqrt{\frac{\text{pagaminimo}}{\text{matmuo}}} \text{ mm}$	$0,3 \sqrt{\frac{\text{pagaminimo}}{\text{matmuo}}} \text{ mm}$
aukštis	$0,6 \sqrt{\frac{\text{pagaminimo}}{\text{matmuo}}} \text{ mm}$	$0,3 \sqrt{\frac{\text{pagaminimo}}{\text{matmuo}}} \text{ mm}$
1	2	3
	HD gaminiai	
Intervalas:		
ilgis	$0,6 \sqrt{\frac{\text{pagaminimo}}{\text{matmuo}}} \text{ mm}$	$0,3 \sqrt{\frac{\text{pagaminimo}}{\text{matmuo}}} \text{ mm}$
plotis	$0,6 \sqrt{\frac{\text{pagaminimo}}{\text{matmuo}}} \text{ mm}$	$0,3 \sqrt{\frac{\text{pagaminimo}}{\text{matmuo}}} \text{ mm}$
aukštis	$0,6 \sqrt{\frac{\text{pagaminimo}}{\text{matmuo}}} \text{ mm}$	$0,3 \sqrt{\frac{\text{pagaminimo}}{\text{matmuo}}} \text{ mm}$

Išvada.....

17.4. Keraminių mūro gaminių pradinės vandens įgerties greičio nustatymas

Metodo esmė. Nustatyti HD keraminių mūro gaminių pradinės vandens įgerties greitį.

Naudojama įranga. Padėklas, atraminis įtaisas, laikmatis, džiovykla, svarstyklės.

Bandymo eiga. Išdžiovinti 105 ± 5 °C temperatūroje HD keraminiai mūro gaminiai ataušinami iki kambario temperatūros.

Tada dedami klojimo paviršiumi (žr. 17.1 pav., 4 – pagrindas) į vandenį 5 ± 1 mm. Jei mūro gaminio paviršius grublėtas, vandens lygis pakeliamas tiek, kad visas paviršius liestųsi su vandens paviršiumi. Įjungiamas laikmatis. Atliekant bandymą, palaikomas pastovus vandens lygis. Po 60 ± 2 sek. Panardinti bandiniai ištraukiami ir nušluosčius paviršinį vandenį pasveriami. Bandymo rezultatai surašomi į 17.6 lentelę.

17.6 lentelė. Keraminių mūro gaminių pradinės vandens įgerties greičio nustatymo rezultatai

Parametras	Žymuo ir matavimo vienetai	Bandiniai	
		1	2
Išdžiovinto gaminio masė	m , g		
Įmerkto į vandenį gaminio paviršiaus plotas	A , mm ²		
Įmirkyto vandenyje gaminio masė	m_d , g		
Mirkymo trukmė	t , min.		
Pradinės vandens įgerties greitis	$c = \frac{m_d - m}{A \cdot t} \cdot 10^3$, kg/(m ² ·min).		

Išvada.

17.5. Keraminių mūro gaminių gniuždymo stiprio nustatymas

Metodo esmė. Nustatyti keraminių mūro gaminių gniuždymo stiprį.

Naudojama įranga. Liniuotė, hidraulinis presas, šlifavimo įranga, įranga skiediniui paruošti.

Bandymo eiga. Nuo bandinių paviršių, kuriuos veiks apkrova, nuvalomos visos pašalinės medžiagos. Paviršių plokštumos

nuokrypis turi būti ne didesnis kaip 0,1 mm kiekvienam 100 mm. Jei gaminių bandomieji paviršiai neatitinka šių reikalavimų, jie šlifuojami arba, jei norima labai pagerinti bandomųjų paviršių sąlyčio plotą, padengiami skiediniu. Naudojamas cemento ir smėlio skiedinys, kurio gniuždymo stipris iki bandymo turi pasiekti 30 MPa stiprį. Tinka smėlis, kurio didžiausios dalelės yra 1 mm. Skiedinio sluoksnio storis per visą plotą turi būti mažiausiai 3 mm.

Prieš bandymą paruošti mūro gaminiai turi būti išdžiovinami 105 ± 5 °C temperatūroje iki pastovios masės. Prieš pat bandymą atvėsunami normalioje temperatūroje. Kaip nustatomas mūro gaminių gniuždymo stipris, parodyta 17.3 pav. (šiuo atveju plytos paviršius išlygintas skiediniu). Rezultatai įrašomi į 17.7 lentelę.

17.3 pav. Keraminių mūro gaminių gniuždymo stiprio nustatymo schema
(kai paviršius išlygintas skiediniu)

Per bandymus gautas gniuždymo stipris perskaičiuojamas į ekvivalentinį gniuždymo stiprį, kuris atitinka orasausių bandinių stiprį. Taikomas perskaičiavimo daugiklis 0,8. Orasausiai bandiniai – tai tokie bandiniai, kurių drėgnis atitinka aplinkos drėgnį.

17.7 lentelė. Keraminių mūro gaminių gniuždymo stiprio nustatymo rezultatai

Parametras	Žymuo ir matavimo vienetai	Bandiniai		
		1	2	3
Viršutinės plokštumos plotas	S_1, cm^2			
Apatinės plokštumos plotas	S_2, cm^2			
Vidutinis gniuždymo plotas	$S = (S_1 + S_2)/2, \text{cm}^2$			
Ardančioji apkrova	F, kgf			
Gniuždymo stipris	$R_{\text{gn}} = \frac{F}{S}, \text{kgf/cm}^2$			
Gniuždymo stipris	$R_{\text{gn}}, \text{MPa}$			
Vidutinis gniuždymo stipris	$R_{\text{gn vid.}}, \text{MPa}$			

Norint gauti normatyvinį gniuždymo stiprį f_b , orasausių gaminių gniuždymo stipris padauginamas iš gaminio matmenis įvertinančio formos daugiklio, pateikto 17.8 lentelėje. Lentelėje galima tiesinė interpoliacija tarp gretimų formos koeficiento reikšmių.

17.8 lentelė. Paruoštų bandinių matmenis įvertinantis formos daugiklis

Aukštis, mm	Plotis, mm				
	50	100	150	200	≥ 250
40	0,8	0,7	—	—	—
50	0,85	0,75	0,7	—	—
65	0,95	0,85	0,75	0,7	0,65
100	1,15	1	0,9	0,8	0,75
150	1,3	1,2	1,1	1	0,95
200	1,4	1,35	1,25	1,15	1,1
≥ 250	1,55	1,45	1,35	1,25	1,15

Išvada.....

17.6. Netaisyklingos formos medžiagos tankio nustatymas

Jei bandinys yra netaisyklingos formos, jo tūrį galima nustatyti tūrio matuokliu pagal išstumto skysčio kiekį arba sveriant hidrostatinėmis svarstyklėmis. Kadangi dauguma statybinių medžiagų yra poringos, ir jas sveriant vandenyje masė keičiasi, tai bandinius reikia padengti skysčiui nelaidžia plėvele arba prieš bandymą įmirkyti tiek, kad sveriant daugiau neįmirkėtų.

Metodo esmė. Nustatyti netaisyklingos formos bandinių tankį.

Naudojama įranga. Džiovinimo spinta, techninės svarstyklės, hidrostatinės svarstyklės, parafinavimo indas, kaitinimo plytelė.

Bandymo eiga. Bandiniai pasveriami ir parafinuojami. Kai parafino plėvelė nudžiūsta, bandiniai dar kartą pasveriami ore m_1 ir vandenyje m_2 . Gauti duomenys surašomi į 17.9 lentelę. Vandens tankis – 1 g/cm^3 .

17.9 lentelė. Netaisyklingos formos bandinių tankio nustatymo rezultatai

Parametras	Žymuo ir matavimo vienetai	Bandiniai		
		1	2	3
Bandinio masė	m , g			
Parafinuoto bandinio masė	m_1 , g			
Parafino masė	m_2 , g			
Parafino tankis	ρ_p , g/cm ³	0,93	0,93	0,93
Parafino tūris	$V_p = \frac{m_2}{\rho_p}$, cm ³			
Parafinuoto bandinio masė vandenyje	m_3 , g			
Parafinuoto bandinio tūris	$V_{pb} = \frac{m_1 - m_3}{\rho_V}$, cm ³			
Bandinio tūris	$V_b = V_{pb} - V_p$, cm ³			
Bandinio tankis	ρ_b , g/cm ³			

Išvada.

17.7. Keraminių gaminių savitojo tankio nustatymas

Metodo esmė. Nustatyti keraminių gaminių savitąjį bandinių tankį.

Naudojama įranga. Džiovinimo spinta, porcelianinė grūstuvė, sietas, techninės svarstyklės, piknometrai, kaitinimo plytelė.

Bandymo eiga. Kad būtų galima nustatyti medžiagos kietosios dalies tūrį, bandinys iki nustatyto tai medžiagai smulkumo sutrinamas. Tūris nustatomas piknometrinio metodu: atsveriamas 10 g medžiagos miltelių, jie supilami į piknometrą ir užpilami distiliuotu vandeniu (ne daugiau kaip pusė piknometro tūrio). Piknometre esantis vanduo su milteliais virinamas 15–20 min. Į ataušintą iki kambario temperatūros piknometrą pripilama distiliuoto vandens iki brūkšnio, ir jis vėl pasveriamas m_1 . Piknometras išplaunamas, vėl pripildomas distiliuoto vandens iki brūkšnio ir pasveriamas m_2 . Gauti duomenys įrašomi į 17.10 lentelę.

17.10 lentelė. Bandinių savitojo tankio nustatymo rezultatai

Parametras	Žymuo ir matavimo vienetai	Bandiniai		
		1	2	3
Bandinio masė	m , g	10	10	10
Piknometro su milteliais ir vandeniu masė	m_1 , g			
Piknometro tik su vandeniu masė	m_2 , g			
Miltelių tūris	$V = \frac{m + m_2 - m_1}{\rho_V}$, cm ³			
Savitasis tankis	$\rho = \frac{M}{V}$, g/cm ³			

Išvada.

17.8. Keraminių gaminių poringumo apskaičiavimas

Metodo esmė. Apskaičiuoti keraminio bandinio poringumą.

Bandymo eiga. Medžiagos poringumas apskaičiuojamas, žinant keraminio bandinio tankį ρ_t ir savitąjį tankį ρ , pagal formulę:

$$P = \left(1 - \frac{\rho_t}{\rho} \right) \cdot 100, \%, \quad (17.1)$$

Išvada.

17.9. Keraminių gaminių šilumos laidumo koeficiento apskaičiavimas

Metodo esmė. Nustatyti tiriamųjų medžiagų šilumos laidumo koeficientus λ pagal keraminių bandinių tankio rezultatus.

Darbo eiga. Žinant keraminių gaminių tankį, jų šilumos laidumo koeficientą λ galima apskaičiuoti pagal empirinę lygtį, kuri buvo sudaryta, atlikus ilgalaikius eksperimentinius tyrimus.

$$\lambda = 1,163(\sqrt{0,0196 + 0,00000022 \cdot \rho_t^2} - 0,14), \text{ W/(m}\cdot\text{K)}. \quad (17.2)$$

Čia ρ_t – keraminio gaminio tankis, kg/m^3

Šilumos laidumas pagal tankį gali būti apskaičiuojamas ir remiantis standartu LST EN 1745. Šie skaičiavimai bus parodyti vėliau.

Išvada......

17.10. Keraminių apdailos plytelių įmirkio nustatymas

Metodo esmė. Nustatyti keraminių apdailos plytelių įmirkį.

Naudojama įranga ir priemonės. Džiovinimo krosnelė, svarstyklės, vonelė.

Bandymo eiga. Bandymui atlikti imamos 2 plytelės. Jos išdžiovinamos džiovinimo krosnelėje, esant 110 ± 5 °C temperatūrai, iki pastovios masės. Paskui atvėsinaamos, pasveriamos, įstatomos į rėmelius, įdedamos į vonelę ir užpilamos vandeniu. Vandenyje plytelės virinamos 2 val. Virš plytelės virinimo metu turi būti ne mažesnis kaip 5 cm vandens sluoksnis. Paskui plytelės atvėsinaamos, nušluostomos drėgnu audeklu ir pasveriamos. Gauti tyrimų rezultatai surašomi į 17.11 lentelę. Vidutinis keraminių apdailos plytelių įmirkis turi būti ~10 %.

17.11 lentelė. Keraminių apdailos plytelių įmirkio nustatymo rezultatai

Rodiklis	Rodiklio žymuo ir matavimo vienetai	Bandiniai	
		1	2
Sausos plytelės masė	m , g		
Įmirkusios plytelės masė	m_1 , g		
Įmirkis	$E = \frac{m_1 - m}{m} \cdot 100$, %		
Vidurkis			

Išvada.

17.11. Keraminių apdailos plytelių lenkimo stiprio nustatymas

Metodo esmė. Nustatyti keraminių apdailos plytelių lenkimo stiprį.

Naudojama įranga ir priemonės. Liniuotė, hidraulinis presas.

Bandymo eiga. Bandymui paimama išdžiovinta plytelė, padedama ant dviejų atramų ir centre per visą plotį apkraunama. Atstumas tarp atramų turi sudaryti 80–90 % plytelės ilgio. Ant atramų dedami tarpikliai, kurių storis $2,5 \pm 0,5$ mm, plotis 20 ± 5 mm, o ilgis lygus plytelės ilgiui. Apkrovimas didinamas tolygiai, kol plytelė lūžta. Principinė keraminių apdailos plytelių lenkimo schema pateikta 17.4 paveiksle. Gauti tyrimų rezultatai įrašomi į 17.12 lentelę.

17.12 lentelė. Keraminių apdailos plytelių lenkimo stiprio nustatymo rezultatai

Rodiklis	Rodiklio žymuo ir matavimo vienetai	Bandiniai	
		1	2
Atstumas tarp atramų	$l, \text{ cm}$		
Plytelės storis	$h, \text{ cm}$		
Plytelės plotis	$b, \text{ cm}$		
Ardančioji apkrova	$P, \text{ kgf}$		
Lenkimo stipris	$R_l = \frac{3Pl}{2bh^2}, \text{ kgf/cm}^2$		
Lenkimo stipris	$R_l, \text{ MPa}$		
Vidutinis lenkimo stipris	$R_{l \text{ vid.}}, \text{ MPa}$

17.4 pav. Keraminių apdailos plytelių lenkimo stiprio nustatymas

17.12. Keraminių apdailos plytelių kietumo pagal Moso skalę nustatymas

Metodo esmė. Nustatyti keraminių apdailos plytelių kietumą pagal Moso skalę. Plytelės dailiojo paviršiaus kietumas yra vienetu mažesnis nei kietumas pirmojo etaloninio mineralo, paviršiuje palikusio įbrėžimą.

Bandymo eiga. Plytelės standžiai įtvirtinamos ir iš eilės visais mineralais brėžiamas glazūros paviršius. Paviršiaus kietumas atitiks Moso skalės kietumą, kai brėžiant mineralas pažeis plytelės apdailos paviršių. Gauti tyrimų rezultatai įrašomi į 17.13 lentelę.

17.13 lentelė. Keraminių apdailos plytelių kietumo pagal Moso skalę nustatymo rezultatai

Mineralas	Kietumo balas	Plytelės kietumas	
		1	2
Talkas	1		
Gipsas	2		
Kalcitas	3		
Fluoritas	4		
Apatitas	5		
Ortoklazas	6		
Kvarcas	7		
Topazas	8		
Korundas	9		
Deimantas	10		

Išvada.

Kontroliniai klausimai

1. Kaip nustatomas keraminių mūro gaminių bruto ir neto tūris?
2. Kaip nustatomas keraminių mūro gaminių vandens įgerties greitis ir įmirkis?
3. Kaip nustatomas savitasis keramikos tankis?
4. Ką parodo keraminių gaminių poringumas?
5. Kaip vertinamas keraminių plytelių kietumas?

18. KERAMZITO TYRIMAS

18.1. Keramzito granulimetrinės sudėties nustatymas

Granulimetrinė sudėtis – tai dalelių pagal stambumą pasiskirstymas, išreikštas išbirų per nustatytą sietų skaičių masės procentais. Keramzito stambumas nustatomas, naudojant sietus su skirtingų matmenų akelėmis.

Metodo esmė. Keramzito granulimetrinė sudėtis nustatoma pagal liekanas ant sietų, susidariusias sijojant sausą keramzitą per sietų rinkinį.

Naudojama įranga. Džiovykla, svarstyklės, sietai (18.1 lentelė).

Bandymo eiga. Bandinio masė parenkama pagal didžiausią keramzito dalelių stambumą. Kai bandinio didžiausias dalelių stambumas yra 32 ar 16 mm, tai bandinio masė – 1 kg; jei didžiausias dalelių stambumas yra 8 ar 4 mm, bandinio masė – 0,5 kg.

Keramzito bandinys išdžiovinamas 110 ± 5 °C temperatūroje iki pastovios masės. Iš išdžiovintos imties atsveriami keramzito. Atsvertas keramzitas rankomis arba mechaniniu sijotuvu išsijojamas per sietų kolonėlę. Sietų akučių skersmenys pateikti 18.1 lentelėje. Sietai su stambesnėmis akutėmis dedami viršuje, o su smulkesnėmis – apačioje. Sijoti baigiama, kai per 1 min. per kiekvieną sietą persijojama ne daugiau kaip 0,1 % bandinio masės. Gauti tyrimo rezultatai įrašomi į 18.1 lentelę. Apskaičiuojama dalinė liekana – ant sieto liekančių grūdelių masės ir keramzito bandinio masės santykis – ir suminė liekana – dalinių liekanų ant skaičiuojamojo sieto ir viršutinių (stambesniųjų) sietų suma.

Nustatant keramzito stambumą, leidžiama, kad liekana ant viršutinio sieto būtų iki 10 % pagal masę. Persijojus užrašomas sietas, pro kurį išbyra visa medžiaga. Smulkiausių dalelių kiekis neturi būti didesnis kaip 15 % pagal masę.

18.1 lentelė. Keramzito granulimetrinės sudėties nustatymo rezultatai

Sieto akelių dydis, mm	Keramzito liekana ant sieto m_i , g	Dalinė liekana a_i , %	Suminė liekana A_i , %	Išbira B_i , %
63				
32				
16				
8				
4				
2				
1				
0,5				
0,25				
Bandinio masė m , g				
Masė P ant dugno, g				
$\sum m_i + P$, g				

Išvada.

**18.2. Keramzito piltinio tankio nustatymas, sveriant
sausą keramzitą žinomo tūrio inde**

Metodo esmė. Nustatyti keramzito piltinį tankį, sveriant sausą keramzitą žinomo tūrio inde.

Naudojama įranga. Svarstyklės, laboratorinis samtelis, žinomo tūrio matavimo indas, liniuotė. Minimalus standartinio indo tūris nustatomas pagal didžiausiąjį keramzito dalelių skersmenį. Kai keramzito dalelių dydis iki 4 mm, tai standartinio indo tūris 1 dm³; kai keramzito dalelių dydis 8 mm – standartinio indo tūris 2 dm³; kai

keramzito dalelių dydis 16 mm ir didesnis – standartinio indo tūris 10 dm^3 .

Bandymo eiga. Sausas, švarus matavimo indas pasveriamas ir pastatomas ant horizontalaus paviršiaus. Keramzitas laboratoriniu samteliu pilamas į matavimo indą iš ne didesnio kaip 5 cm aukščio nuo matavimo indo viršaus, kol pradeda byrėti per matavimo indo kraštus. Keramzito perteklius nubraukiamas lygiai su matavimo indo kraštais, nesutankinant viršutinio sluoksnio. Matavimo indas su keramzitu pasveriamas 0,2 % tikslumu. Bandomi trys bandiniai, o gauti rezultatai įrašomi į 18.2 lentelę.

18.2 lentelė. Keramzito piltinio tankio tyrimo rezultatai

Rodiklis	Žymuo ir matavimo vienetai	Bandiniai		
		1	2	3
Tuščio indo masė	m , g			
Indo su keramzitu masė	m_1 , g			
Indo tūris	V , cm^3			
Keramzito piltinis tankis	$\rho_{k,pl} = \frac{m_1 - m}{V}$, g/cm^3			
Piltinio tankio vidurkis	$\rho_{k,pl \text{ vid.}}$, g/cm^3			

18.3. Keramzito dalelių tankio nustatymas

Metodo esmė. Keramzito dalelių tankis apskaičiuojamas pagal dalelių masę ir tūrį, nustatytą pagal išstumto vandens kiekį.

Naudojama įranga. Svarstyklės, indas keramzitu mirkyti, džiovykla, sietelis, kurio akučių dydis mažesnis už keramzito daleles.

Bandymo eiga. Paimama bandinių imtis, jie išdžiovinami džiovinimo spintoje $110 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ temperatūroje ir pasveriami. Į indą panardinamas sietelis, ir indas pripilamas vandens iki pasirinktos žymės. Paskui bandiniai pamerkami į indą su vandeniu ir naudojant

bandymo sietelį panardinami po vandeniu, kad virš užpildo paviršiaus būtų ne plonesnis kaip 2 cm storio vandens sluoksnis. Nustatomas išstumto vandens kiekis. Gauti rezultatai įrašomi į 18.3 lentelę.

18.3 lentelė. Keramzito dalelių tankio nustatymo rezultatai

Rodiklis	Žymuo ir matavimo vienetai	Bandiniai	
		1	2
Sauso keramzito masė	m , g		
Išstumto vandens tūris	V , cm ³		
Keramzito dalelių tankis	$\rho_{k.t} = \frac{m}{V}$, g/cm ³		
Vidurkis	$\rho_{k.t \text{ vid.}}$, g/cm ³		

Išvada.

18.4. Keramzito tuštytumo nustatymas

Keramzito tuštytumas – tai jo tuštumų, esančių tarp grūdelių, tūrio ir viso tūrio santykis. Keramzito tuštytumas paprastai lygus 30–60 %. Jis priklauso nuo keramzito granulometrinės sudėties, dalelių formos ir jų dydžio.

Nustačius ir apskaičiavus keramzito dalelių ir piltinį tankį, galima apskaičiuoti keramzito tuštytumą pagal formulę:

$$T = \frac{\rho_{k.t} - \rho_{k.pl}}{\rho_{k.t}} \cdot 100, \%. \quad (18.1)$$

Čia $\rho_{k.pl}$ – keramzito piltinis tankis, g/cm³; $\rho_{k.t}$ – keramzito dalelių tankis, g/cm³.

Išvada.

18.5. Keramzito drėgnio nustatymas

Keramzito drėgnis – tai jame esančio vandens masės ir sauso užpildo masės santykis.

Metodo esmė. Keramzito drėgnis nustatomas pagal drėgno užpildo masės sumažėjimą jį išdžiovinus.

Naudojama įranga. Svarstyklės, džiovykla, indas.

Bandymo eiga. Keramzito imtis (300 g) supilama į metalinį indą ir pasveriamas. Paskui keramzitas išdžiovinamas džiovintame spintoje 110 ± 5 °C temperatūroje iki pastovios masės. Išdžiovintas bandinys su indu vėl pasveriamas. Gauti bandymo rezultatai įrašomi į 18.4 lentelę.

18.4 lentelė. Keramzito drėgnio nustatymo rezultatai

Rodiklis	Žymuo ir matavimo vienetai	Bandiniai	
		1	2
Keramzito imties masė	m , g		
Išdžiovinto keramzito masė	m_1 , g		
Keramzito drėgnis	$W_k = \frac{m - m_1}{m_1} \cdot 100$, %		
Drėgnio vidurkis	$W_{k \text{ vid.}}$, %		

Išvada.

18.6. Keramzito vandens įmirkio nustatymas

Metodo esmė. Keramzito įmirkis nustatomas, įmirkant vandenyje tam tikrą sauso keramzito imtį ir apskaičiuojant įgerto vandens kiekį.

Naudojama įranga. Svarstyklės, džiovykla, indas su sieteliu.

Bandymo eiga. Po bandymo keramzito imtis iš 18.5 dalies pamerkiama į vandenį. Bandiniai panardinami į vandenį sieteliu.

Vandens sluoksnis virš bandinio turi būti ne plonesnis kaip 2 cm. Bandinys laikomas vandenyje 48 val. Paskui išimamas, nuvarvinamas vandens perteklius ir pasveriamas. Gauti bandymo rezultatai įrašomi į 18.5 lentelę.

18.5 lentelė. Keramzito vandens įmirkio nustatymo rezultatai

Rodiklis	Žymuo ir matavimo vienetai	Bandiniai	
		1	2
Sauso keramzito imties masė	m , g		
Įmirkyto keramzito imties masė	m_1 , g		
Keramzito vandens įmirkis	$W_i = \frac{m_1 - m}{m} \cdot 100$, %		
Įmirkio vidurkis	$W_{i \text{ vid}}$, %		

Išvada.

18.7. Keramzito atsparumo trupinimui nustatymas

Metodo esmė. Paruoštas keramzito bandinys supilamas į specialų plieninį cilindą, kurio vidinis skersmuo 113 mm, aukštis 100 mm, ir vibruojant sutankinamas. Ant cilindro uždedama viršutinė kreipiančioji dalis, į ją įstatomas puansonas, ir spaudžiamas iki nustatyto gylio (18.1 pav.). Išmatuojama įspausti panaudota jėga, kuri laikoma atsparumu trupinimui.

Naudojama įranga. Plieninis bandymo cilindras ir puansonas, hidraulinis presas, vibracinis staliukas, plieninė liniuotė, samtelis, džiovykla.

Bandymo eiga. Paruošiami bandiniai, atmetant išbiras per apatinį sieta bei liekaną ant viršutinio sieto ir išdžiovinami džiovinimo spintoje 110 ± 5 °C temperatūroje. Cilindras pastatomas ant vibracinio stalo ir atsargiai užpildomas, kad susidarytų perteklius,

pilant keramzitą samteliu į cilindrą, stengiantis, kad dalelės neišsisluoksniuotų. Cilindras vibruojamas 3–60 sek., papildant keramzitu. Paskui liniuote išlyginamas paviršius. Ant cilindro uždedama viršutinė kreipiančioji dalis, ant sutankinto keramzito atsargiai įstatomas puansonas. Nustatomas 2 cm atstumas tarp slankiojo žiedo ir cilindro. Paruoštas įrenginys dedamas į hidraulinę presą. Jėga, veikianti puansoną, didinama, iki pasiekiamas 2 cm deformacija, ir tuo metu ji užfiksuojama. Gauti rezultatai įrašomi į 18.6 lentelę.

18.1 pav. Keramzito atsparumo trupinimui nustatymo įranga: 1 – slankusis žiedas; 2 – puansonas; 3 – viršutinis cilindras; 4 – apatinis cilindras

18.6 lentelė. Keramzito atsparumo trupinimui nustatymo rezultatai

Rodiklis	Žymuo ir matavimo vienetai	Bandiniai		
		1	2	3
Puansono svoris	L , kg			
Gniuždymo jėga	F , kgf			
Puansono skerspjuvio plotas	A , cm ²			
Keramzito dalelių atsparumas trupinimui	$C_a = \frac{L + F}{A}$, kg/cm ²			
Keramzito dalelių atsparumas trupinimui	C_a , MPa			

Išvada......

18.8. Keramzito dalelių formos nustatymas

Metodo esmė. Keramzito dalelių formos koeficientas apskaičiuojamas pagal mažiausią ir didžiausią išmatuotos dalelės matmenį.

Naudojama įranga. Slankmatis, džiovykla.

Bandymo eiga. Paimama bandinių imtis, atsitiktinai atrenkami keli bandiniai ir išdžiovinami džiovinimo spintoje 110 ± 5 °C temperatūroje. Slankmačiu išmatuojami didžiausi ir mažiausi bandinių matmenys, nustatomas keramzito dalelės formos koeficientas ir bendras bandomųjų keramzito dalelių formos koeficientas. Gauti rezultatai įrašomi į 18.7 lentelę. Keramzito dalelių formos koeficientas turi būti $\leq 1,5$.

18.7 lentelė. Keramzito dalelių formos nustatymo rezultatai

Rodiklis	Žymuo ir matavimo vienetai	Bandiniai		
		1	2	3
Didžiausias keramzito dalelės matmuo	D , mm			
Mažiausias keramzito dalelės matmuo	d , mm			
Keramzito dalelės formos koeficientas	$K_f = \frac{D}{d}$			
Išmatuotų dalelių skaičius	n , vnt.			
Keramzito dalelių formos koeficientas	$K_{df} = \frac{\sum K_f}{n}$			
Dalelių skaičius, kurių $K_f > 2,5$	m , vnt.			
Pailgos formos dalelių skaičius	$Pa = \frac{n - m}{n}, \%$			

Išvada.

Kontroliniai klausimai

1. Kaip nustatomas keramzito piltinis tankis?
2. Kuo skiriasi keramzito piltinis tankis nuo dalelių tankio?
3. Kokia yra tuštymėtumo formulė?
4. Kuo skiriasi keramzito drėgnio ir vandens įmirkio nustatymas?
5. Kaip įvertinamas keramzito atsparumas trupinimui?
6. Koks turėtų būti keramzito dalelių formos koeficientas?

19. EFEKTYVIOS KERAMIKOS GAMINIŲ IR ATITVARŲ ŠILUMINĖS VARŽOS SKAIČIAVIMAS

Atitvara – pastato elementas, skiriantis patalpas nuo išorės arba kitų patalpų, kai oro temperatūrų skirtumas abiejose atitvaros pusėse didesnis negu 4 K.

Atitvaros šilumos perdavimo koeficientas (U) – per atitvarą pereinančio šilumos srauto tankis, kai oro temperatūrų skirtumas abiejose atitvaros pusėse 1 K, $W/(m^2 \cdot K)$.

Šilumos laidumo koeficientas (λ) – šilumos srauto tankis W/m^2 , pereinantis per 1 m storio medžiagos sluoksnį, kai temperatūrų skirtumas tarp jo paviršių yra lygus 1K; $W/(m \cdot K)$.

Deklaruojamas šilumos laidumo koeficientas (λ_{dec}) – statybinės medžiagos šilumos laidumo koeficiento tikėtina vertė; $W/(m \cdot K)$.

Projektinis šilumos laidumo koeficientas (λ_{ds}) – statybinės medžiagos šilumos laidumo koeficiento vertė normaliomis eksploataavimo sąlygomis, atsižvelgiant į medžiagos vidutinį drėgnį ir temperatūrą; $W/(m \cdot K)$.

Šiluminė varža (R) – temperatūrų skirtumas tarp medžiagos sluoksnio paviršių, kuriam esant susidaro vienetinis šilumos srauto tankis W/m^2 ; $m^2 \cdot K/W$.

Statybinė termoizoliacinė medžiaga – bet kokios formos ir matmenų statybinio termoizoliacinio gaminio dalis be dangų ir apdailų.

Pagrindiniai simboliai, dydžiai ir vienetai nurodyti 19.1 lentelėje.

19.1 lentelė. Pagrindiniai simboliai, dydžiai ir vienetai

Simbolis	Dydis	Vienetai
λ_{dec}	deklaruojamas šilumos laidumo koeficientas	W/(m·K)
λ_{ds}	projektinis šilumos laidumo koeficientas	W/(m·K)
R	šiluminė varža	m ² ·K/W
R_g	oro tarpo šiluminė varža	m ² ·K/W
R_{si}	vidaus paviršiaus šiluminė varža	m ² ·K/W
R_{se}	išorės paviršiaus šiluminė varža	m ² ·K/W
R_l	visuminė šiluminė varža	m ² ·K/W
R_s	suminė šiluminė varža	m ² ·K/W
R^I	didžiausia suminės šiluminės varžos vertė	m ² ·K/W
R^{II}	mažiausia suminės šiluminės varžos vertė	m ² ·K/W
R_q	plono sluoksnio (kartono, plėvelės ir pan.) šiluminė varža	m ² ·K/W
U	šilumos perdavimo koeficientas	W/(m ² ·K)
ΔU_{fn}	šilumos perdavimo koeficiento pataisa dėl jungčių įtakos	W/(m ² ·K)
ε	šiluminio spinduliavimo geba	–
A	Plotas	m ²
d	atitvaros sluoksnio storis	m
e	didžiausia santykinė paklaida	%
w	sienos storis	m
Y_{si}	atitvaros vidinio paviršiaus šilumos imlumas	W/(m ² ·K)
S	medžiagos šilumos imlumo koeficientas, esant 24 h periodui	W/(m ² ·K)
D	atitvaros šiluminė inercija	–
θ	Temperatūra	°C

Pastaba: *dec* – deklaruojamasis; *ds* – projektinis; *s* – suminis; *t* – visuminis; *se* – išorės paviršius; *si* – vidaus paviršius; *fn* – metalinių jungčių; *w* – siena; *v* – vėdinimas; *wd* – langas

19.1. Sienos šiluminės varžos ir šilumos perdavimo koeficiento skaičiavimas

Užduotis: apskaičiuoti duotos sienos konstrukcijos visuminę šiluminę varžą ir šilumos perdavimo koeficientą (19.1 pav.).

19.1 pav. Sienos konstrukcijos schema

Apskaičiuojamos atskirų sluoksnių šiluminės varžos ir visuminė šiluminė varža:

1 sluoksnis: (išorinis) 120 mm storio pilnavidurių keraminių plytų mūras, kurio $\lambda_{ds} = 1,0 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$:

$$R_1 = d_1 / \lambda_{1,ds} = 0,12 / 1,0 = 0,12 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W.} \quad (19.1)$$

Čia: d_1 – išorinio (1) medžiagos sluoksnio storis konstrukcijoje, m; $\lambda_{1,ds}$ – deklaruojamasis šilumos laidumo koeficientas, W/(m·K).

2 sluoksnis: 40 mm storio vėdinamas oro tarpas.

3 sluoksnis: 30 mm storio vėjo izoliacija iš mineralinės vatos, kurios $\lambda_{dec} = 0,034$ W/(m·K). Šilumos laidumo koeficiento pataisa dėl papildomo medžiagos įdrėkimo konstrukcijoje $\Delta\lambda_\omega$, W/(m·K) pagal STR 2.01.03:2003 „Statybinių medžiagų ir gaminių šiluminių techninių dydžių deklaruojamos ir projektinės vertės“ 1.1 lentelę (kuri pateikta priede) vėdinamai atitvarai $\Delta\lambda_\omega = 0,001$ W/(m·K).

Šilumos konvekcijos poveikio koeficientas $K_{cv} = 0$ (pagal STR 2.01.03:2003 1.2 lentelę (kuri pateikta priede), kai termoizoliacinis sluoksnis vėdinamas, termoizoliacinio sluoksnio medžiagos grupė pagal oro pralaidumą $l < 60$, m³/(m·s·Pa), termoizoliaciniai gaminiai mechaniškai pritvirtinti prie izoliuojamo paviršiaus).

Pataisa dėl šilumos konvekcijos:

$$\Delta\lambda_{cv} = \lambda_{dec} \cdot K_{cv} = 0,034 \cdot 0 = 0 \text{ W/(m·K)} \quad (19.2)$$

Čia: λ_{dec} – deklaruojamasis šilumos laidumo koeficientas, W/(m·K); K_{cv} – šilumos konvekcijos poveikio koeficientas, W/(m·K).

Projektinė šilumos laidumo koeficiento vertė:

$$\lambda_{ds} = \lambda_{dec} + \Delta\lambda_\omega + \Delta\lambda_{cv} = 0,034 + 0,001 + 0 = 0,035 \text{ W/(m·K)} \quad (19.3)$$

Čia: λ_{dec} – deklaruojamasis šilumos laidumo koeficientas, W/(m·K); $\Delta\lambda_\omega$ – šilumos laidumo koeficiento pataisa dėl papildomo medžiagos įdrėkimo konstrukcijoje, W/(m·K); $\Delta\lambda_{cv}$ – pataisa dėl šilumos konvekcijos, W/(m·K).

Trečiojo sluoksnio šiluminė varža:

$$R_3 = d_3 / \lambda_{3,ds} = 0,03 / 0,035 = 0,857 \text{ m}^2 \cdot \text{K} / \text{W} \quad (19.4)$$

Čia: d_3 – medžiagos 3 sluoksnio storis konstrukcijoje, m; $\lambda_{3,ds}$ – deklaruojamasis šilumos laidumo koeficientas, W/(m·K).

4 sluoksnis: 100 mm storio šilumos izoliacija iš mineralinės vatos, kurios $\lambda_{dec} = 0,036 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$. Šilumos laidumo koeficiento pataisa dėl papildomo medžiagos įdrėkimo konstrukcijoje $\Delta \lambda_{\omega}$, W/(m·K) pagal STR 2.01.03:2003 1.1 lentelę vėdinamai atitvarai $\Delta \lambda_{\omega} = 0,001 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$. Šilumos konvekcijos poveikio koeficientas $K_{cv} = 0$ (pagal STR 2.01.03:2003 1.2 lentelę, kai termoizoliacinis sluoksnis vėdinamas, termoizoliacinio sluoksnio medžiagos grupė pagal oro pralaidumą $60 < l < 190, \text{m}^3/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$, termoizoliaciniai gaminiai užpildo visą erdvę ir yra su vėjo izoliaciniu sluoksniu, įrengtu pagal to paties reglamento 1.3 lentelėje pateiktus reikalavimus). Lentelės 1.1, 1.2 ir 1.3 pateiktos knygos priede.

Pataisa dėl šilumos konvekcijos:

$$\Delta \lambda_{cv} = \lambda_{dec} \cdot K_{cv} = 0,036 \cdot 0 = 0 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K}) \quad (19.5)$$

Čia: λ_{dec} – deklaruojamasis šilumos laidumo koeficientas, W/(m·K); K_{cv} – šilumos konvekcijos poveikio koeficientas, W/(m·K).

Projektinė šilumos laidumo koeficiento vertė:

$$\lambda_{ds} = \lambda_{dec} + \Delta \lambda_{\omega} + \Delta \lambda_{cv} = 0,036 + 0,001 + 0 = 0,037 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K}) \quad (19.6)$$

Čia: λ_{dec} – deklaruojamasis šilumos laidumo koeficientas, W/(m·K); $\Delta \lambda_{\omega}$ – šilumos laidumo koeficiento pataisa dėl papildomo medžiagos įdrėkimo konstrukcijoje, W/(m·K); $\Delta \lambda_{cv}$ – pataisa dėl šilumos konvekcijos, W/(m·K).

Ketvirtojo sluoksnio šiluminė varža:

$$R_4 = d_4 / \lambda_{4,ds} = 0,10 / 0,037 = 2,703 \text{ m}^2 \cdot \text{K} / \text{W} \quad (19.7)$$

Čia: d_4 – medžiagos 4 sluoksnio storis konstrukcijoje, m; $\lambda_{4,ds}$ – deklaruojamasis šilumos laidumo koeficientas, W/(m·K).

5 sluoksnis: 250 mm storio tuščiavidurių keraminių blokų mūras, kurio projektinė šilumos laidumo koeficiento vertė $\lambda_{ds} = 0,23 \text{ W/(m·K)}$. Jo šiluminė varža apskaičiuojama:

$$R_5 = d_5 / \lambda_{5,ds} = 0,25 / 0,23 = 1,087 \text{ m}^2 \cdot \text{K} / \text{W} \quad (19.8)$$

Čia: d_5 – medžiagos 5 sluoksnio storis konstrukcijoje, m; $\lambda_{5,ds}$ – deklaruojamasis šilumos laidumo koeficientas, W/(m·K).

6 sluoksnis: 20 mm storio kalkių ir smėlio tinkas, kurio projektinė šilumos laidumo koeficiento vertė $\lambda_{ds} = 0,80 \text{ W/(m·K)}$. Jo šiluminė varža apskaičiuojama:

$$R_6 = d_6 / \lambda_{6,ds} = 0,02 / 0,80 = 0,025 \text{ m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}. \quad (19.9)$$

Čia: d_6 – medžiagos 6 sluoksnio storis konstrukcijoje, m; $\lambda_{6,ds}$ – deklaruojamasis šilumos laidumo koeficientas, W/(m·K).

Kadangi siena yra su vėdinamu oro tarpu, tai oro tarpo ir sluoksnių, esančių į išorinę pusę nuo oro tarpo (išorinio plytų mūro sluoksnio), šiluminės varžos yra nevertinamos. Apskaičiuojame sienos suminę šiluminę varžą:

$$R_s = R_3 + R_4 + R_5 + R_6 = 0,857 + 2,703 + 1,087 + 0,025 = 4,672 \text{ m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}. \quad (19.10)$$

Čia: $R_3 + R_4 + R_5 + R_6$ – konstrukcijos 3, 4, 5, 6 sluoksnio šiluminė varža, m²·K/W.

Sienos vidinio paviršiaus šiluminė varža, kai šilumos srauto kryptis horizontali (1.4 lentelė – pateikta priede) – $R_{si} = 0,13 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$.

Kadangi siena yra su vėdinamu oro tarpu, išorinė šiluminė varža yra prilyginama vidinio paviršiaus šiluminei varžai – $R_{se} = R_{si} = 0,13 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}$.

Sienos visuminė šiluminė varža:

$$R_t = R_{si} + R_s + R_{se} = 0,13 + 4,672 + 0,13 = 4,932 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}. \quad (19.11)$$

Čia: R_{si} – vidinio paviršiaus šiluminė varža, $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$; R_{se} – išorinio paviršiaus šiluminė varža, $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$; R_t – sienos visuminė šiluminė varža, $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$.

19.2. Šilumos perdavimo koeficiento pataisa ΔU_{fn} dėl papildomo šilumos nutekėjimo per metalines jungtis

Jei termoizoliacinį sluoksnį kerta metalinės jungtys, jungiančios atitvaros vidaus ir išorės sluoksnius, atitvaros šilumos perdavimo koeficientas apskaičiuojamas pagal formulę:

$$U = \frac{1}{R_t} + \Delta U_{fn}, \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \quad (19.12)$$

Pataisa ΔU_{fn} , $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, apskaičiuojama:

$$\Delta U_{fn} = \frac{\alpha \cdot \lambda_{fn} \cdot n_{fn} \cdot A_{fn}}{d_{fn}}, \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \quad (19.13)$$

Čia: α – struktūrinis daugiklis (1.5 lentelė – pateikta priede); λ_{fn} – metalinės jungties šilumos laidumo koeficientas, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; n_{fn} – jungčių skaičius viename m^2 ; A_{fn} – vienos jungties skerspjūvio plotas, m^2 ; d_{fn} – skaičiuojamasis jungties ilgis, prilygintas termoizoliacinio sluoksnio storiui, m.

Sienos šilumos perdavimo koeficientas:

$$U = \frac{1}{R_t} = \frac{1}{4,932} = 0,203 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}. \quad (19.14)$$

Čia: R_t – sienos visuminė šiluminė varža, $\text{m}^2\cdot\text{K/W}$.

Sienos visuminė šiluminė varža $R_t = 4,93 \text{ m}^2\cdot\text{K/W}$, šilumos perdavimo koeficientas $U = 0,20 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$.

Skaičiuojame šilumos perdavimo koeficiento priedą pagal formulę:

$$\Delta U_{fn} = \frac{\alpha \cdot \lambda_{fn} \cdot n_{fn} \cdot A_{fn}}{d_{fn}}, \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)} \quad (19.15)$$

Čia: laikome, kad jungčių skaičius viename kvadratiniam metre $n_{fn} = 10$; jungties šilumos laidumo koeficientas $\lambda_{fn} = 50,0 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ (plienas); vienos jungties skerspjūvio plotas $A_{fn} = 1,96 \times 10^{-5} \text{ m}^2$ ($\varnothing = 5 \text{ mm}$); skaičiuojamasis jungties ilgis, prilygintas šiltinančio sluoksnio storiui $d_{fn} = 0,13 \text{ m}$; struktūrinis daugiklis priimamas $\alpha = 0,5$ (pagal 1.5 lentelę, pateiktą priede).

$$\Delta U_{fn} = \frac{\alpha \cdot \lambda_{fn} \cdot n_{fn} \cdot A_{fn}}{d_{fn}} = (0,5 \times 50 \times 10 \times 1,96 \times 10^{-5}) / 0,13 = 0,038 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}. \quad (19.16)$$

Šilumos perdavimo koeficientas apskaičiuojamas pagal (19.17) formulę:

$$U = \frac{1}{R_t} + \Delta U_{fn} = \frac{1}{4,932} + 0,038 = 0,24 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}. \quad (19.17)$$

Atitinkamai, jeigu tvirtinimui panaudota 4 mm plieno viela, kurios skerspjūvio plotas $A_{fn} = 1,2 \times 10^{-5} \text{ m}^2$:

$$\Delta U_{fn} = \frac{\alpha \cdot \lambda_{fn} \cdot n_{fn} \cdot A_{fn}}{d_{fn}} = (0,5 \times 50 \times 10 \times 1,2 \times 10^{-5}) / 0,13 = 0,024 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \quad (19.18)$$

Šilumos perdavimo koeficientas apskaičiuojamas:

$$U = \frac{1}{R_t} + \Delta U_{fn} = \frac{1}{4,932} + 0,024 = 0,23 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \quad (19.19)$$

Jeigu šios konstrukcijos oro tarpas būtų nevėdinamas, skaičiuojant sienos visuminę šiluminę varžą, reikėtų įvertinti nevėdinamo oro sluoksnio šiluminę varžą bei sluoksnių, esančių į išorę nuo oro tarpo, šilumines varžas. Nevėdinamo oro tarpo šiluminė varža, kai šilumos srauto kryptis horizontali ir oro tarpo storis 40 mm (1.6 lentelė – pateikta priede) – $R_g = 0,18 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$. Išorinė šiluminė varža – $R_{se} = 0,04 (\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$.

Sienos visuminė šiluminė varža:

$$\begin{aligned} R_t &= R_{se} + R_l + R_g + R_3 + R_4 + R_5 + \\ R_6 + R_{si} &= 0,04 + 0,12 + 0,18 + \\ &0,857 + 2,703 + 1,087 + 0,025 + 0,13 = 5,142 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}. \end{aligned} \quad (19.20)$$

Sienos šilumos perdavimo koeficientas:

$$U = \frac{1}{R_t} = \frac{1}{5,142} = 0,19 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}). \quad (19.21)$$

Statybinių medžiagų ir gaminių šiluminių techninių dydžių projektinės vertės pateiktos priede 1.7 lentelėje.

19.3. Konstrukcijos iš termiškai nevienalyčių sluoksnių suminės šiluminės varžos skaičiavimas

Užduotis: apskaičiuoti keraminio blokelių su tuštuma šiluminę varžą (19.2 pav).

19.2 pav. Keraminio blokelio su tuštuma schema: 1 – keramika ($\rho = 1200 \text{ kg/m}^3$, $\lambda_{ds} = 0,35 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$); 2 – nevėdinamas oro tarpas ($R_g = 0,18 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ (kai šilumos srautas horizontalus, tarpo storis 50 mm))

Pirmiausia blokelis dalijamas į dalis plokštumomis, lygiagrečiomis šilumos srautui. Gaunamos 3 dalys: a, b ir c. Skaičiuojamas 1 m aukščio blokelių sienos fragmentas, todėl atitinkamai gautų dalių plotai yra lygūs: $A_a = 0,1 \text{ m}^2$; $A_b = 0,3 \text{ m}^2$; $A_c = 0,1 \text{ m}^2$. Bendras plotas bus lygus $A = 0,5 \text{ m}^2$.

Nustatoma kiekvienos dalies suminė šiluminė varža:

$$R_a = \frac{d}{\lambda_1} = \frac{0,25}{0,35} = 0,714 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}. \quad (19.22)$$

$$R_b = \frac{d_1}{\lambda_1} + R_g + \frac{d_3}{\lambda_1} = \frac{0,10}{0,35} + 0,18 + \frac{0,10}{0,35} = 0,751 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}. \quad (19.23)$$

$$R_c = \frac{d}{\lambda_1} = \frac{0,25}{0,35} = 0,714 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W} \quad (19.24)$$

Apskaičiuojama didžiausia suminė šiluminė varža:

$$R' = \frac{A_a + A_b + A_c}{\frac{A_a}{R_a} + \frac{A_b}{R_b} + \frac{A_c}{R_c}} = \frac{0,10 + 0,30 + 0,10}{\frac{0,10}{0,714} + \frac{0,30}{0,751} + \frac{0,10}{0,714}} = 0,735 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}. \quad (19.25)$$

Toliau blokelis dalijamas į sluoksnius plokštumomis, statmenomis šilumos srautui. Randama kiekvieno iš gautų trijų sluoksnių šiluminė varža.

Vienalyčių sluoksnių (1 ir 2) šiluminė varža randama paprastai:

$$R_1 = \frac{d_1}{\lambda_1} = \frac{0,10}{0,35} = 0,285 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}. \quad (19.26)$$

$$R_3 = \frac{d_3}{\lambda_1} = \frac{0,10}{0,35} = 0,285 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}. \quad (19.27)$$

Nustatoma nevienalyčio sluoksnio (2) šiluminė varža. Ji skaičiuojama analogiškai, kaip ir blokelių didžiausia suminė šiluminė varža. Tam nevienalytis sluoksnis išdalijamas į vienalytes dalis: 2a, 2b ir 2c. Apskaičiuojama kiekvienos iš šių dalių šiluminė varža, o tada skaičiuojama šio sluoksnio šiluminė varža, įvertinant kiekvienos šio sluoksnio dalies plotus:

$$R_{2a} = R_{2c} = \frac{d_2}{\lambda_1} = \frac{0,05}{0,35} = 0,142 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}. \quad (19.28)$$

Antro sluoksnio *b* dalies šiluminė varža lygi nevedinamo oro sluoksnio šiluminei varžai $R_{2b} = R_g = 0,18 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ (kai šilumos srautas horizontalus, tarpo storis 50 mm);

$$R_2 = \frac{A_a + A_b + A_c}{\frac{A_{2a}}{R_{2a}} + \frac{A_{2b}}{R_{2b}} + \frac{A_{2c}}{R_{2c}}} = \frac{0,10 + 0,30 + 0,10}{\frac{0,10}{0,142} + \frac{0,30}{0,18} + \frac{0,10}{0,142}} = 0,163 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}. \quad (19.29)$$

Skaičiuojama mažiausia atitvaros suminė šiluminė varža:

$$R'' = R_1 + R_2 + R_3 = 0,285 + 0,163 + 0,285 = 0,733 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}. \quad (19.30)$$

Toliau skaičiuojama blokelių suminė šiluminė varža:

$$R_s = \frac{R' + R''}{2} = \frac{0,735 + 0,733}{2} = 0,734 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}. \quad (19.31)$$

Blokelių suminė šiluminė varža – $R_s = 0,734 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$.

Pagal (19.32) formulę apskaičiuojama blokelių suminės šiluminės varžos R_s santykinė paklaida e , %:

$$e = \frac{R' - R''}{2 \cdot R_s} \cdot 100 = \frac{0,735 - 0,733}{2 \cdot 0,734} \cdot 100 = 0,001 \%. \quad (19.32)$$

Kadangi apskaičiuota skaičiavimo rezultatų santykinė paklaida ($e = 0,001 \%$) mažesnė už maksimaliai leistiną (20%), tai reiškia, kad skaičiavimai atlikti pakankamu tikslumu.

Kontroliniai klausimai

1. Ką vadiname šilumos laidumo koeficientu?
2. Ką vadiname šiluminė varža?
3. Kaip apskaičiuojama šiluminė varža?
4. Kaip apskaičiuojamas sienos šilumos perdavimo koeficientas?
5. Ką vadiname deklaruojamu šilumos laidumo koeficientu?

PRIEDAS

1.1 lentelė. Pataisa $\Delta\lambda_0$ dėl papildomo medžiagos įdrėkimo vėdinamose ir nevėdinamose atitvarose

Eil. Nr.	Termoizoliacinės medžiagos ir gaminiai	Pataisa $\Delta\lambda_0$, W/(m·K)	
		vėdinama	nevėdinama
1.	Akytieji betonai ir silikatai, $\rho = 600 \text{ kg/m}^3$	0,02	0,03
2.	Akytieji betonai ir silikatai, $\rho = 400 \text{ kg/m}^3$	0,015	0,02
3.	Mineralinė vata	0,001	0,002
4.	Birioji celiuliozės pluošto vata, $\rho = 35\text{--}55 \text{ kg/m}^3$	0,01	0,02
5.	Fenolio ir karbamido- formaldehidinio putplasčio plokštės	0,02	0,03
6.	Keramzito žvyras, $\rho = 400\text{--}600$ kg/m^3	0,01	0,02
7.	Medienos plaušo ir medienos drožlių plokštės, $\rho = 200 \text{ kg/m}^3$	0,015	neleidžiama naudoti
8.	Medienos plaušo ir medienos drožlių plokštės, $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$	0,11	neleidžiama naudoti
9.	Polistireninio putplasčio plokštės (EPS)	0,001	0,002
10.	Ekstruzinio polistireninio putplasčio plokštės (XPS)	0,000	0,000
11.	Putstiklis, $\rho = 200 \text{ kg/m}^3$	0,01	0,02
12.	Putstiklis, $\rho = 400 \text{ kg/m}^3$	0,02	0,03
13.	Poliuretano putplasčio plokštės	0,001	0,002

1.2 lentelė. Šilumos konvekcijos poveikio koeficiento k_{CV} vertės

Termoizoliacinio gaminio montavimo konstrukcijoje būdas		Termoizoliacinis sluoksnis vėdinamas ¹						Termoizoliacinis sluoksnis nevėdinamas ²		
		Termoizoliacinio sluoksnio medžiagos oro laidumo koeficientas λ , $\text{m}^3/(\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{Pa})$						Termoizoliacinio sluoksnio medžiagos oro laidumo koeficientas λ , $\text{m}^3/(\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{Pa})$		
		>190		190÷60		<60		>190	190÷60	<60
		A	B	A	B	A	B			
Termoizoliaciniai gaminiai priklijuoti arba mechaniškai pritvirtinti prie izoliuojamo paviršiaus ³		0,1	N	0	N	0	0 (0,1)	0,15	0,05	0
Termoizoliaciniai gaminiai, nepritvirtinti prie izoliuojamo paviršiaus ⁴	Termoizoliaciniai gaminiai užpildo visą erdvę ⁵	0,1	N	0	N	0	0 (0,1)	0,1	0	0
	Termoizoliaciniai gaminiai sujungti arba perdengti ⁶	0,2	N	0,1	N	0,05	0,2	0,2	0,05	0,05
	Termoizoliaciniai gaminiai nesusijungti arba neperdengti ⁷	0,3	N	0,1 5	N	0,05	0,3	0,3	0,3	0,3

1.2 lentelės paaiškinimai:

A – termoizoliacinis sluoksnis su vėjo izoliaciniu sluoksniu, įrengtu pagal 8 lentelėje pateiktus reikalavimus.

B – termoizoliacinis sluoksnis be vėjo izoliacinio sluoksnio.

N – nurodyto oro laidumo koeficiento termoizoliacinė medžiaga šioje konstrukcijoje nenaudojama.

Skliaustuose pateikta vertė naudojama, kai vėdinimo angų plotas didesnis negu $300 \text{ cm}^2/\text{m}$.

1 – Vėdinimo angų plotas didesnis kaip $5 \text{ cm}^2/\text{m}$ (vienam sienos arba stogo šlaito ilgio metrui).

2 – Vėdinimo angų plotas mažesnis kaip $5 \text{ cm}^2/\text{m}$ (vienam sienos arba stogo šlaito ilgio metrui).

3 – Termoizoliacinė medžiaga prie izoliuojamo paviršiaus pritvirtinta taip, kad eksploatacijos metu negali judėti, nėra galimybių susidaryti plyšiams tarp gaminių. Konstrukcijų pavyzdžiai: tinkuoti fasadai, vėdinamieji fasadai su mechaniškai pritvirtintu termoizoliaciniu sluoksniu, trisluoksnis mūras su oro tarpu arba be jo su mechaniškai pritvirtintu termoizoliaciniu sluoksniu, sutapdintieji stogai.

4 – Termoizoliacinė medžiaga nepritvirtinta prie izoliuojamo paviršiaus arba pritvirtinta taip, kad gali judėti bent viena kryptimi, dėl ko gali susidaryti plyšiai tarp gaminių.

5 – Termoizoliaciniai gaminiai įspaudžiami tarp juos ribojančių paviršių ir karkaso elementų, naudojant papildomą jėgą, arba uždengiami danga, prispaudžiančia prie izoliuojamo pagrindo. Konstrukcijų pavyzdžiai: karkasinės sienos ir šlaitiniai stogai su vėjo izoliacija iš standžių plokščių, grindys, perdangos su standžiu apsauginiu sluoksniu, birių termoizoliacinių medžiagų pripūsti uždari oro tarpai.

6 – Termoizoliaciniai gaminiai glaudžiai sujungti arba perdengti taip, kad nėra galimybių atsirasti plyšiams tarp gaminių. Konstrukcijų pavyzdžiai: karkasinės sienos ir šlaitiniai stogai su vėjo izoliacija iš plėvelių, perdangos į pastogę be standaus apsauginio sluoksnio. Konstrukcijos su standžiomis termoizoliacinėmis plokštėmis su suleidimo įpjovomis.

7 – Termoizoliaciniai gaminiai sudėti taip, kad yra galimybė atsirasti plyšiams tarp gaminių, taip pat tarp gaminių ir izoliuojamo paviršiaus. Konstrukcijų pavyzdžiai: vėdinami fasadai ir trisluoksnis mūras su oro tarpu, kai mechaniškai nepritvirtintas termoizoliacinis sluoksnis.

1.3 lentelė. Pastatų vėdinamų atitvarų, apšiltintų termoizoliaciniais gaminiais, vėją izoliuojančių medžiagų orinio laidžio vertės

Pastatų sienų oro tarpų sandarumas	Vėjo izoliacijos sluoksnio orinio laidžio K, m³/(m²·s·Pa) vertės, esant termoizoliacinio sluoksnio medžiagos oro laidumo koeficientui l, m³/(m·s·Pa)		
	l > 190 · 10 ⁻⁶	190 · 10 ⁻⁶ ≥ l > 60 · 10 ⁻⁶	l ≤ 60 · 10 ⁻⁶
Uždari oro tarpai. Oro tarpo vėdinimo angų plotas A _v < 5 cm²/m	K < 850 · 10 ⁻⁶ m³/(m²·s·Pa)	K < 1200 · 10 ⁻⁶ m³/(m²·s·Pa)	Termoizoliacinės plokštės gali būti naudojamos be vėją izoliuojančio sluoksnio vėdinamose sienose. Šios plokštės turi būti tvirtinamos mechaniškai arba klijuojamos prie kitų atitvaros sluoksnių, siekiant panaikinti oro tarpelius tiek tarp pačių plokščių, tiek tarp plokščių ir kitų atitvaros sluoksnių.
Mažai vėdinami oro tarpai. Oro tarpo vėdinimo angų plotas 5 mm²/m ≤ A _v ≤ 15 cm²/m			
Vėdinami oro tarpai. Oro tarpo vėdinimo angų plotas 15 cm²/m < A _v ≤ 300 cm²/m			
Vėdinami oro tarpai. Oro tarpo vėdinimo angų plotas 300 cm²/m < A _v ≤ 400 cm²/m	K < 850 · 10 ⁻⁶ m³/(m²·s·Pa)		
Intensyviai vėdinami oro tarpai ir pastato atitvarų sandūrų vietos. Oro tarpo vėdinimo angų plotas 400 cm²/m < A _v ≤ 1000 cm²/m	Šios plokštės turi būti tvirtinamos mechaniškai arba klijuojamos		
	K < 35,0 · 10 ⁻⁶ m³/(m²·s·Pa)		

1.4 lentelė. Vidinio ir išorinio paviršių šiluminės varžos R_{si} ir R_{se} , $m^2 \cdot K/W$

Vidinio paviršiaus šiluminė varža, R_{si} , m ² ·K/W			Išorinio paviršiaus šiluminė varža, R_{se} , m ² ·K/W		
Šilumos srauto kryptis					
horizontali →	aukštyn ↑	žemyn ↓	Visomis kryptimis		
0,13	0,10	0,17	0,04	0,04	0,04

Pastabos:

1. Pertvarų, skiriančių dvi patalpas su skirtingomis oro temperatūromis, suminė abiejų paviršių šiluminė varža ($R_{si} + R_{se}$) prilyginama $0,25 m^2 \cdot K/W$.
2. Horizontaliuoju vadinamas srautas, kurio kryptis vertikaliosios plokštumos atžvilgiu nesiskiria daugiau kaip $\pm 30^\circ$.

1.5 lentelė. Struktūrinio daugiklio α vertės

Jungčių vieta	α
Sienoje tarp mūro ir medienos	0
Sienoje tarp mūro ir betono	0,5
Sienoje tarp dviejų betono sluoksnių	0,6
Tvirtinantys varžtai tarp stogo ritininės dangos ir metalo lakštų	0,6
Tvirtinantys varžtai tarp stogo plastikinės dangos ir metalo lakštų	0,4
Varžtai tarp metalinių lakštų	0,8

1.6 lentelė. Nevėdinamojo oro tarpo šiluminė varža R_g , $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$

Oro tarpo storis d , mm	Šiluminė varža, R_g , $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$		
	Šilumos srauto kryptis		
	Horizontali $\rightarrow$	Aukštyn $\uparrow$	Žemyn $\downarrow$
5	0,11	0,11	0,11
7	0,13	0,13	0,13
10	0,15	0,15	0,15

1.7 lentelė. Statybinių medžiagų ir gaminių šiluminių techninių dydžių projektinės vertės

Medžiagos ir gaminiai	Tankis ρ , kg/m ³	Projektinis šilumos laidumo koeficientas λ , W/(m·K)	Savitoji šiluminė talpa c_p , J/(kg·K)	Vandens garų varžos faktorius	
				μ	
				sausas	drėgnas
Asfaltas	2100	0,70	1000	50000	50000
Bitumas grynas	1050	0,17	1000	50000	50000
Bitumuotas veltinis/ lakštai	1100	0,23	1000	50000	50000
Betonas ^(a)					
Vidutinio tankio	1800	1,15	1000	100	60
	2000	1,35	1000	100	60
	2200	1,65	1000	120	70
Didelio tankio	2400	2,00	1000	130	80
Armuotas (su 1% plieno)	2300	2,3	1000	130	80
Armuotas (su 2% plieno)	2400	2,5	1000	130	80
Grindų dangos					
Guma	1200	0,17	1400	10000	10000
Plastikai	1700	0,25	1400	10000	10000
Pagrindas: aktyoji guma arba plastikas	270	0,10	1400	10000	10000
Pagrindas, veltinis	120	0,05	1300	20	15
Pagrindas, vilna	200	0,06	1300	20	15
Pagrindas, kamštėna	< 200	0,05	1500	20	10
Paklotas, kamštėna	> 400	0,065	1500	40	20

1.7 lentelės tęsinys

Kilimas/tekstilės danga	200	0,06	1300	5	5
Linoleumas	1200	0,17	1400	1000	800
Dujos:					
Oras	1,23	0,025	1008	1	1
Anglies dioksidas	1,95	0,014	820	1	1
Argonas	1,70	0,017	519	1	1
Sieros heksafluoridas	6,36	0,013	614	1	1
Kriptonas	3,56	0,0090	245	1	1
Ksenonas	5,68	0,0054	160	1	1
Stiklas:					
Natrio-kalkių	2500	1,00	750	∞	∞
Kvarcinis	2200	1,40	750	∞	∞
Mozaikinis	2000	1,20	750	∞	∞
Vanduo:					
Ledas –10°C temperatūroje	920	2,30	2000		
Ledas 0°C temperatūroje	900	2,20	2000		
Sniegas, naujai iškritęs (30 mm)	100	0,05	2000		
Sniegas, minkštas (30 ... 70 mm)	200	0,12	2000		
Sniegas, lengvai sutrintas (70 ... 100 mm)	300	0,23	2000		
Sniegas, sutankintas (< 200 mm)	500	0,60	2000		
Vanduo 10°C	1000	0,60	4190		
Vanduo 40°C	990	0,63	4190		
Vanduo 80°C	970	0,67	4190		

1.7 lentelės tęsinys

Metalai (:)					
Aluminio lydinys	2800	160	880	∞	∞
Bronza	8700	65	380	∞	∞
Žalvaris	8400	120	380	∞	∞
Varis	8900	380	380	∞	∞
Geležis, ketus	7500	50	450	∞	∞
Švinas	11300	35	130	∞	∞
Plienas	7800	50	450	∞	∞
Nerūdijantysis plienas	7900	17	460	∞	∞
Cinkas	7200	110	380	∞	∞
Plastikai (:)					
Akrilas	1050	0,20	1500	10000	10000
Polikarbonatas	1200	0,20	1200	5000	5000
Politetrafluoretilenas (PTFE)	2200	0,25	1000	10000	10000
Polivinilchloridas (PVC)	1390	0,17	900	50000	50000
Polimetilmetakrilas (PMMA)	1180	0,18	1500	50000	50000
Poliacetatas	1410	0,30	1400	100000	100000
Poliamidas	1150	0,25	1600	50000	50000
Poliamidas 6,6 su 25% stiklo pl.	1450	0,30	1600	50000	50000
Polietilenas, didelio tankio	980	0,50	1800	100000	100000

1.7 lentelės tęsinys

Polietilenas, mažo tankio	920	0,33	2200	100000	100000
Polistirenas	1050	0,16	1300	100000	100000
Polipropilenas	910	0,22	1800	10000	10000
Polipropilenas su 25% stiklo pl.	1200	0,25	1800	10000	10000
Poliuretanai (PU)	1200	0,25	1800	6000	6000
Epoksidinė derva	1200	0,20	1400	10000	10000
Fenolio derva	1300	0,30	1700	10000	100000
Poliesterio derva	1400	0,19	1200	10000	10000
Guma (·)					
Natūrali	910	0,13	1100	10000	10000
Neoprenas	1240	0,23	2140	10000	10000
Butilas, kietasis, karštai lydytas	1200	0,24	1400	200000	200000
Putgumė	60–80	0,06	1500	7000	7000
Kietoji guma (ebonitas)	1200	0,17	1400	∞	∞
EPDM (etileno propileno monomeras)	1150	0,25	1000	6000	6000
Poliizobutilenas	930	0,20	1100	10000	10000
Polisulfidas	1700	0,40	1000	10000	10000
Butadienas	980	0,25	1000	100000	100000
Sandarinio medžiagos, hermetikai ir šilumos telteliai (·)					
Silikagelis	720	0,13	1000	∞	∞

1.7 lenteles tęsinys

Silikonas, grynas	1200	0,35	1000	5000	5000
Silikonas su užpildu	1450	0,50	1000	5000	5000
Silikono putos	750	0,12	1000	10000	10000
Uretanas/poliuretanas	1300	0,21	1800	60	60
(šiltinimo tarpai)					
Polivinilchloridas (PVC),	1200	0,14	1000	100000	100000
su 40% minkštikliu					
Elastomero putos	60–80	0,05	1500	10000	10000
Poliuretano (PU) putos	70	0,05	1500	60	60
Polietileno putos	70	0,05	2300	100	100
Gipsas					
Gipsas	600	0,18	1000	10	4
Gipsas	900	0,30	1000	10	4
Gipsas	1200	0,43	1000	10	4
Gipsas	1500	0,56	1000	10	4
Gipso plokštė ^(b)	900	0,25	1000	10	4
Tinkas (:))					
Izoliacinis gipso tinkas	600	0,18	1000	10	6
Gipso tinkas	1000	0,40	1000	10	6
Gipso tinkas	1300	0,57	1000	10	6
Gipso-smėlio tinkas	1600	0,80	1000	10	6
Kalkių-smėlio tinkas	1600	0,80	1000	10	6
Cemento-smėlio tinkas	1800	1,00	1000	10	6
Gruntas(:)					
Molis ir sąnašos	1200–1800	1,5	1670–2500	50	50
Smėlis ir žvyras	1700–2200	2,0	910–1180	50	50

1.7 lenteles tęsinys

Akmuo:					
Natūrali kristalinė uoliena	2800	3,5	1000	10000	1000
Natūrali nuosėdinė uoliena	2600	2,3	1000	250	200
Natūrali lengva nuosėdinė uoliena	1500	0,85	1000	30	20
Natūrali porėtoji uoliena, lava	1600	0,55	1000	20	15
Bazaltas	2700–3000	3,5	1000	10000	10000
Gneisas	2400–2700	3,5	1000	10000	10000
Granitas	2500–2700	2,8	1000	10000	10000
Marmuras	2800	3,5	1000	10000	10000
Skalūnas	2000–2800	2,2	1000	1000	800
Kalkakmenis, labai minkštas	1600	0,85	1000	30	20
Kalkakmenis, minkštas	1800	1,1	1000	40	25
Kalkakmenis, vid. kietumo	2000	1,4	1000	50	40
Kalkakmenis, kietas	2200	1,7	1000	200	150
Kalkakmenis, labai kietas	2600	2,3	1000	250	200
Smiltainis	2600	2,3	1000	40	30
Natūralioji pemza	400	0,12	1000	8	6
Dirbtiniai akmenys	1750	1,3	1000	50	40

1.7 lentelės tęsinys

Čerpės (stogo medžiagos):					
Molio	2000	1,0	800	40	30
Betono	2100	1,5	1000	100	60
Kitokios čerpės:					
Keraminės/porcelianinės	2300	1,3	840		∞
Plastikinės	1000	0,20	1000	10000	10000
Mediena ^(c) :					
	500	0,13	1600	50	20
	700	0,18	1600	200	50
Medienos plokštės ^(c)					
Fanera ^(d)	300	0,09	1600	150	50
Fanera	500	0,13	1600	200	70
Fanera	700	0,17	1600	220	90
Fanera	1000	0,24	1600	250	110
Plokštės su cementiniu rišikliu	1200	0,23	1500	50	30
Medžio pjuvenų plokštės	300	0,10	1700	50	10
Medžio pjuvenų plokštės	600	0,14	1700	50	15
Medžio pjuvenų plokštės	900	0,18	1700	50	20
Orientuotosios medžio skiedrų (OSB) plokštės	650	0,13	1700	50	30
Medžio plaušo plokštės	250	0,07	1700	5	2
MDF ^(e)					
Medžio plaušo plokštės	400	0,10	1700	10	5
MDF					

1.7 lentelės tęsinys

Medžio plaušo plokštės MDF	600	0,14	1700	20	12
Medžio plaušo plokštės MDF	800	0,18	1700	30	20
Keramzitbetonis su keraminiu smėliu ir putų keramzitbetonis	1800 1600 1400 1200 1000 800 600 500	0,9 0,8 0,7 0,5 0,4 0,3 0,28 0,24	1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000 1000		20 15 15 12 10 8 6 6
Tuščiavidurių keraminių blokų (tuštymėtumas – 42%, blokų tankis – 850 kg/m ³)	1000	0,25	1000		10
Tuščiavidurių keramzitbetonio blokelių (tuštymėtumas – 15– 20%), kai keramzitbetonio tankis – 2000 kg/m ³	1700	0,8	1000		10
Tuščiavidurių keramzitbetonio blokelių (tuštymėtumas – 15– 20%), kai keramzitbetonio tankis – 2000 kg/m ³	1100	0,4	1000		15

<p>1 pastaba: Skaičiavimuose vertė „∞“ gali būti pakeista labai didele verte, pvz., 10^6.</p> <p>2 pastaba: Pateiktos vandens garų varžos faktoriaus vertės nustatytos, naudojant „Sauso indo“ ir „Drėgno indo“ bandymo sąlygas, žr. prEN ISO 12572-1999.</p>
<p>(a) Betono tankis pateiktas kaip sausos medžiagos tankis.</p> <p>(b) Šilumos laidumo koeficientas nustatytas, įvertinus popierinio apmušalo poveikį.</p> <p>(c) Medienos ir medienos gaminių tankis nustatytas, esant 20°C temperatūrai ir 65% santykiniam drėgniui.</p> <p>(d) Kaip laikina priemonė ir kol bus gauti pakankamai patikimi kietų medienos plokščių (KMP), laminuotų medienos plokščių (LMP) duomenys, naudoti faneros vertės.</p> <p>(e) MPP – vidutinio tankio medienos plaušo plokštė, sausas procesas.</p>

LITERATŪRA

- Kaminskas, A.; Kaminskas, R. 2010. *Statybinės medžiagos iš technogeninių žaliavų*. Monografija. Kaunas: Technologija. 387 p.
- Kičaitė, A.; Mačiulaitis, R.; Žurauskienė, R.; Nagrockienė, D.; Malaiškienė, J. 2006. *Statybinės medžiagos. Laboratoriniai darbai*. Vilnius: Technika. 111 p.
- LST EN 772-11:2004 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. Lietuvos standartizacijos departamentas, 2004. 6 p.
- LST EN 771-1 Mūro gaminių techniniai reikalavimai. 1 dalis. Keraminiai mūro gaminiai. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas. 2008. 20 p.
- LST 1985:2006 Keraminių mūro gaminių atsparumo šalčiui nustatymas. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas. 2008. 20 p.
- LST EN 1745:2002 Mūras ir jo gaminiai. Projektinių šiluminių verčių nustatymo metodai. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas. 2002. 64 p.
- Mačiulaitis, R.; Malaiškienė, J. 2009. Possibilities to control ceramics properties by changing firing cycles, *Construction and Building Materials* 23 (1): 226–232.
- Mačiulaitis, R.; Malaiškienė, J. 2012. *Statybinės keramikos charakteristikų ir technologinių parametrų reguliavimo galimybės*. Monografija. Vilnius: Technika. 184 p.
- Mačiulaitis, R.; Žurauskienė, R. 2007. *Mažo poringumo statybinė keramika iš vietinių ir technogeninių žaliavų*. Monografija. Vilnius: Technika. 220 p.
- Martinėnas, B. 2004. *Eksperimento duomenų statistinė analizė*. Vilnius: Technika. 102 p.
- Nagrockienė, D.; Žurauskienė, R. 2008. *Statybinės medžiagos ir jų gaminiai*. Vilnius: Technika. 182 p.
- Nagrockienė, D.; Žurauskienė, R.; Mačiulaitis, R.; Kičaitė, A.; Gailius, A., Červokienė, A. 2010. *Medžiagų mokslas. Laboratorinių darbų metodikos nurodymai*. Vilnius: Technika. 120 p.
- Sadūnas, A. 1999. *Aliumosilikatų degimas redukuojančių–oksiduojančių dujų terpėje*. Vilnius: VPU, 188 p.
- Šiaučiūnas, R. 2001. *Keraminių medžiagų cheminė technologija: mokomoji knyga*. Kaunas: Technologija. 190 p.
- Žurauskienė, R.; Nagrockienė, D. 2008. *Statybinių medžiagų ir dirbinių technologija*. Vilnius: Technika. 185 p.