

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Andrius BUSKA

MAKROSTRUKTŪROS IR KITŲ FIZINIŲ SAVYBIŲ ĮTAKA MINERALINĖS VATOS GAMINIŲ GNIUŽDYMO RODIKLIAMS

DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,
STATYBOS INŽINERIJA (02T)



LEIDYKLA
Vilnius TECHNIKA 2010

Disertacija rengta 2005–2010 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.

Mokslinis vadovas

prof. habil. dr. Romualdas MAČIULAITIS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, statybos inžinerija – 02T).

<http://leidykla.vgtu.lt>

VGTU leidyklos TECHNIKA 1764-M mokslo literatūros knyga

ISBN 978-9955-28-590-8

© VGTU leidykla TECHNIKA, 2010

© Andrius, Buska, 2010

andrius.buska@rockwool.com

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Andrius BUSKA

THE INFLUENCE OF
MACROSTRUCTURE AND OTHER
PHYSICAL CHARACTERISTICS
ON COMPRESSIVE PARAMETERS
OF MINERAL WOOL PRODUCTS

DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,
CIVIL ENGINEERING (02T)



LEIDYKLA
Vilnius TECHNIKA 2010

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2005–2010.

Scientific Supervisor

Prof Dr Habil Romualdas MAČIULAITIS (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Civil Engineering – 02T).

Reziumė

Disertacijoje nagrinėjama makrostruktūros ir kitų fizinių savybių įtaka mineralinės vatos gaminių gniuždymo rodikliams modeliui, modeliuotomis ir eksploatacijos sąlygomis. Tyrimo objektas – standūs mineralinės vatos gaminiai naudojami įvairių atitvarinių konstrukcijų termoizoliaciniais sluoksniais. Pagrindinis disertacijos tikslas – sukurti tikslesnį mineralinės vatos makrostruktūros identifikavimo pagal plaušų išsidėstymo kryptingumą metodą, padėsiantį makrostruktūros rodikliais ir kitais parametrais prognozuoti gniuždymo stiprį. Disertacijoje siekiama ištirti skirtingos struktūros mineralinės vatos gaminių gniuždymo rodiklius (gniuždymo įtempį, esant 10 % deformacijai, ir sutelktą apkrovą, esant 5 mm deformacijai) laboratorinėmis ir realiomis eksploatacijos sąlygomis.

Disertaciją sudaro įvadas, penki skyriai, rezultatų aptarimas, bendrosios išvados, naudotos literatūros ir autoriaus publikacijų disertacijos tema sąrašai ir du priedai.

Įvadiniam skyriuje aptariama tiriamoji problema, darbo aktualumas, aprašomas tyrimų objektas, formuluojamas darbo tikslas bei uždaviniai, aprašoma tyrimų metodika, darbo mokslinis naujumas, darbo rezultatų praktinė reikšmė, ginamieji teiginiai. Įvado pabaigoje pristatomos disertacijos tema autoriaus paskelbtos publikacijos ir pranešimai konferencijose bei disertacijos struktūra.

Pirmajame skyriuje pateikiama literatūros ir atliktų tyrimų apžvalga apie mineralinės vatos struktūrą, savybes bei jų pokyčius gamybos ir eksploatacijos metu. Antrajame skyriuje aprašytos naudotų medžiagų charakteristikos, tyrimų metodai ir aparatūra. Trečiajame skyriuje pristatytas makrostruktūros rodiklių nustatymo pagal dominuojančią plaušų orientaciją metodas, o jo dydžiai susieti su gniuždymo stipriu. Ketvirtas skyrius skirtas homogeniškos ir heterogeniškos struktūros akmens vatos gaminių stiprumo ir deformacinių savybių tyrimams. Penktajame skyriuje pateikiami akmens vatos gaminių atsparumo klimatinių veiksnių ir dinaminių apkrovų poveikio tyrimai laboratorinėmis ir natūrinėmis sąlygomis. Šeštasis skyrius skirtas rezultatų aptarimui, kuriame gauti rezultatai lyginami su kitų autorių analogiškų tyrimų rezultatais.

Disertacijos tema išspausdinti aštuoni moksliniai straipsniai: du – mokslo žurnaluose, įtrauktuose į *Thomson ISI Web of Science* sąrašą, vienas – recenzuojamame mokslo žurnale (įtrauktame į LMT patvirtintų duomenų bazių sąrašą), vienas – recenzuojamame tarptautinės konferencijos straipsnių rinkinyje, keturi – kituose respublikinių konferencijų straipsnių rinkiniuose. Disertacijoje atliktų tyrimų rezultatai buvo paskelbti septyniose mokslinėse konferencijose, vykusiose Lietuvoje. Remiantis tyrimų rezultatais pateikta paraiška sukurtam makrostruktūros nustatymo metodui patentuoti.

Abstract

The dissertation investigates the influence of macrostructure and other physical properties on mineral wool compressive parameters. The subject of the research is rigid mineral wool products. The main objective of the research is to develop a more accurate methodology for the identification of the macrostructure of mineral wool in accordance with the directionality of fibre arrangement, determine and predict the compressive strength through macrostructure and other parameters. To analyse the strength parameters (compression stress at 10% deformation and point load at 5 mm deformation) of mineral wool products with different structures in laboratory and real operation conditions.

The scientific work consists of the general characteristic of the dissertation, five chapters, discussion, general conclusions, list of literature, list of publications and 2 addenda.

The introduction reveals the investigated problem, importance of the thesis and the object of research and describes the purpose and tasks of the paper, research methodology, scientific novelty, the practical significance of results examined in the paper and defended statements. The introduction ends in presenting the author's publications on the subject of the defended dissertation, offering the material of made presentations in conferences and defining the structure of the dissertation.

Chapter 1 revises literature and performed researches. In chapter 2 the characteristics of used materials, investigation methodology and equipment are described. The chapter 3 describes the methodology for the estimation of macrostructure parameters in accordance with the dominated fibres orientation, and its values are related to the compressive strength. Chapter 4 is intended for the analysis of strength and deformation properties of mineral wool products with homogeneous and heterogeneous structure. In the chapter 5 the investigations of the resistance of mineral wool products expose to the impact of climatic factors and dynamic loads at laboratory and natural conditions are provided. Chapter 6 discusses the comparison of the obtained results with the ones obtained by other authors during analogical investigations.

8 articles focusing on the subject of the dissertation are published: 2 articles – in the *Thomson ISI Web of Science* register, one – in the reviewed scientific journal (included in the list of databases approved by the Research Council of Lithuania), one – in material reviewed during an international conference and 4 articles during national conferences. 7 presentations on the subject have been given in scientific conferences. Based on research results filled application form for patent of developed methodology for the identification of the macrostructure.

Žymėjimai

Terminai

Akmens vata – izoliacinė velta pluošto medžiaga, pagaminta iš lydytų gamtinių uolienų (diabazo, bazalto ir pan.) (BS 3533:1981).

Gniuždymo įtempis – vidinės jėgos intensyvumas, išreikštas tam tikrame deformacijos taške veikiančios jėgos ir ploto, kurį veikia jėga, dalmeniu.

Gniuždymo rodikliai – medžiagos stiprumo savybės, išreiškiamos gniuždymo įtempio, esant 10 % deformacijai (σ_{10}), arba stiprio gniuždant (σ_m) ir sutelktosios apkrovos, esant 5 mm deformacijai (F_5), skaitiniais dydžiais.

Gniuždymo stipris apibūdina jėgines arba energines savybes, atsirandančias išorinių jėgų veikiamoje medžiagoje dėl priešpriešinio spaudimo.

Heterogeniška struktūra – iš kelių skirtingo tankio (storio) sluoksnių ar dalių susidedanti struktūra su matoma paviršių sąlyčio zona.

Homogeniška struktūra – visame tūryje vieno pastovaus tankio struktūra be aiškių ribų.

Mineralinė vata – izoliacinė velta pluošto medžiaga, pagaminta iš lydytos uolienos, stiklo arba šlako (LST EN 13162:2009).

Plokščiasis stogas – nuožulnusi nuo 0,7° iki 7° nuolydžio stogas (STR 2.05.02:2008 (2009)).

Stipris gniuždant – gaminio stiprumo riba, išreikšta sugniuždžiusios jėgos ir gniuždomojo ploto santykiu.

Simboliai

d – storis (LST EN 13162:2009);
 F_5 – sutelktoji apkrova esant 5 mm deformacijai (LST EN 13162:2009; LST EN 12430:2000);
 $F_{5(DL)}$ – sutelktoji apkrova po dinaminio varginimo;
 M – organinių medžiagų kiekis (LST EN 13820:2003);
 n – bandymo rezultatų skaičius (LST EN 13162:2009);
 R – koreliacijos koeficientas (Sakalauskas 2003);
 r – porinės koreliacijos koeficientas (Sakalauskas 2003);
 R^2 – determinacijos koeficientas (Sakalauskas 2003);
 s_e – vidutinis standartinis nuokrypis (Čekanavičius, Murauskas 2002);
 ε – deformacija gniuždant (LST EN 826:1998; LST EN 12430:2000);
 ρ – tankis (LST EN 1602:1998);
 ρ_A – tankis po sendinimo bandymų;
 ρ_{F5} – tankis atliekant sutelktosios apkrovos bandymus;
 ρ_N – nominalus tankis;
 ρ_S – tankis atliekant gniuždymo bandymus;
 σ_{10} – gniuždymo įtempis esant 10 % deformacijai (LST EN 13162:2009; LST EN 826:1998);
 $\sigma_{10(AR)}$ – gniuždymo įtempio atsparumo senėjimui rodiklis;
 $\sigma_{10,A}$ – gniuždymo įtempis esant 10 % deformacijai po sendinimo;
 σ_e – gniuždymo ribinis įtempis (LST EN 826:1998);
 σ_m – stipris gniuždant (LST EN 13162:2009; LST EN 826:1998);
 $\sigma_{PL(DR)}$ – sutelktosios apkrovos dinaminio atsparumo rodiklis.

Santrumpos

hdl – didesnio tankio sluoksnis (angl. *higher density layer*);
 ldl – mažesnio tankio sluoksnis (angl. *lower density layer*);
 wp – visas gaminyš ar bandinys (angl. *whole product*);
 RH – santykinis oro drėgnumas, %;
 S_C – makrostruktūros rodiklis C pjūvyje;
 S_L – makrostruktūros rodiklis L pjūvyje;
 S_{L-C} – makrostruktūros rodiklių vidutinis dydis;
 T – temperatūra, °C.

Turinys

IVADAS.....	1
Tiriamoji problema	1
Darbo aktualumas.....	2
Tyrimų objektas.....	3
Darbo tikslas.....	3
Darbo uždaviniai	3
Tyrimų metodika	4
Darbo mokslinis naujumas ir jo reikšmė.....	4
Darbo rezultatų praktinė reikšmė.....	5
Ginamieji teiginiai	6
Darbo rezultatų aprobavimas.....	6
Disertacijos struktūra	7
1. MINERALINĖS VATOS STRUKTŪROS IR STIPRUMO SAVYBIŲ TYRIMŲ APŽVALGA.....	9
1.1. Mineralinių pluoštinių medžiagų klasifikacija, gamybos raida ir poreikis	9
1.1.1. Mineralinių pluoštinių medžiagų klasifikavimas.....	9
1.1.2. Gamybos raida ir poreikis.....	11
1.1.3. Mineralinės vatos gamybos technologijos pagrindai	13
1.2. Veiksniai, darantys įtaką mineralinės vatos gaminių stiprumo savybėms šiltinimo ir eksploatacijos metu	14
1.2.1. Klimatiniai veiksniai	15
1.2.2. Apkrovų poveikiai.....	20

1.3. Technologiniai veiksniai, lemiantys plaušų išsidėstymą mineralinės vatos gaminių struktūroje	24
1.3.1. Kryptingas plaušų išsidėstymas struktūroje	25
1.3.2. Chaotiškas plaušų išsidėstymas struktūroje	28
1.3.3. Plaušų išsidėstymas struktūroje sluoksniais	29
1.4. Mineralinės vatos struktūros ypatumai	31
1.4.1. Mikro- ir makrostruktūros tyrimai	31
1.4.2. Makrostruktūros parametrų identifikavimas	33
1.5. Literatūrinės apžvalgos apibendrinimas	36
2. TYRIMŲ METODIKA IR MEDŽIAGOS	39
2.1. Prietaisai, bandymų metodika ir eiga	39
2.1.1. Bandinių matmenys ir paruošimas	39
2.1.2. Tankio nustatymas	40
2.1.3. Gniuždymo įtempio ir (arba) stiprio gniuždant nustatymas	40
2.1.4. Sutelktosios apkrovos nustatymas	43
2.1.5. Klimatiniai bandymai veikiant aukštai temperatūrai ir drėgmei	44
2.1.6. Dinaminio varginimo poveikis	45
2.1.7. Natūriniai klimatiniai veiksnių matavimai	47
2.1.8. Organinių medžiagų kiekio (kaitinimo nuostolių) nustatymas	48
2.1.9. Paviršiaus skenavimas ir vaizdų analizavimas	49
2.1.10. Statistinė eksperimentinių rezultatų analizė	52
2.2. Bandiniai ir jų charakteristikos	54
2.3. Antrojo skyriaus išvados	57
3. DOMINUOJANČIOS PLAUSŲ ORIENTACIJOS NUSTATYMAS SKIRTINGOS STRUKTŪROS MINERALINĖS VATOS GAMINIUOSE	59
3.1. Makrostruktūros rodiklių nustatymas	60
3.1.1. Mineralinės vatos gaminių klasifikacija pagal struktūrą	73
3.2. Makrostruktūros rodiklių įtakos gniuždymo stipriui nustatymas	76
3.3. Mineralinės vatos plokščių gniuždymo stiprio priklausomybė nuo apkrovos pridėjimo krypties	82
3.4. Trečiojo skyriaus išvados	86
4. SKIRTINGOS STRUKTŪROS MINERALINĖS VATOS GAMINIŲ GNIUŽDYMO RODIKLIŲ IR DEFORMACINIŲ SAVYBIŲ TYRIMAI	89
4.1. Homogeniškos ir heterogeniškos struktūros mineralinės vatos gaminių gniuždymo rodiklių tyrimai	90
4.1.1. Homogeniškos ir heterogeniškos struktūros gaminių gniuždymo įtempio, esant 10 % deformacijai, nustatymas	90
4.1.2. Homogeniškos ir heterogeniškos struktūros gaminių sutelktosios apkrovos nustatymas	94
4.2. Sluoksnių storio įtakos dvitankių mineralinės vatos plokščių gniuždymo stipriui ir sutelktajai apkrovai tyrimai	99

4.2.1. Viršutinio sluoksnio storio įtakos gniuždymo įtempiui ir sutelktajai apkrovai nustatymas	100
4.2.2. Apatinio sluoksnio įtakos gniuždymo įtempio ir sutelktajai apkrovai nustatymas	103
4.3. Heterogeniškos struktūros mineralinės vatos plokščių atskirų sluoksnių įtakos gniuždymo stipriui ir sutelktajai apkrovai tyrimai	109
4.3.1. Atskirų sluoksnių gniuždymo įtempio, esant 10 % deformacijai, nustatymas.....	109
4.3.2. Atskirų sluoksnių sutelktosios apkrovos nustatymas.....	115
4.4. Skirtingos struktūros mineralinės vatos gaminių gniuždymo stiprio ir sutelktosios apkrovos dydžių lyginamieji tyrimai	120
4.5. Ketvirtąjo skyriaus išvados.....	126
 5. MINERALINĖS VATOS GAMINIŲ ATSPARUMAS KLIMATINIŲ VEIKSNIŲ IR DINAMINIŲ APKROVŲ POVEIKIUI.....	129
5.1. Temperatūros ir drėgmės poveikis mineralinės vatos plokščių gniuždymo įtempio dydžiams.....	130
5.1.1. Mineralinės vatos plokščių gniuždymo įtempio pokyčiai dėl temperatūros ir drėgmės poveikio laboratorinėmis sąlygomis	130
5.1.2. Klimatinių veiksnių nustatymas realiomis eksploatacijos sąlygomis	136
5.1.3. Mineralinės vatos plokščių, naudotų natūriniuose eksperimentuose, gniuždymo įtempio nustatymas.....	139
5.2. Dinaminių apkrovų poveikis mineralinės vatos plokščių sutelktosios apkrovos dydžiams.....	143
5.2.1. Mineralinės vatos plokščių sutelktosios apkrovos pokyčiai dėl dinaminės apkrovos poveikio.....	143
5.2.2. Mineralinės vatos plokščių, naudotų natūriniuose eksperimentuose, sutelktosios apkrovos nustatymas.....	151
5.3. Penktąjo skyriaus išvados.....	155
 6. REZULTATŲ APTARIMAS	157
 BENDROSIOS IŠVADOS	163
 LITERATŪRA IR ŠALTINIAI	167
 AUTORIAUS PUBLIKACIJOS DISERTACIJOS TEMA	185
 PRIEDAI	187
A priedas. Mineralinės vatos gamintojų geografinis išsidėstymas Europoje (2008 m. duomenys) ir numatytos investicijos į gamybos vietas.....	188
B priedas. Technologinė akmens vatos gaminių gamybos schema.....	189

Contents

INTRODUCTION.....	1
The Investigated Problem	1
Importance of the Thesis	2
The Object of Research	3
The Goal of the Thesis	3
The Tasks of the Thesis	3
Research Methodology	4
Importance of Scientific Novelty	4
Practical Significance of Achieved Results	5
The defended statements	6
Approval of the Results	6
Dissertation Structure	7
1. AN OVERVIEW OF RESEARCH ON MINERAL WOOL STRUCTURE AND STRENGTH CHARACTERISTICS.....	9
1.1. Classification of mineral fibrous materials, production development and market's demand.....	9
1.1.1. Classification of mineral fibrous materials	9
1.1.2. Production development and market's demand.....	11
1.1.3. Basics of mineral wool production technology	13
1.2. Factors determining the strength properties of mineral wool products during installation and operation time.....	14

1.2.1. Climatic factors.....	15
1.2.2. Impact of loads.....	20
1.3. Technological factors determining the fibre arrangement in the structure of mineral wool products	24
1.3.1. Directional fibre orientation in the structure	25
1.3.2. Chaotic fibre orientation in the structure	28
1.3.3. Fibre orientation in layers	29
1.4. Features of the structure of mineral wool	31
1.4.1. Research of microstructure and macrostructure	31
1.4.2. Identification of the parameters of the macrostructure	33
1.5. Summarisation of the bibliography overview	36
 2. RESEARCH METHODOLOGY AND MATERIALS	39
2.1. Apparatus, test procedure and proceeding	39
2.1.1. Preparation of test specimens and dimensions	39
2.1.2. Determination of density	40
2.1.3. Determination of compression stress and/or compression strength	40
2.1.4. Determination of point load	43
2.1.5. Climatic tests – at high temperature and humidity	44
2.1.6. Impact of dynamic fatigue	45
2.1.7. Measurements of climatic factors in real conditions	47
2.1.8. Determination of organic material content (ignition loss)	48
2.1.9. Surface scanning and image analyze	49
2.1.10. Statistical evaluation of experimental results	52
2.2. Test specimens and their characteristics	54
2.3. Conclusions for Chapter 2	57
 3. DETERMINATION OF THE DOMINATING FIBRE ORIENTATION IN MINERAL WOOL PRODUCTS WITH DIFFERENT STRUCTURES.....	59
3.1. Determination of macrostructure parameters.....	60
3.1.1. Classification of mineral wool products by structure	73
3.2. Determination of the dependence of the compressive strength on the macrostructure parameters.....	76
3.3. Dependence of compressive strength of mineral wool slabs on the direction of the load working.....	82
3.4. Conclusions for Chapter 3	86
 4. INVESTIGATION OF COMPRESSIVE PARAMETERS AND DEFORMATION PROPERTIES OF MINERAL WOOL PRODUCTS WITH DIFFERENT STRUCTURE	89
4.1. Investigation of compressive parameters of mineral wool products with homogeneous and heterogeneous structures	90
4.1.1. Determination of compression stress at 10% deformation in products with homogeneous and heterogeneous structures.....	90

4.1.2. Determination of point load in products with homogeneous and heterogeneous structures.....	94
4.2. Impact of thickness of layers on compressive parameters of dual density mineral wool slabs	99
4.2.1. Determination of impact of thickness of top layer on compression stress and point load.....	100
4.2.2. Determination of impact of bottom layer on compression stress and point load.....	103
4.3. Impact of separate layers on compressive parameters of dual density mineral wool slabs with heterogeneous structure	109
4.3.1. Determination of compression stress at 10% deformation of separate layers.....	109
4.3.2. Determination of point load of separate layers.....	115
4.4. Comparison of compressive strength and point load of mineral wool products with different structure	120
4.5. Conclusions for Chapter 4.....	126
5. MINERAL WOOL PRODUCTS RESISTANCE TO CLIMATIC FACTORS AND DYNAMIC LOAD.....	129
5.1. Effect of temperature and humidity on compression stress value of mineral wool slabs.....	130
5.1.1. Changes of compression stress of mineral wool slabs due temperature and humidity in laboratory conditions	130
5.1.2. Determination of climatic factors in real conditions of use.....	136
5.1.3. Determination of compression stress of mineral wool slabs used in experiments in real conditions.....	139
5.2. Effect of dynamic load on value of point load of mineral wool slabs	143
5.2.1. Changes of point load of mineral wool slabs due to dynamic loading....	143
5.2.2. Determination of point load of mineral wool slabs used in experiments in real conditions.....	151
5.3. Conclusions for Chapter 5	155
6. DISCUSSION OF RESULTS	157
GENERAL CONCLUSSIONS	163
REFERENCES	167
LIST OF THE AUTHOR'S SCIENTIFIC PUBLICATIONS ON THE TOPIC OF DISSERTATION	185
ANNEXES.....	187
Annex A. Geographical location of mineral wool manufacturers in Europe (2008 data) and prospective investments into production places.....	188
Annex B. A technological scheme of the production of stone wool products	189

Išvadas

Tiriamoji problema

Pagrindiniai šiuo metu naudojami energiniai ištekliai – tai gamtiniai ištekliai, kurie yra riboti, o jų gavyba nuolat brangsta. Besaikio energijos naudojimo mastas trikdo globalinę ekologinę pusiausvyrą. Apie 40 % šiluminės energijos sunaudojama pastatams šildyti, nes anksčiau, statant gyvenamuosius namus ir kitos paskirties pastatus, apie kuro ir energijos taupymą dėl labai žemos jų kainos galvojama buvo mažai, tad tie pastatai visai nebuvo šiltinti arba šiltinti menkai. Energijos taupymui ir jos vartojimo efektyvumui didinti imta peržiūrinėti pastatų ir statinių statybos bei eksploatavimo norminius dokumentus, siekiant pagerinti termoizoliacines pastatų atitvarų savybes, didinant efektyvių termoizoliacinių medžiagų naudojimo apimtis mažinant energijos sąnaudas.

Vienos iš efektyviausių termoizoliacinių medžiagų yra mineralinės vatos gaminiai, kurie plačiai naudojami pastatų ir statinių atitvarinėse konstrukcijose dėl mažo šilumos laidumo, gerų priešgaisrinių ir garso izoliacinių savybių, gausios žaliavų bazės, plataus dirbinių taikymo masto ir kt.

Pastaraisiais metais plačiai tirtos šiluminės ir kai kurios kitos mineralinės vatos gaminių savybės. Tačiau energinis pastato naudingumas yra susijęs ne tik su termoizoliacinėmis naudojamų medžiagų savybėmis. Nereikia pamiršti ir kitų

mineralinės vatos gaminių savybių, pavyzdžiui, stiprumo. Stiprumo ir deformacinės savybės bei jų dydžiai itin svarbūs atitvarinėms konstrukcijoms (pavyzdžiui, plokštiesiems stogams), kur mineralinė vata tiesiogiai ir nuolatos yra veikiamą įvairių poveikių: klimatinį veiksnių ir eksploatacinių apkrovų.

Siekiama, kad eksploatuojant pastatą termoizoliacinės medžiagos išlaikytų savo efektyvumą, bet mažai tiriamos savybės ir jų pokyčiai dėl senėjimo ir mechaninių poveikių. Pagrindinės (šiluminės ir mechaninės) mineralinės vatos gaminių savybės dažnai siejamos su tankiu, tačiau plaušų išsidėstymo struktūroje identifikavimas ir valdymas gali būti esminis parametras, naudojamas kuriant naujus ar optimizuojant esamus termoizoliacinius gaminius, skirtus konkrečioms tikslams.

Taigi energinės pastato sąnaudos yra vienas svarbiausių veiksnių, lemiančių ne tik pastato architektūrinį ir erdvinį sprendimus bei patalpų mikroklimatą, bet ir pastato statybos bei priežiūros sąnaudų dydį. Naudotinos medžiagos turi būti parinktos pagal jų efektyvumą, ilgaamžiškumą bei ekologiškumą įvertinant ekonominį naudingumą.

Taigi būtina kompleksiskai įvertinti visas savybes ir poveikius. Nes tai leis parinkti tinkamiausią pastato ir jo dalių konstrukcinį sprendimą, leidžiantį sumažinti šilumos nuostolius ir kartu užtikrinti mechaninį patvarumą bei viso pastato ilgaamžiškumą realiomis eksploataavimo sąlygomis.

Darbo aktualumas

Nemažai mokslinių darbų mineralinės vatos tyrimų srityje buvo atlikta praėjusio šimtmečio aštuntajame–devintajame dešimtmečiuose. Daug dėmesio buvo skirta tinkamam žaliavų parinkimui, gamybos procesų tobulinimui, plaušų ir dirbinių ilgaamžiškumui nustatyti. Tačiau dėl technologijos pažangos keičiasi mineralinės vatos gamybos procesai, o kartu ir produkcija. Mineralinės vatos struktūros valdymas (galimybė keisti plaušų išsidėstymo kryptį) ir atskirų sluoksnių suformavimas iš esmės pakeitė standžių mineralinės vatos gaminių šilumines, stiprumo, deformacines ir eksploatacines savybes.

Šiuo metu gaminamų mineralinės vatos gaminių savybės labai pasikeitė: ypač daug tankis ir stiprumo parametrai, o šilumos laidumas mažiau. Pavyzdžiui, prieš 20 metų gamintų mineralinės vatos plokščių tankis buvo 200–600 kg/m³, esant 60–100 kPa gniuždymo įtempiui, o dabar tokio dydžio įtempis išmatuojamas 90–200 kg/m³ tankio gaminių (priklausomai nuo plaušų orientacijos). Todėl tikslinga gniuždymo rodiklius – gniuždymo stiprį ir sutelktosios apkrovos poveikį – susieti su tankiu ir plaušų orientacija struktūroje kaip lemiančius daugumą medžiagos savybių.

Atitvarose naudojamas termoizoliacinės medžiagos nuolat veikia klimatiniai veiksniai ir įvairios apkrovos. Kaip rodo praktika, dažnai dėl informacijos ir (arba) tyrimų trūkumo mineralinės vatos gaminiai (ypač plokščiųjų stogų konstrukcijose) įrengiami ir eksploatuojami netinkamai. Todėl padidėja šilumos nuostoliai, o atitvaroms daromas neigiamas ardomas poveikis. Iki šiol trūksta duomenų apie mineralinės vatos gaminių gniuždymo savybių pokyčius, naudojimo metu sukeltus eksploatacinių veiksmų.

Be to, iš esmės pasikeitė bandymų standartai arba atsirado visiškai naujų medžiagos savybių nustatymo metodų. Vienas iš tokių – sutelktosios apkrovos nustatymas, kuris visiškai netirtas, nes literatūros šaltiniuose nerandama duomenų apie tyrimus ir sąsajas su kitais medžiagos parametrais. Taigi dėl pasikeitusių medžiagų, bandymo metodų ir statybos procesų šiandien negalima tiesiogiai remtis anksčiau gautais rezultatais bei išvadomis.

Tyrimų objektas

Darbo tyrimų objektas – įvairių atitvarinių konstrukcijų termoizoliaciniams sluoksniams naudojami standūs mineralinės vatos gaminiai ir jų gniuždymo rodiklių (gniuždymo įtempio ir sutelktosios apkrovos) sąryšis su fiziniais ir struktūriniais parametrais normaliomis bei eksploatacinėmis sąlygomis. Tiriant naudoti skirtingos (homogeniškos ir heterogeniškos) struktūros ir plaušų orientacijos, 45–220 kg/m³ tankio, 30–200 mm storio ir 2,2–4,2 % kiekio organinių rišamųjų medžiagų bandiniai.

Darbo tikslas

Pagrindinis šio darbo tikslas – sukurti tikslesnį mineralinės vatos makrostruktūros identifikavimo pagal plaušų išsidėstymo kryptingumą metodą, nustatyti ir prognozuoti gniuždymo stiprį naudojantis makrostruktūros rodikliais bei kitais parametrais. Eksperimentiniu būdu ištirti skirtingos struktūros mineralinės vatos gaminių gniuždymų rodiklius laboratorinėmis ir realiomis eksploatacinėmis sąlygomis.

Darbo uždaviniai

Darbo tikslui pasiekti darbe reikia spręsti šiuos uždavinius:

1. Kiekybiškai identifikuoti plaušų orientacijos kryptingumą mineralinės vatos gaminių struktūroje pasitelkus makrostruktūros rodiklius.
2. Nustatyti mineralinės vatos gaminių gniuždymo įtempio priklausomybę nuo makrostruktūros rodiklių ir pagrindinių fizinių (tankio, storio, organinių medžiagų kiekio) parametrų.
3. Ištirti šiuo metu gaminamų homogeniškos ir heterogeniškos struktūros mineralinės vatos gaminių gniuždymo rodiklius (gniuždymo įtempį, esant 10 % deformacijai, ir sutelktąją apkrovą, esant 5 mm deformacijai).
4. Nustatyti atskirų sluoksnių įtaką sluoksniuotos struktūros dviejų tankių mineralinės vatos gaminių gniuždymo rodikliams bei deformacinėms savybėms.
5. Išnagrinėti mineralinės vatos plokščių gniuždymo įtempio, esant 10 % deformacijai ir sutelktosios apkrovos, esant 5 mm deformacijai, pokyčius dėl klimatinų veiksnių ir dinaminių apkrovų poveikio tiriant modeliuotomis laboratorinėmis ir eksploatacinėmis sąlygomis.

Tyrimų metodika

Darbe taikomi standartiniai ir nestandartiniai fizinių bei mechaninių savybių tyrimų metodai. Savybės nustatytos pagal galiojančius Lietuvos perimtus Europos normų ir Tarptautinių standartų reikalavimus. Nestandartinių bandymų metu stengtasi taikyti ES šalių metodinius ir (arba) normatyvinius dokumentus. Kai kuriems bandymams atlikti naudota specialios konstrukcijos įranga.

Darbo mokslinis naujumas ir jo reikšmė

Rengiant disertaciją buvo gauti šie statybos inžinerijos mokslui nauji rezultatai:

1. Sukurta tikslesnė mineralinės vatos gaminių makrostruktūros nustatymo pagal plaušų orientaciją metodika, kuri leidžia pagal struktūroje dominuojančių plaušų kryptingumą apskaičiuoti makrostruktūros rodiklius. Remiantis teoriniais poringųjų kūnų, erdviųjų kompozitų struktūros pagrindais, patentiniais technologiniais aprašymais ir nustatytais makrostruktūros rodikliais sudaryta mineralinės vatos gaminių klasifikacija pagal struktūrą, lengvinanti adekvatų skirtingos struktūros gaminių eksploatacinio tvarumo įvertinimą.

2. Sukurtas mineralinės vatos plokščių gniuždymo ribinio įtempio prognozavimo metodas pagal gaminių tankį, organinių medžiagų kiekį jose ir makrostruktūros rodiklį.
3. Eksperimentiškai nustatyti homogeniškos ir heterogeniškos struktūros mineralinės vatos plokščių gniuždymo rodikliai (gniuždymo įtempis ir sutelktoji apkrova), leidžiantys įvertinti matematiškai aprašomą jų sąsają charakteringais parametrais (viso ir atskirų sluoksnių tankiu, storiu, organinių medžiagų kiekiu). Pagal sudarytas lygtis galima prognozuoti homogeniškos ir heterogeniškos struktūros mineralinės vatos plokščių gniuždymo rodiklius.
4. Atlikti išsamūs skirtingos struktūros mineralinės vatos gaminių sutelktosios apkrovos poveikio tyrimai bei nustatyti jos dydį lemiantys veiksniai.
5. Atliekant natūrinius bandymus plokščiųjų stogų konstrukcijoje naudotos mineralinės vatos plokštės atsparios klimatinių veiksnių ir dinaminių apkrovų poveikiui. Tačiau laboratorinių bandymų metu sudaromų poveikių dydis neadekvatus realiomis eksploatacijos sąlygomis veikiančioms dydžiams, todėl metodika turi būti tikslinama, prieš tai atlikus kompleksinius lyginamuosius eksperimentus laboratorinėmis ir natūrinėmis sąlygomis.

Darbo rezultatų praktinė reikšmė

Tyrimų rezultatai gali būti pritaikyti:

1. Mineralinės vatos gaminių technologijoje. Galimas sukurti makrostruktūros nustatymo metodo taikymas gamyboje leistų kontroliuoti konvejeriniu būdu gaminamo pluošto klogo vienalytiškumą, operatyviai reguliuoti plaušų išsidėstymo kryptingumą, taip užtikrinant pastovią pagamintų produktų kokybę. Be to, darbe pasiūlytas metodas ir nustatytos parametrų priklausomybės gali būti naudojamos neardomajai gaminių stiprumo savybių (kokybės) kontrolei.

2. Naujiems gaminiams iš mineralinės vatos projektuoti. Pasiūlytas ir pagrįstas sprendimas, kaip, nemažinant gniuždymo įtempio ir sutelktosios apkrovos rodiklių, optimizuoti heterogeniškų (dvisluoksnių) mineralinės vatos plokščių struktūrą. Iki 10 mm storio sumažinus viršutinio (didesnio tankio) sluoksnio storį, galima gaminti tokius pačius gniuždymo rodiklius (gniuždymo įtempio ir sutelktosios apkrovos) turinčias plokštes kaip ir su 15 mm sluoksnio viršutinio sluoksnio storio. Dėl to sumažėja žaliavų ($1,7\text{--}6,6\text{ kg/m}^3$) ir energinės sąnaudos, padidėja gamybinės linijos našumas, mažėja atitvarinių konstrukcijų masė.

3. Atitvarinėms konstrukcijoms projektuoti ir (arba) eksploatuoti. Nustatyta mineralinės vatos gaminių svarbiausių savybių pokyčių priklausomybė nuo būdingųjų eksploatacinių veiksnių, pasiūlyti šių termoizoliacinio sluoksnio savybių ilgalaikių pokyčių prognozavimo modeliai.

Ginamieji teiginiai

1. Sukurtas metodas, leidžiantis nustatyti mineralinės vatos plaušų kryptingumą gaminių struktūroje ir dvigubai tiksliau prognozuoti gaminių gniuždymo ribinį įtempį pagal tankį, organinių medžiagų kiekį ir makrostruktūros rodiklį.
2. Plaušų išsidėstymo kryptis ir skirtingo tankio sluoksnių naudojimas struktūroje lemia homogeniškos ir heterogeniškos struktūros mineralinės vatos gaminių gniuždymo įtempio, esant 10 % deformacijai, ir sutelktosios apkrovos, esant 5 mm deformacijai, dydžius.
3. Mineralinės vatos plokščių atsparumas klimatinių veiksnių poveikiui gali būti nusakomas gniuždymo įtempio atsparumo senėjimui $\sigma_{10}(AR)$, o dinaminių apkrovų – sutelktosios apkrovos dinaminio atsparumo $\sigma_{PL}(DR)$ rodikliais. Laboratorinių modeliuotų bandymų metu nustatytų poveikių dydžiai neatitinka jų dydžių realios eksploatacijos sąlygomis, nes natūrinių eksperimentų metu nustatyti silpnesni veiksniai nei naudojami laboratorinėmis sąlygomis.

Darbo rezultatų apibavimas

Disertacijos tema išspausdinti 8 moksliniai straipsniai: du – mokslo žurnaluose, įtrauktuose į *Thomson ISI Web of Science* sąrašą (Buska, Mačiulaitis 2007b; Buska, Lybye, Mačiulaitis 2008), vienas – recenzuojamame mokslo žurnale, įtraukta į LMT patvirtintą duomenų bazių sąrašą (Buska, Mačiulaitis 2007a); vienas – recenzuojamame tarptautinės konferencijos straipsnių rinkinyje (Paukštys, Šeduikytė, Buska 2007), keturi – kitose respublikinių konferencijų straipsnių rinkiniuose (Buska 2005; Buska, Gailius 2005; Buska 2006; Buska 2007).

Disertacijoje atliktų tyrimų rezultatai buvo paskelbti septyniose mokslinėse konferencijose:

- Jaunųjų mokslininkų konferencijoje „Lietuva be mokslo – Lietuva be ateities“ 2005 m. Vilniuje;
- Respublikinėje konferencijoje „Pažangioji statyba“ 2005 m. Kaune;

- Jaunųjų mokslininkų konferencijose „Mokslas – Lietuvos ateitis“ 2006–2007 m. Vilniuje;
- Tarptautinėje konferencijoje „Modern Building Materials, Structures and Techniques“ 2007 m. Vilniuje;
- Respublikinėje konferencijoje „Medžiagų inžinerija“ 2007 m. Kaune;
- Tarptautinėje konferencijoje „Medžiagų inžinerija“ 2008 m. Kaune.

Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro įvadas, penki skyriai, rezultatų aptarimas, bendrosios išvados bei literatūros ir šaltinių sąrašas. Yra du priedai.

Darbo apimtis – 202 puslapiai, neskaitant priedų, tekste yra 13 numeruotų formulių, 81 paveikslas ir 45 lentelės. Rašant disertaciją buvo naudotasi 233 literatūros šaltiniais.

Mineralinės vatos struktūros ir stiprumo savybių tyrimų apžvalga

1.1. Mineralinių pluoštinių medžiagų klasifikacija, gamybos raida ir poreikis

Mineraliniu pluoštu reikėtų vadinti kiekvieną stikliškos būsenos dirbtinį pluoštą. Šio pluošto gamyba pagrįsta silikatinio lydalo geba išsitempti plonais plaušais. Paprastai jie būna lygaus paviršiaus, stiprūs ir nedegūs. Pluoštinės izoliacinės medžiagos ir gaminiai yra itin akytos struktūros, nes jų karkasą sudaro mineraliniu ar organiniu rišikliu sutvirtinti ir supinti įvairaus nevienodo ilgio bei orientacijos plaušai (Balandis *et al.* 1995). Toks pluoštas vadinamas vata (1.1 pav.).

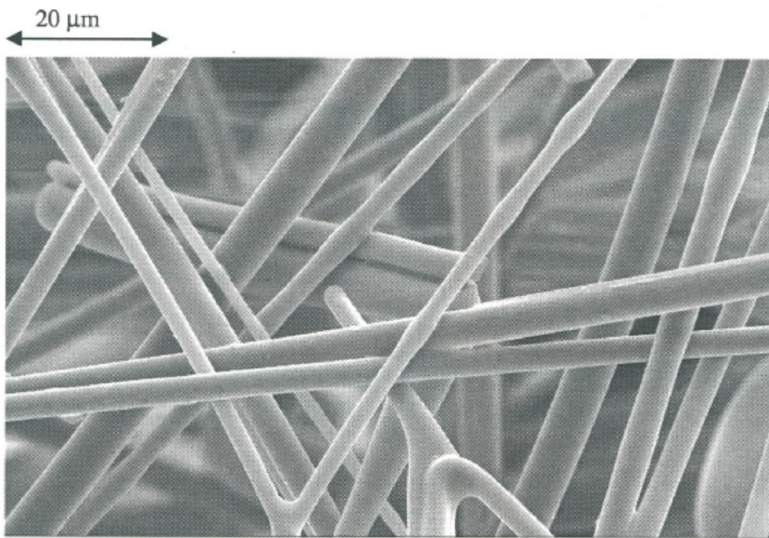
1.1.1. Mineralinių pluoštinių medžiagų klasifikavimas

Neorganiniai plaušai savo chemine sudėtimi tapatūs stiklui, todėl dažniausiai priskiriami stiklo pramonės šakai. Pluoštai klasifikuojami pagal įvairius požymius.

Pasaulio sveikatos organizacija (World Health Organization 1998) pluoštus suklasifikavo pagal jų gamybos procesą ir matmenis į 4 grupes: nepertraukiamo plaušo gijos; izoliacinė vata; ugniai atsparūs pluoštai

ir specialios paskirties pluoštai. Tačiau dažnas skirstymas ir pagal pluošto gamybai naudojamas žaliavas. Tad išskiriamos šios pagrindinės grupės (Bastarache 2005):

1. Stiklo pluoštas:
 - 1.1. Stiklo vata.
 - 1.2. Ištisinis pluoštas.
2. Mineralinė vata:
 - 2.1. Akmens vata.
 - 2.2. Šlako vata.
3. Ugniai atsparūs keraminiai pluoštai:
 - 3.1. Oksidiniai.
 - 3.2. Kaolinitiniai.



1.1 pav. Mineralinės vatos plaušai (Dyrbøl 1998)

Fig. 1.1. A mineral wool fibre (Dyrbøl 1998)

Kadangi visų neorganinių pluoštinių gaminių principinė gamybos technologija, struktūra bei naudojimo sritis yra panaši, priimtas ir bendrinis termoizoliacijai naudojamų šių medžiagų pavadinamas mineralinė vata. Tai izoliacinė velta pluošto medžiaga, pagaminta iš lydytos uolienos, šlako arba stiklo (Вайчюнас *et al.* 1987; Širok *et al.* 2008; LST EN 13162:2009). Tačiau bendrinio pavadinimo mineralinė vata vartojimas yra sutartinis ir neretai klaidina vartotoją, nes gaminiai skiriasi savo techninėmis ir eksploatacinėmis charakteristikomis (Потапов *et al.* 2008).

1.1.2. Gamybos raida ir poreikis

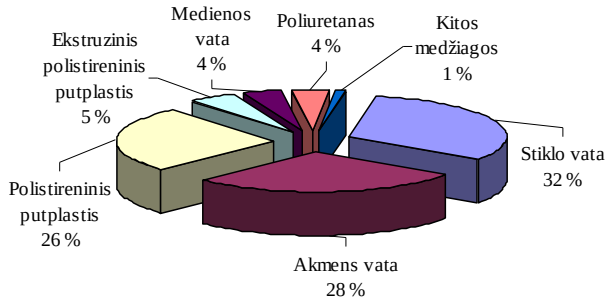
Pirmą kartą mineralinis plaušas buvo gautas apie 1840 m. Velse (Jungtinė Karalystė) (Spon *et al.* 1889; Mohr, Rowe 1978). Jau 1870 m. jis buvo užpatentuotas ir pramoniniu būdu pradėtas gaminti Jungtinėse Amerikos Valstijose, nuo 1880 m. – Vokietijoje (Integrated Pollution... 2008). Vėliau jį gaminti pradėta ir kitose šalyse: Austrijoje, Švedijoje ir t. t. 1901 m. pirmoji mineralinė vata pagaminta ir Rusijoje. Mineralinių pluoštinių medžiagų gamyba TSRS stipriai pradėjo plėstis praėjusio šimtmečio 4-ajame dešimtmetyje (palyginimui – 1929 m. veikė aštuonios gamyklos, o 1937 m. jų buvo jau šešiasdešimt). 1937–1938 m. pradėta akmens vatos, turinčios *Rockwool* prekės ženklą (Bak 2003), gamyba Skandinavijos šalyse (Danijoje, Švedijoje ir Norvegijoje). Po Antrojo pasaulinio karo visoje Europoje smarkiai išaugo statybų mastai, todėl ir mineralinio plaušo gamyba padidėjo kelis kartus, palyginti su ankstesniais metais (pavyzdžiui, vien tik TSRS nuo 1959 m. iki 1967 m. buvo pastatytos ir pradėjo veikti 42 naujos gamyklos) (Бобров 1987a; Kurbskij *et al.* 2002). Nuo 1959 m. mineralinės vatos gamyba pradėta ir Vilniaus silikatinių dirbinių kombinate, o 1979 m. pabaigoje pradėjo veikti ir mineralinio plaušo gamybos cechą Alytaus eksperimentiniame skydinių namų statybos kombinate (Strazdas, Eidukevičius 1985).

Pastaraisiais dešimtmečiais sparčiai auga efektyvių termoizoliacinių medžiagų poreikis, nes pasaulio mastu pradėta aktyviai rūpintis atmosferos taršos mažinimu, energetinių išteklių tausojimu, todėl pastatų ir statinių atitvaroms šiltinti skiriama daug dėmesio. Beveik 75–80 % visos pagaminamos termoizoliacijos sunaudojama statybinėse konstrukcijose (Papadopoulos *et al.* 2005).

2006 m. duomenimis (Тенденции на мировом... 2009), pasaulio termoizoliacinių medžiagų ir gaminių rinka sudarė 16,4 mlrd. kv. m. Termoizoliacinių medžiagų pasiskirstymas pagal rūšis yra toks: mineralinė vata, pagaminta iš įvairių žaliavų (stiklo, akmens bei šlako), sudaro apytiksliai 60 % visų pasaulyje parduodamų termoizoliacinių medžiagų; polimerinės medžiagos: putplasčiai (EPS/XPS) ir poliuretanai (PIR/PUR) – sudaro apie 30 % ir 10 % įvairios kitos (pavyzdžiui, putstiklis, medienos vata ir plaušas, pūstasis perlitas, aktyšasis kamštis) medžiagos.

Iki šiol daugiausia šilumą izoliuojančių medžiagų (apie 40 % visos pasaulinės termoizoliacinių medžiagų rinkos) buvo sunaudojama Šiaurės Amerikos šalyse: Kanadoje ir JAV. Šių šalių rinkose dominuoja (apie 62 % viso šilumą izoliuojančių medžiagų kiekio) mineralinės vatos produkcija. Termoizoliacinių medžiagų rinka Europos šalyse sudaro apie 3,4 mlrd. kv. m.

Jau daug metų Europoje dominuoja mineralinės vatos gaminiai (Papadopoulos *et al.* 2002; Karamanos *et al.* 2007), sudarydami 60 % visos rinkos apimtį (1.2 pav.).



1.2 pav. Termoizoliacinių medžiagų realizacija Europoje
(2000 m. duomenys)

Fig. 1.2. Sales of thermal insulation materials in Europe (2000 data)

Mancino (2008a) teikiamais duomenimis, mineralinės vatos gaminių dalis Europos rinkoje siekė 56–61 %. Kadangi mineralinės vatos gamybai reikia ilgalaikių investicijų, didelių finansinių išteklių bei gerų techninių įgūdžių, Europos Sąjungos rinkoje dominuoja (Huet, Godet 2008) keli pagrindiniai gamintojai (A priedas).

2006 m. duomenimis (Integrated Pollution... 2008), iš viso Europoje pagaminama apie 3,6 mln. t mineralinės vatos gaminių per metus. Europos Sąjungos politika (Directive 2002/91/EC 2003) numato didinti pastatų energetinį efektyvumą ir mažinti oro taršą, todėl efektyvių ir termoizoliacinių medžiagų bei inovatyvių sprendimų poreikis nuolat didėja.

Baltijos valstybių termoizoliacijos medžiagų rinkoje dominuoja mineralinės vatos, užimančios maždaug 68 % bendros Baltijos valstybių rinkos, arba 1,9 mln. kub. m (2004 metų duomenys). Polistireninio putplasčio rinkos dalis siekė apie 30,6 %. Bendra Baltijos valstybių šiluminės izoliacijos rinkos apimtis 2004 m. sudarė 2,8 mln. kub. m (Baltijos šalių... 2009).

Skaiciuojama, kad Rusijai tenka 4 %, arba 1,5 mlrd. JAV dolerių viso pasaulio termoizoliacinių medžiagų rinkos. 2008 m. duomenimis, Rusijos Federacijos rinka sudarė 28,5 mln. kub. m termoizoliacinių medžiagų (iš jų 19,6–20,4 mln. kub. m pagaminta vietos gamintojų) (Российский рынок... 2009). 2006 m. Rusijoje veikė 69 mineralinės vatos gamyklos ir cechai (bendras technologinių linijų skaičius – 122) (Миронов, Тарасевич 2005). Viena pagrindinių termoizoliacinių medžiagų Rusijoje yra mineralinė vata. Ovčarenko (Овчаренко 2003) manymu, termoizoliacinių medžiagų rinkoje mineralinės vatos gaminiai užima didžiausią rinkos dalį apie 65–75 %. Iš jų stiklo vatos dalis sudaro ~30 %, akmens vatos gaminių ~40 %. Prognozuojama (Гликин 2006), kad artimiausiais metais šių medžiagų poreikis Rusijoje dar

išaugs ir 2010 m. gali siekti iki 50–55 mln. kub. m per metus, iš jų apie 85 % bus skirta vien tik pastatų ir statinių termoizoliacijai (Чепулис, Шойхет 2006).

Manoma (Freedonia Group 2009), kad 2012 m. pasauliniu mastu visų rūšių izoliacinių medžiagų poreikis dar išaugės iki maždaug 21,5 mlrd. kv. m (perskaičiavus $R = 1 \text{ m}^2\text{K/W}$ dydžiui) ir sieks iki 37 mlrd. JAV dolerių. Didžioji termoizoliacinių medžiagų pasaulinės rinkos dalis teks besivystančių Azijos šalių (o ypač Kinijos) rinkoms. Mancino (2008b) duomenimis, Kinijoje veikia daugiau kaip 200 gamyklų, gaminančių stiklo ir akmens vatos produkciją, kurių metinė gamybos apimtis siekia 1,7 mln. t (Lihe 2007). Prognozuojama (Freedonia Group 2009), kad net 41 % viso pasaulinio izoliacinių medžiagų poreikio 2007–2012 m. gali tekti Kinijai. Dėl to gali pasikeisti ir pasaulinis termoizoliacinių medžiagų balansas, kuriame dominuos polimerinės medžiagos ~49 %, o antroje vietoje neorganinės pluoštinės medžiagos ~47 %.

1.1.3. Mineralinės vatos gamybos technologijos pagrindai

Mineralinės vatos plaušo ir gaminių iš jo gamybą sudaro nuosekliai vienas po kito vykstantys technologiniai procesai. Dauguma dirbinių yra gaminami konvejerine (dažnai vadinama tradicine) technologija (Спирин 1975), kurią, nepriklausomai nuo lydymo krosnies bei plaušo formavimo įrenginio, sudaro šie technologiniai etapai: 1) dozuotos įkrovos subėrimas ir lydalo susidarymas; 2) plaušinimas ir organinių priedų įterpimas; 3) plaušų nusodinimas ir pluošto klodo formavimas; 4) terminis apdorojimas ir pjaustymas (Ohberg 1987).

Mineralinė vata gaunama iš lydalo (jis vadinamas silikatinium, nes jame gausu SiO_2), kuris susidaro aukštoje (apie +1500 °C) temperatūroje išlydžius žaliavinių medžiagų įkrovą. Lydalui gauti naudojami įvairaus tipo lydymo įrenginiai – krosnys. Lydymo krosnies pasirinkimas priklauso nuo naudojamų žaliavų granulometrinės sudėties, jų lydumo bei energinių išteklių (kuro) rūšies. Dažniausiai smulkioms žaliavoms lydyti naudojamos voninio (Mohr, Rowe 1978), o gabalinėms – šachtinio (Leth-Miller 2002) tipo lydkrosnės, kurios kūrenamos gamtinėmis dujomis, koku, skystuoju arba kombinuotu (keletu iš šių rūšių) kuru (Горяйнов, Горяйнова 1982; Strazdas, Eidukevičius 1985). Žaliavos lydomos ir plazminiu elektros lanku (Буянтуев, Баянсайхан 2007; Skripnikova *et al.* 2008). Pasaulyje yra daug būdų, kaip iš silikatinio lydalo suformuoti plaušą. Plaušai susidaro lydalo mikrosrovelėms ir lašeliams ištįstant. Kai kurių autorių (Артемьев 2005; Федорова 2005; Novitskii, Efrenov 2006) teigimu, dažniausiai plaušai gaunami šiais būdais: 1) pučiamuoju – kai plaušai susiformuoja ištekanči lydalą veikiant dujų srautu; 2) mechaniniu – kai plaušai susidaro veikiant išcentrinėms jėgoms; 3) kombinuotu – kai plaušams formuoti naudojamas tiek išcentrinų jėgų poveikis, tiek ir garo, dujų ar oro srautas. Susidarantys plaušai apipurškiami rišamųjų ir hidrofobizuojamųjų medžiagų

mišiniu bei nukreipiami į nusodintuvą. Iš surinktų plaušų formuojamas pirminis pluošto klodas, kuris toliau transporteriais nuosekliai perkeliamas į technologiškai būtinus gaminių formavimo įrenginius. Nesukietintas mineralinis pluoštas suspaudžiamas (sutankinamas) apdorojant mechaninės apkrovos įrenginiais, atliekančiais tam tikrą operaciją (presavimo, perorientavimo, fiksavimo) suformuojant antrinį pluošto kloadą (priklausomai nuo gaminamo gaminio charakteristikų). Šį kloadą termiškai apdorojus $+(240-280) ^\circ\text{C}$ temperatūroje gaunamas reikiamo tankio ir storio nepertraukiamų matmenų mineralinis pluoštas. Sukietėjęs ir ataušęs pluošto klodas mechaniškai pjaustomas (išilgai ir skersai) bei pakuojamas (Strazdas 1998; Širop *et al.* 2008).

Akmens vatos gaminiai dažniausiai gaminami šachtinėse lydkrosnėse, o plaušai formuojami išcentrinio būdu daugiavolėmis centrifugomis (Ohe 2003). Technologinė akmens vatos gaminių gamybos schema (Eurima 2009) pateikta B priede.

1.2. Veiksniai, darantys įtaką mineralinės vatos gaminių stiprumo savybėms šiltinimo ir eksploatacijos metu

Pastato ir jo atitvarinės konstrukcijos turi būti patikimos bei ekonomiškos. Konstrukcijų patikimumas priklauso nuo naudotų medžiagų savybių bei įvairių eksploatacinių veiksnių derinio, o ekonomiškumas – nuo medžiagų kainos ir naudojimo laikotarpio. Atitvarinėje konstrukcijoje sumontuotų gaminių stiprumo savybių pastovumas eksploatacijos metu priklauso nuo klimatinės veiksnų ir naudojimo intensyvumo (Purnell 2004).

Taigi pagal poveikio tipą (Vrček *et al.* 2009) eksploatacinius veiksnius galima suskirstyti į dvi pagrindines grupes: klimatinės (aplinkos) (Бобров 1987a; Bomberg, Brown 1993; Татаринцева *et al.* 2004) ir mechaninių apkrovų (vėjas, sniegas, vaikščiojimas montavimo ir eksploatacijos metu) (Wallace 1982; Paukštys, Stankevičius 2001; STR 2.05.04:2003 2003) poveikiai. Didžiausias šių veiksnių poveikis pasireiškia konstrukcijose, kurios tiesiogiai ribojasi su išore (sudėtinės tinkuojamų fasadų sistemos – ETICS ir plokštieji stogai).

Lietuvoje plačiai tirtas pastatų sienų šiltinimo sluoksnių ir jų dengiamųjų paviršių ilgaamžiškumas bei atsparumas klimato poveikiams (Ramanauskas, Stankevičius 2000; Miniotaitė, Stankevičius 2001). Tačiau šiuo atveju aktualios plokščiųjų stogų atitvaros (STR 2.05.02:2008 2009), apšiltintos mineralinės vatos plokštėmis ir ant kurių tiesiogiai suklota hidroizoliacinė ritininė stogo danga, todėl jos ir nagrinėjamos.

1.2.1. Klimatiniai veiksniai

Klimatiniams veiksniams priskiriami staigūs temperatūrų svyravimai, ilgai veikianti teigiama ar neigiama temperatūros, šviesa ir ultravioletinė spinduliuotė, nepastovi oro drėgmė bei kompleksinis šių veiksnių poveikis (Barkauskas, Stankevičius 2000). Įvairiuose literatūros šaltiniuose pateikiama labai skirtinga informacija apie šių veiksnių poveikio dydį atitvarinėse konstrukcijose realiomis naudojimo sąlygomis, priklausomai nuo konstrukcijos tipo ir tyrimo vietovės.

Čivaitės ir Samajausko (2004) publikacijoje rašoma, kad Lietuvoje karštą vasaros dieną stogas įkaista nuo $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ iki $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$. O per metus temperatūra stogo atitvaroje gali kisti nuo $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ iki $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Ilginis 1985). Voroninas (Воронин 2007) ir kiti pateikia informaciją, kad stogo (be apsauginio sluoksnio) paviršiaus temperatūra gali siekti $+83\text{ }^{\circ}\text{C}$ (kai oro temperatūra $+36\text{ }^{\circ}\text{C}$), o Palmer (2003) nurodo esant $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūrą tokiai pačiai konstrukcijai.

Drėgnis prie termoizoliacinio sluoksnio „šaltosios“ pusės konstrukcijoje šaltuoju metų periodu Lietuvos sąlygomis gali siekti iki 100 % (Endriukaitytė 2004). Nustatyta (Vrána, Björk 2009), kad šaldymo ir šildymo metu visu mineralinės vatos sluoksniu storiu $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūroje formuojasi aiškiai matomos kondensavusios ir užšalusios drėgmės zonos.

Natūrinių bandymų metu gautų rezultatų yra labai nedaug, o išmatuoti rezultatai skiriasi nuo aprašytųjų. Pavyzdžiui, išmatuoti (Wakili, Frank 2004) Ciuricho regiono 80–95 % drėgmės (per 20 mėn.) mokyklos stoge svyravimai sandūroje tarp stogo dangos ir termoizoliacinio sluoksnio iš mineralinės vatos. Künzel (2005) publikacijoje pateikti temperatūros ir drėgmės matavimai 24 valandų periodu stogo termoizoliacijoje: temperatūra kinta nuo -15 iki $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$, o santykinis oro drėgnis – nuo 10 iki 90 % (matavimai atlikti saulėtą žiemos dieną Vokietijoje).

Ištyrus mineralinės vatos bandinius, paimtus iš plokščiojo stogo Prahoje (Čekija), kuris penkis mėnesius (nuo gruodžio iki balandžio) nebuvo uždengtas hidroizoliacine danga, nustatyta 38,11 % (pagal masę) įdrėkimas (Vrána 2005). O natūrinių tyrimų metu (Noreng *et al.* 2005) atidengus 12 įvairios paskirties pastatų stogų Norvegijoje nustatyta, kad termoizoliacijos sudrėkimas siekia nuo 0,02 % iki 17,8 % (pagal tūrį). O po penkerių eksploatacijos metų patikrinus (Holme *et al.* 2008) tuos pačius stogus išmatuotas drėgmės kiekis sumažėjo ir siekė nuo 0 iki 1,24 % (išskyrus vieną atvejį, kai rasta 14,11 %). Taigi aiškiai matyti, kad dominuoja džiūvimo procesas. Teigiamo (Bludau *et al.* 2008), kad džiūvimui (ypač vasara) didelę reikšmę turi viršutinio stogo sluoksnio spalva. Kadangi esant tamsios spalvos dangai stoge susikaupusi drėgmė pasišalina žymiai greičiau nei tokioje konstrukcijoje, bet su šviesa stogo danga.

Apžvelgus mokslinę literatūrą apie klimatinį veiksnių įtaką mineralinės vatos ilgaamžiškumui, galima rasti daugybę tyrimų apie plaušų irimą, bet gerokai mažiau duomenų apie gaminių iš mineralinės vatos savybių pokyčius.

Plaušų irimą lemia temperatūros, drėgmės, vandens poveikiai ar buvimas rūgštinėje ar šarminėje aplinkose. Low (1984), Černý *et al.* (2007) teigia, kad plaušai gana atsparūs aukštos temperatūros poveikiui iki $+(550-750)^\circ\text{C}$, nors nuo $+400^\circ\text{C}$ temperatūros tempimo modulis mažėja, o nuo $+750^\circ\text{C}$ vyksta kristalizacija. Aukštoje temperatūroje plaušai netenka svorio ir traukiasi (Šiaučiuonas, Štuopys 1998).

Dubrovskis ir kiti autoriai (Дубровский *et al.* 2005) teigia, kad žemose temperatūrose ar esant šalčio ir šilumos pokyčiams jokių irimo požymių neužfiksuota (išskyrus hidrolizės procesus).

Daugiausia tyrimų atlikta nustatant plaušų atsparumą vandens ir drėgmės bei šarminės ar rūgštinės aplinkos poveikiams. Daug rezultatų ta tema pateikta A. Sadūno (1997) monografijoje, kurioje surinkti ir apibendrinti autoriaus 30 metų darbo tyrimai. Tačiau ir kiti mokslininkai (ypač iš Termoizoliacijos instituto Vilniuje) atliko daug šios srities tyrimų (Kerienė, Valužienė 1994; Kerienė 2002, 2005; Sezemanas *et al.* 2005; Low 1986; Пустоврап 2007; Lund, Yue 2008). Gauti rezultatai patvirtina neigiamą klimatinių veiksnių (ypač drėgmės ir vandens) įtaką plaušų savybėms ir struktūrai, nes atsiranda defektų ir įtrūkių plaušų paviršiuje, formuojasi naujadarai bei mažėja plaušų stiprumo savybės. Pastarųjų metų tyrimai (Kochetkova *et al.* 2009) rodo, kad, esant skirtingam veiksnių intensyvumo laipsniui, poveikis pasireiškia skirtingai, todėl svarbu parinkti sąlygas, kuomet labiau panašesnes į susidarančias eksploatacijos metu. Tačiau derėtų pabrėžti, kad beveik visi aprašytuose tyrimuose naudoti plaušai buvo gauti iš lydalų, turinčių žemą rūgštingumo modulį (M_R ne daugiau kaip 2), nustatytą pagal ГОСТ 4640-93 (1993). Tų pačių tyrimų metu gauti rezultatai rodo, o K. Strazdo (1998) publikacijoje teigiama, kad plaušai, kurių $M_R > 1,5$, yra aukščiausios kokybės ir ilgaamžiai.

Daugelis pasaulio ir Europos gamintojų mineralinės vatos gamybos procese naudoja gamtines žaliavas, iš kurių pagaminto lydalo (o vėliau ir plaušų) M_R modulis > 2 (Guldborg *et al.* 2002). Tačiau nuo anksčiau ir iki šiol Rusijoje (ir/arba buvusios TSRS respublikose) kai kurie gamintojai mineralinei vatai gaminti naudoja metalurginį šlaką. Ponomariovo (Пономарев 2006) teigimu, šiuo metu gaminama mineralinės vatos produkcija gali būti sąlygiškai skirstoma į: a) „kokybišką termoizoliaciją“ (pagamintą iš gamtinių uolienu); b) „ne tokią kokybišką“ (pagamintą iš šlako, pridėdant apie 10–20 % gablo ir bazalto uolienu). Todėl Rusijoje atlikta labai daug įvairių tyrimų tiriant ne tokią kokybišką produkciją, o Vakarų Europos šalyse tyrimų šioje srityje praktiškai nebuvo atliekama.

Mineralinės vatos gaminių ilgaamžiškumo ir savybių pokyčių dėl klimatinių veiksnių poveikio tyrimų rezultatai plačiai aprašomi J. Bobrovo (Бобров 1987a) monografijoje. Autorius pateikia rezultatus, gautus atlikus laboratorinius tyrimus klimatinėse kameros ir natūrinėse plokščiųjų stogų konstrukcijose (1.1 lentelė).

1.1 lentelė. Mineralinės vatos plokščių gniuždymo stiprio sumažėjimo laboratorinių ir natūrinių bandymų rezultatai (Бобров 1987a)

Table 1.1. Results of testing in the laboratory and real conditions of the decrease in compressive strength of mineral wool slabs (Бобров 1987a)

Tankis, kg/m ³	Rūgštumo modulis M_R	Rišamosios medžiagos tipas	Gniuždymo įtempis, esant 10 % santykinei deformacijai (prieš bandymą), kPa	Stiprumo sumažėjimas, %
Bandymai atlikti klimatinėje kameroje, kai temperatūra svyruoja ciklais nuo –25 °C iki +70 °C esant santykiniam oro drėgniui 98±2 %:				
245	1,1	B markės fenolalkoholis	120	8,35–27,6
220	1,07	D markės fenolalkoholis	120	6,65–23,4
230	1,25	Karbamidinė derva	100	14–63
225	1,23	Organinis-fosfatinis	110	16,4–56,5
200	1,16	SF-3047 N	100	11–31
210	1,19	SF-3047 N su modifikatoriumi	100	3–14
Bandymai atlikti 1971–1984 m. skirtinguose TSRS teritorijos miestuose:				
180–200	1,23	Karbamidinė derva	100–120	15–75
200–225	1,2		118–120	10–25
200–230	1,2	Organinis-fosfatinis	120–130	13–46
250–270	1,25	B markės fenolalkoholis	40–50	43–62
200–230	1,2		110–115	14–25
160–175	1,12	B markės fenolalkoholis (be neutral.)	93–95	8–90
200–225	1–1,12		56–63	19–74
200–220	2,1		34–36	57–65
200–220	1,23	V markės fenolalkoholis	66–73	9–40

Iš 1.1 lentelėje pateiktų rezultatų matyti žymus plokščių stiprumo sumažėjimas (siekiantis net iki 90 %). J. Bobrovo (Бобров 1987a) teigimu pokyčius lėmė M_R , rišamosios medžiagos tipas, pradinės bandinių stiprumo charakteristikos, bandymų trukmė: ciklų ar metų skaičius. Be to, autoriaus nuomone, eksploatacijos metu gniuždymo stipris sumažėja skirtingu greičiu ir dar priklauso nuo naudotų žaliavų, plaušų formavimo būdo, terminio apdorojimo, plokščių tankio ir gaminio struktūros.

Panašių rezultatų (Гнип, Кершулис 1999) gauta tiriant mineralinės vatos plokštes su lignosulfonatinio rišiklio. Kitų autorių (Ducman *et al.* 1998) teigimu, mineralinės vatos plokštes paveikus 30 ciklų, kai vieno ciklo metu

(per 24 valandas) temperatūra kinta: +20...–20...+50...–20 °C, kai santykinis oro drėgnumas 65 %, iki 20 % sumažėja pradinis plokščių gniuždymo stipris.

Kitų klimatinių ciklinių (metodika pagal Гусев *et al.* 2005) bandymų metu nustatyta, kad dėl mineralinio pluošto ir rišamosios medžiagos netinkamos kokybės keičiasi skirtingo tankio plokščių linijiniai matmenys: 156 kg/m³ tankio bandinių storis padidėjo 24 % ir apie 1 % – ilgis bei plotis; o 74 kg/m³ tankio bandinių storis padidėjo 43 %, ilgis bei plotis 3–4 % (Езерский *et al.* 2008). Šitai paaiškinama tuo, kad didžiausias klimatinių veiksnių (kai susidaro aukšta temperatūra ir didelė drėgmė) poveikis tenka mineralinės vatos gaminiuose esančiai rišamajai medžiagai. Veikiamas aukštos (daugiau kaip +200 °C) temperatūros organinis rišiklis (dažniausiai fenolio formaldehido derva) yra (Boström 2002), o dėl didelės drėgmės rišiklis tirpsta ir atsiskiria nuo plaušų (Griffin, Fricklas 2006). Dažniausiai tai vyksta plaušų grupių susitelkimo vietose (plaušo ir rišiklio kontaktuose), todėl silpnėja jungtis tarp plaušo ir rišiklio (Фильков 1968; Chadiarakou *et al.* 2007). Dėl to mikrostruktūriniu lygmeniu matomi atsiskyre pavieniai plaušai (Karamanos *et al.* 2004), o makrostruktūriniu gaminio tankis sumažėja dėl erdvinės gaminio struktūros vientisumo pažeidimo.

Kaip rodo bandymai (Татаринцева *et al.* 2004; Потапов *et al.* 2008) esant „geros kokybės“ mineraliniam plaušui (kurio $M_R = 3,6$) nepastebėta mikrostruktūros ir pagrindinių gaminių savybių (tankio, šilumos laidumo, gniuždymo įtempio esant 10 % deformacijai, vandens įgėrio) pokyčių po bandymų, kurių metu bandiniai buvo 2360 ciklų veikiami kintamos (nuo –25 iki +25 °C) temperatūros, esant santykiniam oro drėgniui 40–98 %, imituojant šalto klimato zoną. Tyrimų metu (Кишонас, Живатова 1983), kai vienoje bandinio pusėje buvo +(20–22) °C teigiama temperatūra, o kitoje ji svyravo nuo –13 °C iki +(20–22) °C, nenustatyta esminių mineralinės vatos plokščių gniuždymo įtempio pokyčių po 10 parų ciklinio bandymo. Taigi galima matyti, kad labai skirtingi mineralinės vatos gaminių savybių pokyčio dydžiai nulemti ne tik pirmiau minėtų žaliavos ir kokybės veiksnių, bet ir bandymų atlikimo metodų.

Šiuo metu nėra darniųjų standartų, reglamentuojančių mineralinės vatos gaminių ilgaamžiškumo nustatymo, naudojimo laiko ir pan. tyrimus. Skirtingų šalių ar tyrimų institucijų mokslininkai yra sukūrę ir taiko daug skirtingų metodų termoizoliacinių medžiagų ilgaamžiškumui nustatyti. Vienas iš tokių Šiaurės Europos šalių Nordtest NT Build 434 (1995) metodas skirtas aukštos temperatūros ir drėgmės poveikio stoginių termoizoliacinių medžiagų savybių pokyčiams nusakyti. Tačiau jis nėra skirtas eksploatacijos laikui ar ilgaamžiškumui prognozuoti.

Daug metodų (Ушков 1975; Бобров 1987a; Гнип 1988) ir standartų (ГОСТ 17177-94 1994) sukurta vien tik mineralinės vatos gaminių atsparumo

drėgmei nustatyti ir (arba) ilgaamžiškumui prognozuoti. Iš esmės visi jie panašūs ir skiriasi tik skirtingais klimatinio veiksnio dydžiais ir bandymo intensyvumu, trukme.

Mineralinės vatos plokštėms, naudojamoms plokščiųjų stogų atitvaroms šiltinti, nėra reglamentuoti ilgaamžiškumo ar atsparumo klimatinio veiksnio poveikiui tyrimai. Šiuo metu pagal galiojantį darnųjį standartą (LST EN 13162:2009) gamintojas turi tikrinti tik produkcijos matmenų stabilumą pasirinktomis sąlygomis: 23 ± 2 °C ir 90 ± 5 %, arba 70 ± 2 °C, arba 70 ± 2 °C ir 90 ± 5 %. Bandymas trunka 48 valandas, o santykiniai linijinių matmenų pokyčiai neturi būti didesni kaip 1,0 %. Kiekviena šalis ar įmonė gali savanoriškai taikyti skirtingus bandymo metodus ilgaamžiškumui tirti.

Privaloma nustatyti sudėtinėms tinkuojamų fasadų sistemoms (pradžioje minėtai ETICS pagal ETAG 004, 2000) naudojamų termoizoliacinių medžiagų tempiamąjį stiprį po hidroterminių bandymų, t. y. išlaikymo nustatytos temperatūros ir santykinio oro drėgumo sąlygomis. Pasirinktinai taikomas vienas iš dviejų metodų: 7 paros klimatinėje kameroje esant 70 ± 2 °C ir 95 ± 5 % arba 5 paros daugiau nei 60 °C temperatūros vandenyje ir po to 7 ar 28 parų išlaikymas sandariame inde. Tačiau kaip teigiama Holm ir Künzel (1999), Zirkelbach *et al.* (2005) straipsniuose, laboratorinės bandymų sąlygos neatitinka realiai eksploatacijos metu atitvaroje susidarančių temperatūros ir drėgmės sąlygų. Kadangi natūrinių bandymų metu išmatuota aukštesnės kaip +30 °C temperatūros ir didesnės kaip 95 % drėgmės poveikių kombinacija vienu metu pasitaiko labai retai, o per metus temperatūra svyruoja nuo –20 °C iki +45 °C, drėgmė – 70–100 %, taigi vidutiniškai atitvaroje susidaro +20 °C temperatūra ir 50 % santykinis oro drėgnumas.

Lyginamieji bandymai (kurių metų palyginti rezultatai šių bandinių: naujų gaminių; išbandytų laboratorijoje taikant pirmiau aprašytus du metodus; išimtų iš bandomosios natūrinės atitvaros) rodo, kad laboratorinėmis sąlygomis pagal metodiką išbandytų gaminių likutinis (lyginant su naujo gaminio) tempiamasis stipris siekia: 35–37 % (pagal 1 metodą) ir 43–44 % (pagal 2 metodą); 79–100 % bandiniams po 30 mėnesių eksploatacijos realiomis sąlygomis. Taigi tempiamojo stiprio dydžiai, gauti laboratorinių bandymų metu pagal galiojančias metodikas, beveik 2–3 kartus mažesni nei realiomis eksploatacijos sąlygomis. Susidariusį skirtumą galima aiškinti temperatūros įtaka, nes skirtumas tarp metodikose nustatytos ir realiai veikiančios vidutinės temperatūrų siekia 40–50 °C, o Bobrovo ir Petuchovos (Бобров, Петухова 2006) publikacijoje teigiama, kad mineralinės vatos plokščių stiprio sumažėjimas yra apie 70 kartų didesnis +100 °C temperatūroje nei +20 °C (kai abiem atvejais santykinė drėgmė artima 100 %).

Kaip matome iš pateiktų skirtingų teorinių ir išmatuotų natūrinių temperatūros bei drėgmės atitvarose duomenų ir nustatytų labai skirtingų

mineralinės vatos gaminių stiprumo savybių pokyčių (dėl klimatinų veiksnių poveikio), lyginant dydžius, gautus atlikus bandymus laboratorinėmis sąlygomis pagal patvirtintas metodikas ir naudojus natūroje, galima teigti, kad nėra patikimų temperatūros ir drėgmės matavimų plokščio stogo termoizoliaciniame sluoksnyje realiomis naudojimo sąlygomis. Šiuo metu taikomose bandymų metodikose klimatinų veiksnių dydžiai neatitinka poveikių realiomis sąlygomis. Dėl to laboratorinių tyrimų metu gauti medžiagų savybių bandymų rezultatai gali būti prastesni ir neatspindėti realių pokyčių normaliai naudojant.

1.2.2. Apkrovų poveikiai

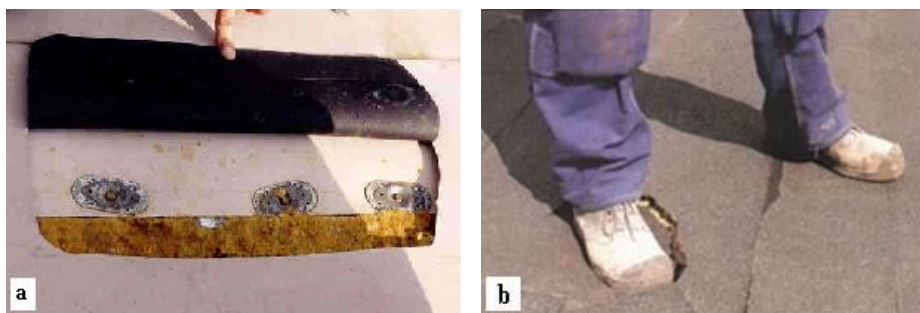
Plokščiasis stogas yra viena iš pastato atitvarų, kurią veikia didžiausias galimų apkrovų derinys: vėjo, sniego, vaikščiojimas montuojant ir eksploatuojant stogą, todėl naudojamos termoizoliacinės medžiagos turi turėti gerų fizinių ir mechaninių savybių. Termoizoliaciniam sluoksniui turi būti parenkamos standžios apkrovos laikančios mineralinės vatos plokštės, kurių deklaruojami gniuždymo įtempis (σ_{10}) esant 10 % deformacijai arba stipris gniuždant (σ_m) bei sutelktoji apkrova (F_5) nustatyti pagal (LST EN 13162:2009) standarto reikalavimus.

Galiojantis STR 2.05.02:2008 (2009) numato, kad plokščiųjų stogų viršutiniam sluoksniui naudojamų mineralinės vatos plokščių σ_{10} turi būti $\geq 50\text{--}60$ kPa, o apatiniame sluoksniui $\sigma_{10} \geq 30$ kPa atitinkamai. Toks stiprumas pakankamas dideliame plote išskirstytoms apkrovoms atlaikyti (virš termoizoliacijos esančių stogo sluoksnių, sniego ar vandens laikinai susikaupiančio liūčių ar atodėkių metu). Tačiau medžiagų sandėliavimas ir darbininkų vaikščiojimas įrengiant stogą, montuojant inžinerinę įrangą ir eksploatacinės priežiūros metu sukelia koncentruotas vietines gniuždymo apkrovas.

Europos techninių liudijimų organizacija parengė aiškinamąjį Europos techninio liudijimo rekomendacijų rengimo vadovą ETAG 006 (2000), kuriame pateikiami techniniai reikalavimai plokščiųjų stogų sistemose naudojamoms medžiagoms. Remiantis ETAG 006 (2000) 6.4.3.1 punktu rekomenduojama, kad termoizoliacinių gaminių, naudojamų viršutiniam plokščiųjų stogų sluoksniui, σ_{10} turi būti ≥ 60 kPa (pagal LST EN 826 (1998)), o sutelktoji apkrova, esant 5 mm deformacijai, turi būti $F_5 \geq 500$ N (arba perskaičiavus į ploto vienetą $\sigma_{PL} \geq 100$ kPa) pagal LST EN 12430 (2000). Sutelktosios apkrovos bandymas pradėtas taikyti palyginti neseniai (maždaug nuo 1998 m.). F_5 bandymo metu imituojamas tiesioginės apkrovos (veikiančios nedideliame paviršiaus plote) poveikis termoizoliacinėms medžiagoms. Tačiau F_5 yra nustatoma laboratorijose bandymams naudojant tik naujai pagamintus gaminius. Pastebėta, kad laboratorijose gauti bandymų rezultatai dažnai neatspindi tų pačių medžiagų

savybių realiomis eksploataavimo sąlygomis. Be to, praktiškai nėra šių medžiagų ilgaamžiškumo bei savybių pokyčių tyrimų jas normaliai naudojant.

Termoizoliacinė medžiaga dėl intensyvaus žmonių vaikščiojimo palaipsniui praranda atsparumą gniuždymui ir mažėja jos storis, todėl būtina užtikrinti adekvačias naudojamų medžiagų savybes arba mažiau vaikščioti jomis įrengiant stogą (Jacoby 1966; Geary 2001). Plokštiesiems stogams naudojamai termoizoliacijai dažniausiai tenkanti apkrova susidaro nuo žmogaus svorio. Literatūros šaltiniuose (Гончаниук 2003; Огурцова 2006) teigiama, kad vieno stovinčio žmogaus apkrova gali siekti nuo 25–62 kPa, vidutiniškai 32,9 kPa. Statinės apkrovos dydis priklauso nuo jo svorio (apytiksliai skaičiuojama 80,1 kg) ir dėvimos avalynės dydžio (atraminis plotas – apie 440 cm²). Tačiau Огурцова (Огурцова 2006) teigia, kad vaikščiojant susidaranti dinaminė apkrova padidėja apytiksliai 4 kartus, dėl ko gali susidaryti vidutiniškai 130–150 kPa apkrova. Plokščiojo stogo termoizoliacinio sluoksnio iš mineralinės vatos pažeidimo pavyzdys pateikiamas 1.3 pav.



1.3 pav. Termoizoliacinio sluoksnio pažeidimas: a – mineralinės vatos plokštės paviršiaus suirtis dėl vaikščiojimo apkrovų (Hendriks 2002); b – hidroizoliacinės dangos sluoksnio plyšimas dėl mineralinės vatos plokščių stiprumo sumažėjimo (Сосинов 2005)

Fig. 1.3. Damage to thermal insulation layer: a – destruction of surface of mineral wool slab caused by pedestrian traffic (Hendriks 2002); b – hydroinsulation roofing layer crack caused by decrease in strength of mineral wool slabs (Сосинов 2005)

Sosunovo straipsnyje (Сосинов 2005) pateikiama informacija, kad dėl didelio kartotinių apkrovų skirtingo tankio mineralinės vatos plokštės gali prarasti iki 57 % savo pradinio gniuždymo stiprio, o jei plokštės dar ir drėgnos, tai stipris gali sumažėti net 96 %. Tačiau šiame straipsnyje nėra pateikta jokių duomenų apie bandinius veikusių apkrovų dydžius ar metodo aprašymo, o tik nurodyta, kad bandiniai buvo veikiami kartotine apkrova 1000 kartų.

Norint išvengti stogo sistemos pažeidimo dėl termoizoliacinio sluoksnio sugadinimo, ją montuojant ar vėliau eksploatuojant, reikia nustatyti termoizoliacinių medžiagų atsparumą statinei (nedideliame plote veikiančiai) ir (arba) dinaminei (kartotinei) apkrovai, susidarančiai dėl dažno vaikščiojimo. Brotherson publikacijoje (1979) pasiūlyta sąvoka „izoliacijos kietumas“, kuri nusako medžiagos atsparumą smūgiams įrengiant stogą ir užtikrinant normalų visos stogo sistemos naudojimą.

Mokslininkas Gnipas (Гнип 1983) atliko vietinės gniuždymo apkrovos poveikio mineralinės vatos plokštėse bandymus. Vietinė apkrova imituotas mechanizmų poveikis gaminio paviršiui (pvz., tai gali būti presas dangai klijuoti). Bandiniai buvo gniuždomi 100×100 mm dydžio kvadratiniais ir 50, 101, 191, 286 mm spindulio cilindriniais (plotis – 100 mm) šampais. Gauti vietinės gniuždymo apkrovos rezultatai lyginti su gniuždymo įtempio, esant 5 % deformacijai, to paties tipo bandinių rezultatais. Nustatyta, kad vietinės gniuždymo apkrovos dydžiai buvo vidutiniškai 1,38 karto didesni nei išmatuoti gniuždant iki 5 % deformacijos. Šitai aiškinama tuo, kad horizontalios plaušų orientacijos bandinyje vietinei apkrovai (susidarančiai nuo kvadratinio šampo) priešinasi ir gretutiniai sluoksniai, esantys apie gniuždomąjį plotą. Išmatuota, kad 310 kg/m³ tankio bandinyje besideformuojanti zona siekia 340–383 mm nuo šampo kraštinių esant 55–200 kPa apkrovoms.

Nemažai įvairių bandymų (Koontz 1987), siekiant nustatyti plokščiųjų stogų sistemų atsparumą statinėms ir dinaminėms apkrovoms dėl vaikščiojimo, dangos pradūrimų dėl krintančių varveklių, krušos, nuolaužų ir kt., buvo atlikta JAV. Sistemiskai buvo tirtos stogo konstrukcijos bei analizuojama termoizoliacinių sluoksnių elgsena dėl įvairių poveikių, lyginami skirtingose šalyse taikomi bandymų metodai. Medžiagų atsparumo vaikščiojimo apkrovoms nustatyti (Malpezzi 1991) buvo pasitelktas vienciklis 1267,7 N jėgos perduodamos 15,24 cm skersmens cilindro arba kvadratinės 182,39 cm² ploto plokštės poveikis stogo paviršiui. Bandymo metu susidarydavo apytiksliai 68,94 kPa apkrova, kuri bandinį veikdavo 200 kartų. Paaiškėjo, kad dauguma termoizoliacinių medžiagų buvo tik nedaug ar visai nepažeistos. Šitai buvo aiškinama tuo, kad visos bandymuose naudotos medžiagos turėjo kur kas didesnę gniuždymo stiprį, nei bandymo metu veikusi apkrova. Dupuis publikacijoje (1999) teigiama, kad būtina sukurti ir taikyti vienodus bandymų metodus nustatant sisteminių plokščiųjų stogų konstrukcijų (naujų ir sendintų) atsparumą statinei ir dinaminei apkrovoms.

Autoriai (Liu, Booth 1999; Booth *et al.* 2002) aprašo bandymo metodą, leidžiantį nustatyti termoizoliacinės medžiagos ir visos stogo konstrukcijos atsparumą statinei ir dinaminei apkrovoms. Bandymams buvo sukonstruotas prietaisas, imituojantis nuo bato kulno (nepasvirusio arba pakreipto 15°, 30° kampu horizontalaus paviršiaus atžvilgiu) susidarančią 45,4 kg (apie 500 N)

apkrovą stogo sluoksniams. Gauti rezultatai rodo, kad neapsaugotos termoizoliacinės medžiagos yra mechanškai pažeidžiamos jau pirmųjų ciklų metu, o pažeidimų gylis (13,81–15,71 mm) intensyviai didėja maždaug iki 2000 ciklų (po to fiksuojami maži pokyčiai). Siekiant apsaugoti termoizoliacinės medžiagas nuo sugadinimo, būtina naudoti papildomas dangas, nes jau uždėjus du sluoksnius bituminės ritininės stogo dangos pažeidimų sumažėja (išmatuotas gylis siekia 4,24–5,11 mm). Koontz ir Crenshaw (2002) aprašytą įrangą patobulino, kad bandymų metu ji sukinėtųsi įvairiomis kryptimis, bandinį deformuojant 890 N jėga, išspaudžiant 1 mm. Jie išbandė ir kitą dinaminės apkrovos metodą – „metalinio daikto metimas“, kai bandymo metu ant bandomojo stogo paviršiaus iš 135 cm aukščio buvo metamas 2,27 kg užapvalintas 5,08 cm skersmens cilindras. Gauti rezultatai rodo, kad kuo didesnis pradinis termoizoliacinės medžiagos gniuždymo stipris, tuo didesnis atsparumas mechaninės apkrovos poveikiams. Šiuos rezultatus patvirtina ir konglomeratų teorija (Skripkiūnas 2007).

Stogo dangos įrengimas virš termoizoliacinės medžiagos sumažina jos pažeidimo laipsnį. Jei izoliacinė medžiaga nepasižymi dideliu gniuždymo stipriu ir nėra atspari mechaninėms apkrovoms, būtina virš jos įrengti apsauginį sluoksnį iš didesnio tankio medžiagų (pvz., medžio plaušo ar gipskartonio plokščių). Tų pačių autorių (Crenshaw, Koontz 2000) pastebėta, kad dėl įvairių (pvz., klimatinių) poveikių sukkelto dangų senėjimo keičiasi eksploatuojamo stogo sistemos atsparumas vaikščiojimo ir pradūrimo apkrovoms, todėl reikia vertinti ir šį (stogo senėjimo) veiksnį.

Hendriks publikacijoje (2002) pateiktas kito metodo, imituojančio vaikščiojimo apkrovas ant termoizoliacinės medžiagos, pritaikymas ir aprašyti bandymų metu gauti rezultatai. Termoizoliacinės plokštės paviršius buvo veikiamas 80 mm skersmens cilindrais 980 N jėga (kuri atitinka 70 kg svorio žmogaus, nešančio 30 kg nešulį, apkrovą). Bandiniai sukinėjami taip, kad visas paviršiaus plotas būtų veikiamas 10, 30 ir 100 ciklų kartotine apkrova. Buvo nustatytas daugelio polimerinių termoizoliacinių medžiagų savybių dėl mechaninio poveikio pokytis: 5,6–8,3 % sumažėja bandinių storis ir 12,6–13,3 % gniuždymo stipris, palyginti su pradiniais dydžiais. Ekspertų buvo pripažinta, kad ši įranga nebuvo tinkama mineralinės vatos plokštėms bandyti, nes dėl skersinių apkrovų bandiniai sugadinami jau pirmųjų bandymų metu (tai patvirtina gauti ypač maži ir nerealiūs rezultatai – gniuždymo įtempio sumažėjimas 92 %). Prieita prie išvadų, kad norint tirti mineralinės vatos gaminius šią įrangą būtina tobulinti. Be to, bandant visą stogo sistemą (su stogo danga) rezultatai gali labai skirtis dėl stogo dangos buvimo paviršiuje.

Kaip jau minėta, vienas iš būdų, mažinantis vaikščiojimo apkrovų poveikį termoizoliacinei medžiagai, yra apsauginių didesnio tankio plokščių naudojimas perėjimuose, takuose ar pan. Tačiau galima gaminti sustiprinto (sutankinto)

paviršiaus termoizoliacinius gaminius ar vieną jų pusę padengiant danga (armuojant) – tai padidina atsparumą smūgiams (Skripkiūnas 2007), nes paviršius, tiesiogiai kontaktuojantis su cikline apkrova, patiria didžiausias apkrovas. Tai patvirtina Kišono ir Gnipo (Кишонас, Гнип 1971) pateikti bandymų rezultatai, kai ant 280 kg/m^3 tankio mineralinės vatos plokštės paviršiaus priklijavus tris sluoksnius bituminės dangos, tokios sistemos atsparumas vietiniam gniuždymui (iki 10 % deformacijos) padidėja 2,6 karto (nuo 60 iki 160 kPa).

Kaip rodo gniuždymo stiprio tyrimai (Гнип 1983), bandinių, turėjusių tam tikrą suketintą paviršių („plutelę“), išmatuoti apie 1,43 karto didesni vietinės apkrovos dydžiai. Tačiau pašalinus paviršinių suketintą sluoksnį vietinės gniuždymo apkrovos padidėjimo nefiksuota. Mineralinės vatos plokščių vienos pusės padengimas stiklo pluošto danga 1,5–1,7 karto padidina plokštės lenkimo deformacijos modulį. Tačiau Gnipo ir kt. (Гнип 1988) manymu, lemiamą įtaką lenkimo deformacijos modulio dydžiui turi plokščių tankis.

Taigi iki šiol nėra priimta bendrų standartizuotų metodikų, kuriomis galima būtų nustatyti ir išreikšti termoizoliacinių medžiagų atsparumą kartotinių apkrovų poveikiui. Literatūroje nepavyko rasti ilgalaikių natūrinių bandymų, kurių metu būtų imituojamos vaikščiojimo apkrovos įrengiant ir eksploatuojant stogą bei tiriami termoizoliacinių plokščių savybių pokyčiai naudojant, rezultatų.

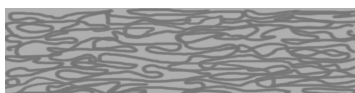
1.3. Technologiniai veiksniai, lemiantys plaušų išsidėstymą mineralinės vatos gaminių struktūroje

Mineralinės vatos gaminių gamybos technologinis procesas trumpai aprašytas 1.1.3 skirsnyje. Todėl šioje dalyje aprašomi veiksniai, kuriuos kontroliuojant technologinio proceso metu galima formuoti nustatytos struktūros, vientisą ir tolygaus svorio mineralinės vatos pluošto klodą su tolygiai įterptomis ir paskirstytomis rišamosiomis medžiagomis.

Mineralinės vatos erdvinės struktūros valdymas (galimybė keisti plaušų išsidėstymo kryptį) lemia standžių mineralinės vatos gaminių šiluminės, stiprumo, deformacinės ir eksploatacinės savybes. Goreinovas ir Korovnikova (Горейнов, Коровникова 1975) aprašo, kad gamybos metu pluošto klando formavimo etape keičiant tankį ir plaušų išsidėstymo kryptį (perorientuojant), struktūroje galima nustatyti gaminių stiprumo savybes. Todėl mechaninės gaminių savybės (gniuždymo ir tempimo stipris, sutelktosios apkrovos poveikis) priklauso nuo plaušų orientacijos gaminio struktūroje bei lemia šiluminės izoliacijos efektyvumą ir ilgaamžiškumą.

Dažniausiai mineralinės vatos gaminių gamybai naudojamos konvejerinės technologinės linijos (Ohberg 1987), todėl nuo jų tipo, įrangos ir pluošto

reguliavimo galimybių gali būti gaminami kryptingos (tam tikra kryptimi (horizontaliai (1.4 pav., a) ar vertikaliai (1.4 pav., b)) išsidėsčiusių plaušų), chaotiškos (kai plaušai išsidėstę atsitiktinai ir įvairiomis kryptimis nevienodai (1.4 pav., c)) (Бобров 1987a) ir sluoksniuotos (sudaryti iš kelių skirtingo tankio sluoksnių (1.4 pav., d)) (Clausen, Jacobsen 2003) struktūros termoizoliaciniai mineralinės vatos gaminiai.



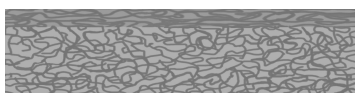
a – kryptingas horizontalus plaušų išsidėstymas
directional (longitudinal) fibre orientation



b – kryptingas vertikalus plaušų išsidėstymas
directional (perpendicular) fibre orientation



c – chaotiškas plaušų išsidėstymas
chaotic fibre orientation



d – plaušų išsidėstymas sluoksniais: viršutinis – didesnio tankio, apatinis – mažesnio tankio
fibre orientation in layers: top – higher density, bottom – lower density

1.4 pav. Plaušų išsidėstymas mineralinės vatos gaminyje

Fig. 1.4. Fibre orientation in the mineral wool product

Plaušų orientacija pluošto klode keičiama įvairiais technologiniais įrenginiais, montuojamais tiesiogiai konvejerinėje gamybos linijoje (dažniausiai už plaušų nusodinimo kameros). Toliau aprašomi pagrindiniai dabartiniu metu žinomi ir skirtingose technologinėse mineralinės vatos gamybos linijose taikomi pluoštinės struktūros reguliavimo būdai, keičiant plaušų išsidėstymo kryptį pluošto klode.

1.3.1. Kryptingas plaušų išsidėstymas struktūroje

Horizontalios plaušų orientacijos gaminiai

Seniausiai žinomi ir plačiausiai gaminami mineralinės vatos gaminiai, kurių struktūroje dauguma plaušų yra orientuoti horizontalia kryptimi (Strazdas 1998). Taip atsitinka todėl, kad iš lydalų suformuoti plaušai nupučiami oro srauto ir

natūraliai nusėda horizontaliojoje plokštumoje ant ta pačia kryptimi judančio konvejerinio tinklo. Surinktiems ir iki reikiamo storio suspaustiems plaušams perėjus terminio apdorojimo ciklą, susidaro standus mineralinio pluošto koldas su dominuojančios horizontalios orientacijos plaušais (Strazdas, Eidukevičius 1985). Zarovniatych (Заровнятных 2003) teigia, kad tokios struktūros gaminyje horizontalios orientacijos plaušų susidaro net iki 85 % (patente (Cridland *et al.* 1999b) nurodomas apie 70 % kiekis), o likusieji išsidėstę kitomis (nebūtinai vertikaliai) kryptimis. Bobrovas (Бобров 1987a) nurodo, kad horizontalios plaušų orientacijos gaminiai yra geriausių termoizoliacinių savybių, nes plaušai, išsidėstę statmenai šilumos srauto tekėjimo kryptčiai, labai sumažina jo sklaidimą. Tačiau šie gaminiai išsiskiria savo anizotropiškumu ir jų mechaninės savybės taip pat skirtingos. Jeigu horizontalios plaušų orientacijos gaminių paveiksime tempimo apkrova (ją pridėjus statmenai plaušų išsidėstymo kryptčiai), tai gaminio struktūroje horizontaliai pasiskirstę plaušai mažai pasipriešins tempimo įtempiams, todėl gaminio stipris tempiant bus minimalus, o tą patį gaminių apkraunant gniuždymo apkrova, ją pridėdant statmenai plaušų išsidėstymo kryptčiai, plaušai daugiausia „dirbs klupdymui“, todėl gniuždymo stipris bus nedidelis. Pateikiamas pavyzdys, kad tokios struktūros apie 100 kg/m^3 tankio gaminių apkrovus 2 kPa apkrova deformacijos sieks 28–50 %, o $190\text{--}200 \text{ kg/m}^3$ tankio gaminio – tik 1–5 %. Norint pagaminti patenkinamų mechaninių savybių horizontalios orientacijos gaminius, reikia gaminti gana didelio nominalaus tankio gaminius bei įterpti didesnę rišamųjų medžiagų kiekį, todėl sunaudojama daugiau žaliavų, sumažėja gamybos apimtys ir padidėja savikaina.

Vertikalios plaušų orientacijos gaminiai

Mineralinės vatos gaminiai, kuriuose plaušai yra orientuoti vertikaliai, t. y. statmenai pluošto koldo judėjimo konvejeriu kryptčiai, o plaušų ir apkrovos veikimo kryptis sutampa, yra vadinami „lamella“ (BS 3533:1981). Tokie gaminiai yra palyginti mažo tankio, kietesni, lankstesni bei geresnių mechaninių savybių: geresnis gniuždymo stipris ir stipris tempiant statmenai paviršiui bei didesnis šilumos laidumo koeficientas. Tai aiškinama (Горлов *et al.* 1980; Šiaučiūnas, Štuopys 1998) tuo, kad kryptingas plaušų išsidėstymas sutampa su šilumos srauto judėjimo kryptimi. Tokių gaminių gamybai sunaudojama 1,3–1,4 karto mažiau žaliavų ir energijos (Горяйнов, Горяйнова 1982; Strazdas, Eidukevičius 1985). Lyginant panašaus tankio, bet skirtingos (horizontalaus su vertikaliais) plaušų orientacijos mineralinės vatos gaminius, jų stipris tempiant labai skiriasi.

Potapovas ir kt. (Потапов *et al.* 2008) rašo, kad vertikalios orientacijos gaminių tempimo stipris yra apytiksliai 7–10 kartų didesnis nei horizontalios plaušų orientacijos ir to paties tankio gaminių. Taip pat kaip ir gniuždymo stipris (atitinkamai 3–7 kartus), didesnis nei gaminių su horizontalios orientacijos

plaušais (Бобров 1987a). Nors kitoje publikacijoje (Заровнятных 2003) nurodytas gniuždymo stiprio skirtumas siekia 2–3 kartus. Nepaisant gana didelių mechaninių rodiklių vertikalios orientacijos plaušų gaminiai yra apie 20 % laidesni šilumai nei horizontalios plaušų orientacijos gaminiai (Bliūdžius, Stankevičius 2001).

Gaminiai su vertikalios orientacijos plaušų struktūra dažniausiai gaminami šiais būdais: „lameline“ pjovimo ir pasukimo; paketine ir (arba) kubinio formavimo technologijomis.

„Lamelinė“ pjovimo ir pasukimo technologija aprašoma kai kuriose publikacijose (Бобров 1987a; Заровнятных 2003). Jos esmė ta, kad konvejeriniu būdu pagamintas tam tikrų matmenų mineralinės vatos klotas su horizontaliai išsidėsčiusiais plaušais supjaustomas (dažniausiai diskiniiais pjūklais) į tam tikro pločio juostas (kurių plotis lygus būsimų vertikaliai orientuoto plaušo gaminių storiui) bei pasukamas 90° kampu. Pagal skirtingus patentus (Gessner, Steckert 1984; Jacobsen, Nørgaard 1992; Karjalainen, Soikkeli 2003) gali būti pjaustoma tiesiogiai klotui judant konvejeriu arba gali būti gaminami ruošiniai, kurie vėliau supjaustomi į juostas („lameles“).

Paketinės technologijos esmė ta, kad iš 10–15 pusiau standžių arba standžių plokščių, kuriose vyrauja horizontalūs plaušai (gamybos technologija aprašyta pirmiau), sudaromas ir sukljuojamas paketas, kuris vėliau supjaustomas skersai dominuojančių plaušų krypties ir taip gaunamas vertikalus plaušų orientavimas (Lecron 1979; Strazdas, Eidukevičius 1985; Кудзявичюс, Гваздаускас 1987; Бобров 1987a).

Dar vertikaliai orientuoto plaušo gaminiai gali būti gaminami kubiniu formavimo būdu. Reikia tam tikrais matmenimis supjaustyti pagamintą kubo formos (1,0×1,0×1,0 m dydžio) mineralinio pluošto ruošinį (jis gaunamas į specialią kamerą sluoksniais sukraunant pagaminto pluošto gabalus tiesiai iš nusodintuvo ir juos termiškai apdorojant) (Rockwool AB 1975; Strazdas, Eidukevičius 1985; Бобров 1987a; Кудзявичюс, Гваздаускас 1987).

Vertikalus plaušų orientavimas gaminių struktūroje paketinio ir kubinio formavimo būdu buvo įdiegtas keliose Rusijos mineralinės vatos gamylose, bet dėl sudėtingos įrangos, didelių darbo sąnaudų bei nesrautinės gamybos nebuvo plačiai pritaikytas pramonėje (Заровнятных *et al.* 2002).

Gaminiai, kurių struktūroje dominuoja vertikali plaušų orientacija, yra apytiksliai 25–30 % mažesnio tankio, palyginti su konvejeriniu (tradiciniu) būdu gaminamais gaminiiais, kai jų mechaninės savybės gaunamos vienodos. Plačiausiai pasaulyje paplitęs ir taikomas „lamelinis“ pjovimo ir pasukimo gamybos būdas. Tačiau Zarovniatnyh ir kt. (Заровнятных *et al.* 2002) nuomone, jis nėra tobulas, reikalaujantis didesnių gamybos sąnaudų, nes beveik nėra galimybės pritaikyti jo tiesiogiai konvejerinėje gamybos linijoje.

1.3.2. Chaotiškas plaušų išsidėstymas struktūroje

Ankstesniuose skyriuose pateikta informacija patvirtina lemiamą plaušų išsidėstymo gaminio struktūroje įtaką mineralinės vatos gaminių stiprumo savybėms. Chaotiškos plaušų orientacijos gaminiai gaminami keičiant plaušų padėtį jau suformuotame pirminiame mineralinio pluošto klode, judančiame konvejerine linija. Tam naudojami įvairaus tipo įrenginiai, o pats technologinis procesas vadinamas perorientavimu (angl. k. atitinkmuo *crimping*) (Witz *et al.* 2008).

Dažniausiai plaušų perorientavimui taikomi keli būdai: greičio reguliavimo, ilgio ir aukščio suspaudimo (*LHC* metodas) bei gofravimo technologijos. Greičio reguliavimo metodo esmė – atskirų konvejerio tinklų (ar kitų klodą prispaudžiančių prietaisų) judėjimo greičių reguliavimas, kai suformuotas mineralinio pluošto klotas juda suspaustas tarp dviejų (viršutinio ir apatinio) konvejerinių tinklų. Keičiant tinklų (ar atskirų transporterių) judėjimo greičius (arba kryptis) plaušai dėl trinties jėgų keičia savo padėtį iš horizontalios orientacijos į kitą (aiškiai neapibrėžtą) įgaudami chaotišką orientaciją gaminio struktūroje (Debouzie *et al.* 1986, Hojholt 2003). Nustatyta (Horres 2000), kad taikant šį perorientavimo metodą galima gaminti apie 35 kg/m^3 mažesnio tankio stiklo vatos plokštes, bet išlaikant tuos pačius gniuždymo įtempio dydžius kaip ir horizontalios plaušų orientacijos plokštėse.

Plaušų orientacijos keitimas ilgio ir aukščio suspaudimo (*LHC*) būdu pagrįstas tuo, kad tam tikro storio suformuotas pirminis pluošto klotas suspaudžiamas išilgine kryptimi išlaikant pastovų klotų aukštį (arba net jį sumažinant). Mineralinio pluošto klotas tam tikru greičiu juda tarp mažiausiai dviejų konvejerio tinklų (dažniausiai vienas iš tinklų juda greičiau nei kitas). Mineralinio pluošto klotų aukštis gali būti mažinamas reguliuojant konvejerio tinklus, todėl judantis pluošto klotas patenka į mažesnio aukščio ir lėčiau judantį tunelį, kuriame dėl inercijos klotas susispaudžia tiek aukščio, tiek ilgio atžvilgiu. Taigi prieš tai buvę dominuojančios horizontalios orientacijos plaušai keičia orientaciją į chaotišką. Reguluojant aukščio ir ilgio susispaudimo santykį galima gaminti numatomų savybių mineralinės vatos gaminius (Jacobsen, Nørgaard 1992; Brandt, Holtze 1994a; Nørgaard *et al.* 1995; Cridland *et al.* 1999a; Klose 2006). Anksčiau minėtuose patentuose pateikiama informacija, kad *LHC* būdu optimaliai perorientavus plaušus galima pagerinti gaminių gniuždymo savybes 17–24 kPa (nekeičiant tankio). O pluošto klotą ypač suspaudus ilgio kryptimi stiprio gniuždant savybės gali padidėti net kelis kartus (70–180 kPa).

Gofruotos struktūros gaminiai gaunami įrenginio, sumontuoto tarp nusodintuvo ir kietinimo kamerų, kuriose pluošto klotas nenutrūksta, gofruojamas, t. y. plaušai perorientuojami iš horizontalios padėties į vertikalią klotui judant konvejeriu.

Gofravimas keliais būdais detaliai aprašytas patentuose (Lapienis *et al.* 1991; Tien-Sheng *et al.* 1996; Cridland *et al.* 1999b; Klose 2005). Nustatyta (Зимин, Фирсов 2006), kad panašaus tankio ($150\text{--}200\text{ kg/m}^3$) gaminiai, pagaminti naudojant gofravimo ir konvejerinio (horizontalios plaušų orientacijos gaminiai) formavimo technologiją, labai skiriasi gniuždymo stipriu (t.y. gofruotos struktūros gaminiai apie 2–3 karto stipresni). Tam horizontalios orientacijos pluošto klode užtenka perorientuoti iki 50 % plaušų kiekio (Бобров 1987a).

Patente (Horres, Mellem 2006) aprašytas mineralinės vatos gaminio, turinčio chaotišką plaušų struktūrą ir izotropinių savybių, gamybos būdas. Esmė ta, kad pirminis pluošto klotas supjaustomas nedidelėmis ($10\text{--}30\text{ mm}$) juostomis, kurios perduodant (specialiu prietaisu) į antrinio pluošto klotą formavimo konvejerį sumaišomos išsklaidant horizontalią plaušų orientaciją. Bandymai rodo, kad tokios struktūros gaminių stipris tempiant dvigubai didesnis (smeigės metodas) ir mažesnis šilumos laidumo koeficientas (ypač esant nedideliu tankiumi), palyginti su kitais chaotiškos struktūros gaminiais, pagamintais pagal pirmiau aprašytus būdus.

1.3.3. Plaušų išsidėstymas struktūroje sluoksniais

Sluoksniuotos (arba mišrios) struktūros mineralinės vatos gaminius paprastai sudaro keli skirtingo storio ir tankio sluoksniai. Plačiausiai Europos šalyse gaminamos (Clausen, Jacobsen 2003) mineralinės vatos plokštės, sudarytos iš dviejų tankių. Jos dar vadinamos dvitankėmis, nes sudarytos iš didesnio ($130\text{--}250\text{ kg/m}^3$) ir mažesnio ($52\text{--}200\text{ kg/m}^3$) tankio sluoksnių. Didesnio tankio sluoksnio storis paprastai būna $8\text{--}30\text{ mm}$ ir sudaro apytiksliai nuo 3 iki 25 % viso gaminio storio (tačiau šis sluoksnis gali būti ir storesnis – siekti 50 ar net 75 % viso gaminio storio).

Paprastai tankesnis sluoksnis yra ir viršutinė plokštės dalis, pasižyminti didesniu atsparumu koncentruotoms gniuždymo apkrovoms. Palyginimui (Clausen, Jacobsen 2003) pateikiamas pavyzdys, kai buvo pagaminti ir išbandyti panašaus tankio, bet skirtingos (sluoksniuotos ir vieno tankio) struktūros mineralinės vatos gaminiai. Nustatyta, kad sutelktoji apkrova gerokai skiriasi, t. y. išmatuotas sluoksniuotos struktūros dvitankių gaminių atsparumas sutelktosios apkrovos poveikiui siekė 645 N, o homogeniškos struktūros (vieno tankio) gaminio – 364 N.

Kitame patente (Cridland, Larsø 1988) tvirtinama, kad naudojant sluoksniuotos struktūros gamybos technologiją galima pagaminti mažiausiai 10 kg/m^3 mažesnio bendro tankio mineralinės vatos gaminį, palyginti su identiškų mechaninių parametrų homogeniškos struktūros vieno tankio gaminiu.

Sluoksniuotos struktūros gaminiai gaminami konvejerine technologija, kai iš judančio suformuoto (bet nesukietinto) pirminio mineralinio pluošto klando viršutinės dalies (juostiniu pjūklų) atpjaunamas tam tikro storio pasluoksnis, kuris vėliau volais sutankinamas iki reikiamo storio. Apatinį klando pasluoksnį sudarantys plaušai perorientuojami į chaotišką orientaciją. Suformuoti abu reikiamo storio ir tankio sluoksniai prieš terminio apdorojimo kamerą suspaudžiami. Sukietėjus rišikliui gaunamas vientisas sluoksniuotos struktūros gaminys. Plaušai, esantys tankesniame sluoksnyje, dažniausiai labiau orientuoti viena (horizontalia) kryptimi. O mažesnio tankio plokštės dalis paprastai būna sudaryta iš chaotiškos (Wyss, Zimmermann 1997; Clausen, Jacobsen 2003) arba vertikalios („lamelinės“) (Jacobsen 2008) orientacijos plaušų.

Toliau plečiant sluoksniuotos struktūros plokščių gamybą (Meres 2000) patente aprašyta ir gaminio, susidedančio iš trijų skirtingo tankio sluoksnių, gamybos technologija. Tai patobulinta pirmiau aprašyta dvitankių plokščių gamybos technologija, kai viršutinėje plokštės dalyje suformuojamas dar vienas iki 5 mm storio ir 400–600 kg/m³ tankio kietas sluoksnis. Jis gaunamas sukietinus organinės rišamosios medžiagos, kvarcinio smėlio ir smulkintų plaušų mišinį. Tokiu būdu pagaminto gaminio sutelktoji apkrova prie 5 mm deformacijos siekia 1187 N.

Yra ir kitų gamybos būdų (Nieminen *et al.* 1995; Francis *et al.* 1998), kai suformuotas mineralinio pluošto kloadas apklijuojamas (padengiamas) tam tikrais atskirais skirtingų medžiagų sluoksniais (stiklūnas, poliesteris, PVC, mastika ir kt.) arba suklijuojami keli atskirai suformuoti mineralinės vatos pluošto kloadai (Brandt, Holtze 1994b). Taigi gaunami taip pat sluoksniuotos struktūros gaminiai, kai danga sustiprinamas paviršinis sluoksnis.

Sluoksniuotos struktūros mineralinės vatos gaminių gamybos procesas leidžia sumažinti jų nominalų tankį, o tai leidžia sutaupyti žaliavų, sumažinti energijos sąnaudas, optimizuoti technologinės linijos veikimą bei padidinti produktų gamybos apimtį.

Literatūroje ir kituose šaltiniuose pateikiama informacija leidžia teigti, kad mineralinės vatos gaminių struktūrą lemia technologiniai veiksniai, o nuo plaušų išsidėstymo struktūroje (daugeliu atvejų) priklauso gaminių fizinės ir mechaninės savybės. O tokių savybių, kaip stipris tempiant, gniuždymo stipris bei sutelktoji apkrova, dydis priklauso nuo plaušų pasiskirstymo krypties ir orientacijos gaminyje.

Šiluminių ir kai kurių kitų mineralinės vatos savybių priklausomybė nuo plaušų orientacijos yra gerai žinoma ir sėkmingai naudojama termoizoliacinių, konstrukcinių, ugniai atsparių ir kompozitinių medžiagų gamybos technologijose.

1.4. Mineralinės vatos struktūros ypatumai

Mineralinė vata priskiriama pluoštiniais kompozitams, nes yra sudaryta iš jungiamosios (rišiklis) ir armuojamosios (plaušai) fazių (Naujokaitis 2007). Tokio tipo pluoštinės izoliacinės medžiagos struktūra yra savita, o jų savybės įvairiomis kryptimis dažniausiai nevienodos (Structure of materials... 2007).

Struktūriškai mineralinė vata gali būti apibūdinama kaip erdvinė sistema, sudaryta iš daugybės tam tikra tvarka išsidėsčiusių vienas kito atžvilgiu ir susipynusių plaušų, tarpusavyje (dažniausiai plaušų kontaktų vietose) sujungtų rišikliu. Blagojevič *et al.* (2004) teigia, kad pagaminto produkto kokybė priklauso nuo plaušų struktūros ir neišplaušintų dalelių kiekio vatoje. O plaušai vertinami pagal jų storį (skersmenį) ir ilgį bei atitinkamą jų santykio svyravimą.

Gusevo ir Neprošino (Гурьев, Непрошин 2007) teigimu, gaminių kokybė priklauso nuo gamybos technologijos ir medžiagos struktūros ypatumų. Nes pavieniai elementarieji plaušai, jų erdvinės orientacijos gaminio tūryje pobūdis, rišamosios medžiagos lemia termoizoliacinių medžiagų struktūrą ir pagrindines gaminių savybes: tankį, stiprį, šilumos laidumą (Ohmura *et al.* 2002; Erchiqui *et al.* 2005). Taigi mineralinės vatos gaminiai turi būti tiriami mikro- ir makrostruktūros lygiais.

1.4.1. Mikro- ir makrostruktūros tyrimai

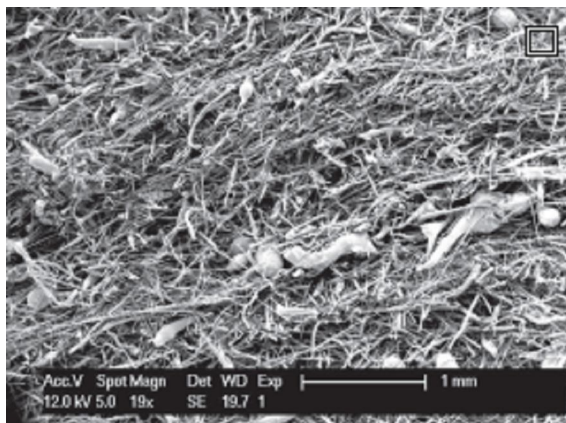
Mikrostruktūra paprastai tirama taikant mikroskopinius tyrimo metodus. Pirmieji mikroskopiniai plaušų tyrimai buvo atlikti praėjusio amžiaus 3-iajame dešimtmetyje (Mennerich 1936).

Mineralinę vatą tiriant mikroskopiniu lygiu (naudojantis optiniu ir (arba) elektroniniu mikroskopu) aiškiai matomi plaušai, tačiau, kaip nurodo Strazdas (1998), analizė mikroskopu leidžia matyti ir neišplaušintų dalelių tarpų formą bei skersmenį, kontaktus tarp plaušų, žvynelių, dulkių tarpus, tuštumas ir sutankinto plaušo zonas gaminiuose (1.5 pav.).

Paprastai mikroskopiniais tyrimais nustatomi mineralinės vatos pavienių plaušų linijiniai (storis, ilgis) matmenys (Talbot *et al.* 2000), jų paviršiaus plotas (Скокина, Ворончихина 2002), kontaktų (susiklijavimo plotas, kampai ir pan.) ypatumai (Pourdeyhi *et al.* 2006; Malmberg *et al.* 2008) bei stebimas plaušų paviršius, fiksuojami pokyčiai įvairių bandymų (pvz., tiriant jų ilgaamžiškumą) metu (Kerienė 2005). Publikacijose (Ширококордюк 2005; Ширококордюк 2007a) teigiama, kad mineralinės vatos mikrostruktūra didžiausią įtaką daro šiluminėms gaminių savybėms.

Laidumo orui priklausomybė nuo mikrostruktūros (poringumo, plaušų storio, sąlyginio paviršiaus, tarpų) aprašyta publikacijose (Tarnow 2002; Tomadakis, Robertson 2005; Шофхер 2009). Jose teigiama, kad gaminiai su

plonesniais, vienodesnio storio plaušais ir mažesniu neišplaušinto lydalo tarpų kiekiu pasižymi didesne orine varža. Didėjant plaušų storiui ir ekvivalentiniam porų dydžiui didėja ir šilumos laidumo koeficientas.



1.5 pav. Plaušai ir neišplaušinto lydalo tarpai (Hild *et al.* 2009)

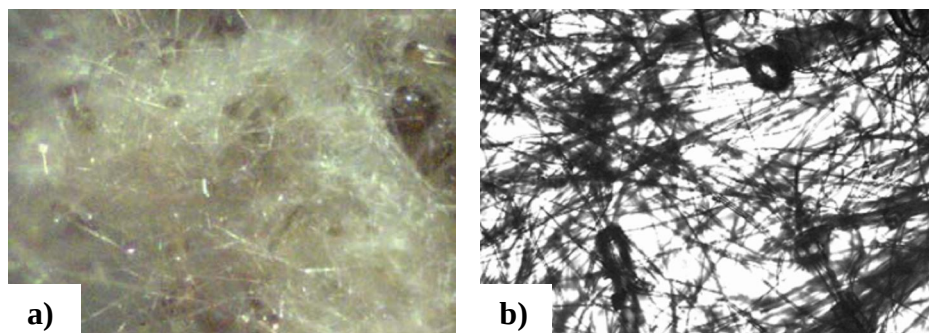
Fig. 1.5. Fibres and non-fibrous melt insertions (Hild *et al.* 2009)

Tačiau atliekant tyrimus įvairiais mikroskopiniais prietaisais dažnai susiduriama su analizuojamos struktūros riboto ploto problema. Atlikti stebėjimai leidžia nustatyti ir apibūdinti tik smulkausius pluoštinio gaminio mikrostruktūros ypatumus ir geriausiu atveju apimančius keliolika plaušų arba 3–5 mm² plotą (1.6 pav.).

Dėl to mineralinės vatos struktūroje dominuojančių plaušų ar kryptingos jų dalies išsidėstymo nepavyksta išvelgti. Norint analizuoti pluoštinių medžiagų makrostruktūras, būtina pasitelkti kitus tyrimo metodus ir prietaisus.

Pastarąjį dešimtmetį pradėti naudoti erdviniai (trimačiai) plaušų ir jų orientacijos struktūroje pasiskirstymo nustatymieji tyrimai. Pirmieji taikyti bandymo metodai, įranga ir preliminarūs rezultatai pateikiami daugelyje publikacijų (Zhu *et al.* 1997; Yang, Lindquist 2000; Zak *et al.* 2001; Kawamura *et al.* 2005; Badel *et al.* 2008), tačiau dėl didelių tyrimų sąnaudų, labai brangios bei riboto prieinamumo įrangos tokių tyrimų nėra atliekama daug.

Medžiagos makrostruktūra – tai sandara, kurios elementų ar porų dydžiai yra apie 10⁻⁵–10⁻³ m, todėl ji gali būti tiriama naudojant nedaug didinančias optines priemones arba be jų (Рыбьев 2003). Vizualinė apžiūra leidžia atskirti mineralinės vatos gaminius pagal plaušų orientaciją struktūroje. Aiškiai įžiūrimas plaušų ar jų grupių kryptingumas, struktūros nevienalytiškumas (sritys su mažu kiekiu ar visai be organinių medžiagų) bei sukietėję didesni neišplaušintų dalelių tarpai.



1.6 pav. Plaušų struktūros fragmentai: a – vaizdas optinio mikroskopo okuliare (didinimas $\times 200$ kartų) (Ильцовrap 2007); b – mikroskopo nuotrauka (didinimas $\times 80$ kartų) (Vrána 2007)

Fig. 1.6. Fragments of fibre structure: a – an image from the ocular lens of an optical microscope (magnified 200 times) (Ильцовrap 2007); b – a microscopic photograph (magnified 80 times) (Vrána 2007)

Järlevä *et al.* (1984) teigia, kad pluoštinių kompozitų struktūra yra labai sudėtinga, tad ją sunku aprašyti kokiais nors struktūriniais parametrais. Tačiau dėl technologijos pažangos vis dažniau pluoštinių medžiagų makrostruktūrai fiksuoti ir analizuoti pasitelkiamos skaitmeninės bei kompiuterinės priemonės.

Makrostruktūros (didesnių plotų) analizė gali būti atliekama (Drobina, Macinio 2006) paviršių skenavimo ir vaizdų analizavimo technika. Skenuoti naudojami plokštiniai skaitytuvai, o vaizdų analizei pasitelkiamos jau sukurtos kompiuterinės programos. Naudojantis įvairaus tipo skaitytuvais galima perkelti įvairaus dydžio (iki 420×210 mm) skenuotus vaizdus, taip išsprendžiama nepakankamo analizuojamo ploto problema.

1.4.2. Makrostruktūros parametrų identifikavimas

Makrostruktūros identifikavimas ir plaušų orientacijos matavimo metodai pradėti taikyti ir iki šiol daugiausiai naudojami tekstilės pramonėje. Lindsley (1951) ir Frederick (1953) publikacijose pateikiami plaušų orientacijos nustatymo tyrimų rezultatai ir plaušų išdėstymo krypties keitimo įtaka medžiagų savybėms. Instrumentiniai struktūros parametrų ir analizavimo tyrimai aprašyti darbuose (Ehrler *et al.* 1974; Jose *et al.* 1986; Wood, Hodgson 1989) parodant, kad pasitelkus struktūros vaizdų metodus galima optimizuoti gamybos procesus ir gerinti kokybinius gaminamų medžiagų parametrus.

Atlikus paskelbtų publikacijų apie mineralinės vatos ar panašių medžiagų struktūros parametrų tyrimus, taikant vaizdų atpažinimo metodus, paiešką rasta nedaug tyrimų ir spausdintos medžiagos šia tema. Išanalizavus literatūrą galima išskirti tokius rodiklius, naudojamus makrostruktūrai (ar paviršinei tekstūrai) aprašyti:

1. **Parametras $I_{so}(n)$** – naudojamas struktūriškai nevienalyčių paviršių anizotropiškumui išreikšti (Germain *et al.* 2003). Šis parametras apibūdinamas vektoriaus lokaline variacija, kuri nusako tekstūros orientaciją duotojo dydžio skalėje n . Dominuojanti kryptis nustatoma pasitelkus vidutinio kryptingumo vektoriaus (*Directional Mean Vector*) metodą. Skirtingos $I_{so}(n)$ reikšmės pateikiamos grafike kreivės pavidalu apskaičiavus vietinį ir viso ploto anizotropiškumo laipsnius. Didelis $I_{so}(n)$ laipsnis parodo dominuojančią tekstūros anizotropiją, o mažas – izotropiją.

2. **Krypties vektorius $\vec{p}$** – naudotas pavienių plaušų orientacijai išreikšti (Rao *et al.* 1991). Šis vektorius atitinka geometrinę plaušo padėtį atitinkamos ašies atžvilgiu. Kadangi plaušų orientacija analizuojama plokštumoje (2D), tai krypties vektorių sudaro komponentai p_1 ir p_2 , atitinkantys posvyrio kampą ϕ ašies x atžvilgiu (1.1):

$$\vec{p} = \left\{ \frac{p_1}{p_2} \right\} = \left\{ \frac{\cos \phi}{\sin \phi} \right\}, \quad (1.1)$$

Taigi, keičiantis plaušų orientacijos kampui, iš karto keičiasi ir vektoriaus komponentų padėties koordinačių ašies atžvilgiu.

3. **Anizotropijos tenzorius (T)** – nusako vietinę struktūros anizotropiją. Analizei taikomas skaitmeninis vaizdo koreliacijos (*Digital Image Correlation*) metodas (Hild *et al.* 2002; Besnard *et al.* 2006), kai analizuojamos pažymėtos skirtingo atspalvių zonos, išsidėsčiusios įvairiomis kryptimis. Elemento anizotropiškumas apibūdinamas anizotropijos tenzoriaus T nuokrypiu nuo pagrindinės ašies tikrosios krypties. Bergonnier ir kt. publikacijose (2005a, 2007) nėra pateikta absoliutinių T dydžių, o tik konstatuojama, kad tirta stiklo vata pasižymi stipriu vietiniu anizotropiškumu.

Pažymėtina, kad aprašytą skaitmeninį vaizdo koreliacijos metodą mokslininkas F. Hild ir kt. taiko aktyviai tirdamas mineralinės vatos deformavimosi procesus mechaninių bandymų metu. Publikacijose (Bergonnier *et al.* 2005b; Witz *et al.* 2008) pateikiami tyrimų metu nustatyti makrostruktūros pokyčiai, vykstantys bandymų metu nevienalytiškumo ir vietinės deformacijos zonose. Nustatytos heterogeniškos medžiagos tekstūros įtaka vietinio tamprumo savybėms ir apskaičiuotos elastingumo konstantos.

4. **Anizotropijos laipsnis (AD)** charakterizuoja dvimačio paviršiaus tekstūros anizotropiškumą (Lemineur *et al.* 2006). AD išreikšti naudojama kampų variacijos analizė: sudarant polinę diagramą kas 45° , nubraižant elipses ir apskaičiuojant pagrindinės ir pagalbinės elipsės ašį santykį. Aprašyti galimi šeši skaičiavimo metodai, kurie adekvačiai tinka anizotropijai išreikšti. Jei $AD = 1$, vadinasi, paviršius izotropiškas, o jei $AD > 1$, tai anizotropiškas (kuriam didėjant auga anizotropijos laipsnis).

5. **Konstruktinis kokybės koeficientas (KKK)** – nusako kokybinį sąryšį tarp medžiagos stiprumo ir tankio. Kuo KKK didesnis, tuo geresnis medžiagos techninis efektyvumas (Рыбьев 2003). Kadangi mineralinės vatos plokščių stiprumo charakteristikos priklauso nuo tankio ir struktūros, tai Šiokorodiuok (Шиокородиук 2007b) manymu, KKK yra tinkamas termoizoliacinių medžiagų struktūrai apibūdinti. Apskaičiuota, kad skirtingos plaušų orientacijos ir tankio gaminiuose KKK kinta (nuo 0,37 iki 0,79) ir yra stiprus koreliacinis ryšis tarp KKK bei gniuždymo stiprio ($R = 0,95\text{--}0,97$). Tai patvirtina, kad gniuždymo stiprį lemia plaušų orientacija mineralinės vatos plokščių struktūroje.

6. **Rodikliai Tau (T) ir $Kappa$ (K)** – apibūdina dominuojančią plaušų orientaciją (Dyrbøl 1998). Rodiklis T apibrėžia vietinį struktūros organizuotumą (t. y. struktūros kryptingumo egzistavimą). K rodiklis nusako įvairių kampų pasiskirstymo laipsnį tiriamojoje struktūroje. Rodikliai gaunami nuskenavus kiekvieno atitinkamo skerspjūvio dalis per visą sluoksnio storį ir atliekant duomenų sparčiąją Furjė transformaciją (Larsen, Hansen 1997).

Didelė T reikšmė rodo gerą struktūros orientacijos laipsnį, o maža arba artima 1 reikšmė rodo, kad orientacijos negalima apibrėžti. Jei išmatuotas didelis K , tai rodo kampų išsidėstymą siaurame intervale, o mažas K dydis nusako platų kampų pasiskirstymo laipsnį. Pavyzdžiui, plokščiam paviršiui išmatuoti maži T ir K rodikliai parodo, kad orientacijos negalima apibrėžti ir kampai pasiskirsto plačiame intervale. Nustatyta, kad optimalus akmens vatos plokščių rodiklių dydis yra: kai T kinta nuo 1 iki 5, o K atitinkamai nuo 1 iki 40. Tačiau gali būti nustatomi ir didesnio dydžio rodikliai priklausomai nuo plaušų orientacijos, tankio ir kt. T rodiklį galima sumažinti padarius plaušų struktūrą kuo chaotiškesnę (Dyrbøl 1998; Clausen, Jacobsen 2003).

Apibendrinant išvardytus rodiklius ir parametrus galima daryti išvadą, kad jie naudojami labai skirtingai: parametras I_{so} (n) ir anizotropijos laipsnis (AD) apibrėžia tik paviršiaus tekstūros kryptingumą, t. y. anizotropiškumą, taigi gali būti naudojami natūralioms ir dirbtinėms kompozitinėms medžiagoms pagal paviršių klasifikuoti ar skirstyti pagal tekstūrą. Krypties vektorius išreiškia pavienių plaušų orientaciją. Naudojant anizotropijos tenzorį T galima nustatyti

struktūros pokyčius, vykstančius medžiagoje gniuždymo ar tempimo metu ir užfiksuoti labiausiai besideformuojančias (yrančias) zonas. KKK koeficientas naudojamas medžiagos fizinių ir mechaninių savybių suderinamumui apibūdinti ir efektyvaus naudojimo konstrukcijose laipsniui išreikšti.

Rodikliais Tau (T) ir Kappa (K) galima apibūdinti mineralinės vatos plokštę sudarančių plaušų orientaciją. Skirtingos T ir K reikšmės nusako plaušų organizuotumo laipsnį ir jų išsidėstymo struktūroje unikalumą. Nustačius šiuos rodiklius galima kontroliuoti plaušų orientaciją gamybos proceso metu. Taip pat T rodiklio dydis ir jo skirtumai buvo susieti su sutelktosios apkrovos dydžiais.

Šiems ir kitiems rodikliams skaičiuoti dažniausiai naudojamos tyrėjų sukurtos kompiuterinės programos, todėl jų neturint sunku atlikti lyginamuosius makrostruktūros įvertinimo ar skaičiavimo bandymus naudojant tuos pačius vaizdus ar pradinius duomenis. Taip pat nerasta duomenų apie atliktus kompleksinius tyrimus, kurių metu būtų tirtas pluoštinių kompozitų fizinių ir mechaninių savybių kiekybinis ryšys su makrostruktūra ar paviršiaus tekstūra.

1.5. Literatūrinės apžvalgos apibendrinimas

Išanalizavus įvairius literatūros šaltinius, susijusius su mineralinės vatos gaminių struktūra ir stiprumo savybėmis randama palyginti nedaug naujų publikacijų iš mineralinės vatos struktūros ir savybių tyrimų srities. Tai greičiausiai susiję su tuo, kad mineralinę vatą gamina praktiškai keli pasaulinio lygio komerciniai koncernai, kurie savo tyrimų ir vystymo centruose gautų rezultatų viešai neskelbia, o išradimus šioje srityje apsaugo pasitelkę intelektinės nuosavybės teises (patentus).

Pastarųjų dešimtmečių technikos pažanga ir pokyčiai statybos darbų rinkoje (pvz., noras maksimaliai sumažinti darbų sąnaudas, paspartinti statybos eigą) išprovokavo atsisakyti daugiasluoksnių stogo konstrukcijų ir paskatino naudoti tokias naujoves, kaip viensluoksnės polimerinės stogo dangos ir membranos, įteisino efektyvias ir sparčias mechaninių stogo dangos tvirtinimo technologijas (Hutchinson, Roberts 2003). Dėl to buvo sukurta ir įdiegta sluoksniuotos struktūros mineralinės vatos plokščių gamyba, racionalizuotos šiuolaikinės stogų dengimo technologijos.

Nors mineralinio pluošto medžiagos gaminamos daugiau kaip pusantro šimto metų, iki šiol jos yra gana sudėtingas objektas tiriant savybes, nes tai daugiausia lemia jų mikro- ir makrostruktūros ypatybės: dominuojanti plaušų ar jų grupių orientacija struktūroje; tankis ir jo vienalytiškumas gaminyje;

organinių medžiagų kiekis ir kt. Taip pat ne mažiau svarbus ir naudojamų gaminių iš mineralinės vatos savybių pokyčių nustatymas ir prognozavimas.

Pastaraisiais metais gerokai išaugus mineralinės vatos gaminių naudojimo apimčiai (ypač plokščiųjų stogų atitvarinėse konstrukcijose) ir didėjant termoizoliacijos poreikiui būtina:

- kiekybiškai identifikuoti mineralinės vatos plaušų orientaciją struktūroje;
- nustatyti makrostruktūros rodiklius ir juos susieti su mineralinės vatos gniuždymo stiprio savybėmis;
- nustatyti šiuo metu gaminamų skirtingos struktūros mineralinės vatos gaminių gniuždymo stiprio ir deformacinės savybės;
- ištirti sluoksniuotos struktūros mineralinės vatos plokščių ir atskirų jos sluoksnių įtaką gniuždymo rodikliams;
- nustatyti eksploatacinių veiksnių poveikį mineralinės vatos plokščių gniuždymo įtempio ir sutelktosios apkrovos pokyčiui modeliuotomis laboratorinėmis ir eksploatacinėmis sąlygomis.

Tyrimų metodika ir medžiagos

2.1. Prietaisai, bandymų metodika ir eiga

2.1.1. Bandinių matmenys ir paruošimas

Visiems bandymams (išskyrus organinių medžiagų kiekiui nustatyti) buvo naudoti juostiniais pjūklais išpjauti kvadrato formos bandiniai, kurių kraštinių matmenys 200×200 mm arba 300×300 mm. Bandinių storis buvo toks pats kaip pagaminto gaminio. Storis nustatytas vadovaujantis LST EN 823 (1997) standartu.

Linijiniai matmenys buvo matuojami 0,5 % tikslumu pagal standarto LST EN 12085 (2002) reikalavimus.

Gniuždymo įtempio ir (arba) stiprio gniuždant bandymams naudotų bandinių paviršiai buvo paruošiami, t. y. šlifuojami pašalinant konvejerinio tinklo suformuotas įspaudas.

Bandymai buvo atliekami 23 ± 5 °C temperatūros ir 50 ± 5 % santykinio drėgnumo aplinkoje. Bandymams naudojamų bandinių nereikia specialiai kondicionuoti (tačiau prirėikus bandiniai iki bandymo išlaikomi mažiausiai 6 val. 23 ± 5 °C temperatūroje ir 50 ± 5 % santykinio drėgno sąlygomis).

2.1.2. Tankio nustatymas

Mineralinės vatos tankis priklauso nuo vidutinio plaušų storio, neišplaušintų tarpų kiekio ir suspaudimo laipsnio (Strazdas 1998). Norminiuose dokumentuose termoizoliaciniams mineralinės vatos gaminiams nkeliami reikalavimai gaminių tankiui, nes yra susiformavusi nuomonė, kad skirtingų gamintojų net to paties tankio gaminiai pasižymės skirtingomis savybėmis (LST EN 13162:2009).

Tačiau gaminio tankio nustatymas, kaip netiesioginis bandymas, atliekamas gamintojo vidinės gamybos kontrolės metu, nes iš gautų rezultatų galima spręsti apie kitas fizines (šilumos laidumo, degumo charakteristika) ir mechanines (gniuždymo ir (arba) tempimo stipris) gaminio savybes.

Bandinių tankis (ρ) nustatytas pagal LST EN 1602 (1998) standarte nurodytą metodiką ir apskaičiuotas pagal (2.1) formulę:

$$\rho = 10^6 \frac{m}{l \cdot b \cdot d}, \text{ kg/m}^3, \quad (2.1)$$

čia: m – plokščių arba bandinių masė, g; l – plokščių arba bandinių ilgis, mm; b – plokščių arba bandinių plotis, mm; d – plokščių arba bandinių storis, mm.

Linijiniai bandinių matmenys buvo matuojami 0,5 % tikslumu, o masė nustatyta sveriant elektroninėmis svarstyklėmis (paklaida $\pm 0,5$ g).

2.1.3. Gniuždymo įtempio ir (arba) stiprio gniuždant nustatymas

Bandinių gniuždymo įtempis ir (arba) stipris gniuždant buvo nustatomas pagal standarto LST EN 826 (1998) reikalavimus. Paruoštas bandinys buvo gniuždomas taip, kad jo gniuždomasis paviršius būtų statmenas apkrovos veikimo kryptčiai, o gniuždymas vyktų vertikalia ašimi. Pradinė bandinių apslėgimo apkrova – 250 ± 10 Pa. Bandymas atliekamas gniuždymo apkrovą didinant pastoviu 0,1 d/min greičiu su ± 25 % nuokrypiu (čia d – bandinių storis, mm). Atliekant bandymus nubraižytos jėgos ir deformacijos kreivės, rodančios deformacijos priklausomybę nuo jėgos. Jėgos ir deformacijos kreivės suteikia papildomos informacijos apie gaminio būseną gniuždymo bandymų metu.

Gniuždymo bandymams atlikti naudotas kompiuterizuotas universalus veikimo tempimo ir gniuždymo „UTC 50 kN“ (Danija) presas (2.1 pav.). Jėgos matuoklio ir nuskaitymo paklaida yra ≤ 1 %, o deformacijų poslinkio matavimo ir nuskaitymo tikslumas yra $\pm 0,1$ mm.



2.1 pav. Gniuždymo bandymų metu naudotas presas „UTC 50 kN“

Fig. 2.1. UTC 50 kN compression testing machine used in test

Bandymų metu buvo nustatomas gniuždymo įtempis arba stipris gniuždant. Jei gniuždymo metu bandinys pasiekia 10 % ir didesnę deformaciją, tokiu būdu apskaičiuojamas ir pateikiamas gniuždymo įtempis (σ_{10}) esant 10 % deformacijai (2.2 pav., 1). Jei bandinys suyra nepasiekęs 10 % deformacijos, nustatoma didžiausia jėga ir apskaičiuojamas stipris gniuždant (σ_m) (2.2 pav., 2). Bandinio 10 % deformacija (ε_{10}) pradedama matuoti nuo pradinės deformacijos atskaitos taško (N_0), kuris gaunamas pridendant liestinę (L_1) prie stačiausios tiesinės jėgos ir deformacijos kreivės dalies bei ją pratęsiant iki jėgos (F_p) nulinės ašies (2.2 pav.).

Gniuždymo įtempis σ_{10} , esant 10 % deformacijai, apskaičiuojamas nustačius jėgą F_{10} , kurios veikiamas bandinys pasiekia ε_{10} deformaciją pagal (2.2) formulę:

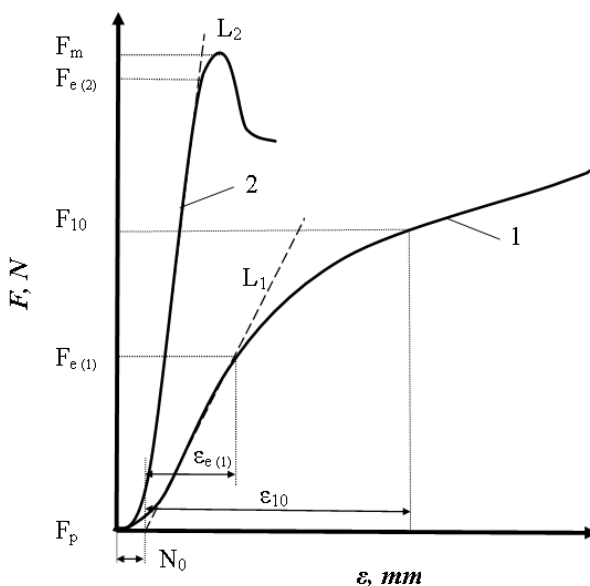
$$\sigma_{10} = 10^3 \frac{F_{10}}{A_0}, \text{ kPa}, \quad (2.2)$$

čia: F_{10} – bandinio jėga, kai deformuojama 10 %, N; A_0 – bandinio pradinis skerspjūvio plotas, mm^2 .

Stipris gniuždant (σ_m) apskaičiuojamas pagal (2.3) formulę:

$$\sigma_m = 10^3 \frac{F_m}{A_0}, \text{ kPa}, \quad (2.3)$$

čia: F_m – didžiausia išmatuota jėga, N; A_0 – bandinio pradinis skerspjūvio plotas, mm^2 .



2.2 pav. Bandinių jėgos ir deformacijos kreivės: 1 – gniuždymo įtempio esant 10 % deformacijai; 2 – stiprio gniuždant

Fig. 2.2. Force-deformation curves of test specimens: 1 – compression stress at 10% deformation; 2 – compression strength

Norint palyginti skirtingos struktūros mineralinės vatos gaminių stiprumo savybes (kai vienų bandinių nustatytas gniuždymo įtempis, esant 10 % deformacijai (σ_{10}), o kitų stipris gniuždant (σ_m)), buvo naudojamas gniuždymo ribinis įtempis (σ_e). Gniuždymo ribinis įtempis yra nustatomas tamprumo zonoje, kai jėga ir deformacija didėja proporcingai (tiesiškai). σ_e nustatomas takumo ribos pabaigoje ir atitinka ϵ_e deformaciją (t. y. tiesinė kreivės „jėga ir deformacija“ priklausomybė), nes nusako tampriųjų (grįžtamųjų) deformacijų ribą, kurią viršijus medžiaga ima irti bei prasideda negrįžtami struktūriniai pokyčiai (Žiliukas 2008).

Gniuždymo ribinis įtempis tamprumo zonoje (σ_e) apskaičiuojamas pagal (2.4) formulę:

$$\sigma_e = 10^3 \frac{F_e}{A_0}, \text{ kPa}, \quad (2.4)$$

čia: F_e – bandinio jėga tamprumo zonos pabaigoje, N; A_0 – bandinio pradinis skerspjūvio plotas, mm^2 .

2.1.4. Sutelktosios apkrovos nustatymas

Sutelktosios apkrovos bandymas buvo atliekamas pagal standarte (LST EN 12430:2000) aprašytą metodiką. Paruoštas bandinys buvo dedamas taip, kad jo paviršius būtų statmenas apkrovos kryptiai ir apslegiamas $2,5 \pm 0,25$ N jėga arba tai atitinkančia 500 ± 50 Pa apkrova.

Bandinys apkraunamas sutelktąja-taškine gniuždymo apkrova, veikiančia 50 cm^2 bandinio paviršiaus plote, tam naudojamas $79,8 \pm 0,1$ mm skersmens metalinis cilindras (2.3 pav.).



2.3 pav. Sutelktosios apkrovos bandymas

Fig. 2.3. Point load test

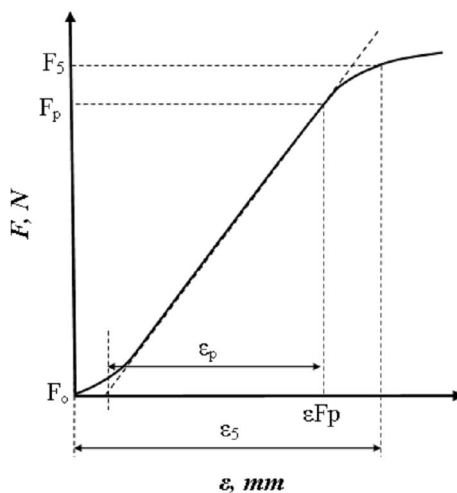
Gniuždymo apkrova didinama pastoviu 50 ± 5 mm/min greičiu. Bandymo metu buvo matuojama jėga ir bandinio deformacija bei užrašoma jėgos ir deformacijos kreivė (2.4 pav.).

Bandymas atliekamas iki tol, kol pasiekiamas kritinis (F_p) taškas (t. y. pasiekama medžiagos takumo riba gniuždant arba suirtis) arba kai gaminyje deformuojasi 20 %.

Tačiau pagal standarto (LST EN 13162:2009) 4.3.5 punktą mineralinės vatos gaminių sutelktoji apkrova (F_p) matuojama ir deklaruojama esant 5 mm deformacijai (2.4 pav.).

Bandymai atlikti naudojantis kompiuterizuotu universalaus veikimo tempimo ir gniuždymo „UTC 50 kN“ (Danija) presu (2.3 pav.).

Jėgos matuoklio ir nuskaitymo paklaida yra ≤ 1 %, o deformacijų poslinkio matavimo ir nuskaitymo tikslumas yra $\pm 0,1$ mm.



2.4 pav. Bandinių jėgos ir deformacijos kreivė sutelktosios apkrovos bandymo metu

Fig. 2.4. Force-deformation curve of test specimens during point load test

2.1.5. Klimatiniai bandymai veikiant aukštai temperatūrai ir drėgmei

Klimatinių poveikių imitavimas dažnai vadinamas klimatinio sendinimo bandymu, kai tiriamoji medžiaga nustatytą laiką vienu metu veikiama aukštos ar žemos temperatūrų bei didelės drėgmės, t. y. sudaromos ekstremalios sąlygos.

Bandymai buvo atliekami pagal NT Build 434 (1995) aprašytą metodiką. Iš paruoštų plokščių išpjunami du (greta vienas kito) kvadratiniai 300×300 mm dydžio bei nominalaus gaminio storio bandiniai. Visi bandiniai kondicionuojami iki bandymo juos išlaikant 24 val. 23±2 °C temperatūroje ir 50±5 % santykinio drėgnumo sąlygomis. Vieno iš bandinių iš karto nustatomas gniuždymo įtempis (σ_{10}), kai bandinys deformuojamas 10 %, o kitas bandinys talpinamas į klimatinę kamerą (2.5 pav.), kurioje palaikoma pastovi 70±2 °C temperatūra ir 95±5 % santykinis drėgnis.

Klimatinėje kameroje nustatytais sąlygomis bandiniai išlaikomi 168±3 val. Iš klimatinės kameros išimti bandiniai vėl 24 val. laikomi 23±2 °C temperatūroje ir 50±5 % santykinio drėgmo sąlygomis. Jei nustatoma, kad bandinių masė padidėjo daugiau kaip 10 g, jie džiovinami 105 °C temperatūroje iki kol nusistovės masės pusiausvyra ir skirtumas nesieks ±3 g. Toliau atliekami gniuždymo įtempio (σ_{10}), kai bandinys deformuojamas 10 %, bandymai ir išmatuojami dydžiai po klimatinio sendinimo.



2.5 pav. Klimatinė kamera (vaizdas iš vidaus)

Fig. 2.5. Climatic chamber (inside view)

Bandymų rezultatams išreikšti naudotas gniuždymo įtempio atsparumo senėjimui ($\sigma_{10}(AR)$) rodiklis (2.5 formulė). Jis parodo procentinį gniuždymo įtempio, esant 10 % deformacijai, dydžio pokytį po sendinimo ($\sigma_{10, A}$), lyginant su tuo dydžiu be sendinimo (σ_{10}):

$$\sigma_{10}(AR) = \frac{\sigma_{10, A}}{\sigma_{10}} \cdot 100, \% \quad (2.5)$$

čia: $\sigma_{10, A}$ – išmatuotas gniuždymo įtempio, esant 10 % deformacijai, dydis po sendinimo, kPa; σ_{10} – bandinio gniuždymo įtempio, esant 10 % deformacijai (be sendinimo), dydis, kPa.

2.1.6. Dinaminio varginimo poveikis

Dinaminės apkrovos poveikiui (dinaminiam varginimui) imituoti buvo naudota specialios konstrukcijos JW varginimo mašina. Šioje mašinoje bandiniai buvo dedami taip, kaip jie montuojami normaliomis sąlygomis atitvarose.

Bandinių paviršius 16 metalinių puansonų (kurių kiekvieno skersmuo $79,8 \pm 0,1$ mm) cikliškai kas $2 \pm 0,6$ sekundes po 15 kartų (1 ciklo trukmė – apie 41 s) buvo spaudžiamas kartotine 147 ± 2 kPa apkrova. Apkrovos dydis parinktas atsižvelgiant į dinamines apkrovas, susidarančias dėl vidutinio svorio žmogaus vaikščiojimo (Огрызова 2006).

Laikoma, kad puansono skersmuo atitinka pėdos kulno plotą (apie 50 cm^2), taigi įranga dirbtinai veikia bandinį tokiu pat būdu, kaip jis veikiamas mindant naudojimo metu (2.6 pav.).



2.6 pav. Dinaminės apkrovos bandymo mašina ir pats bandymas

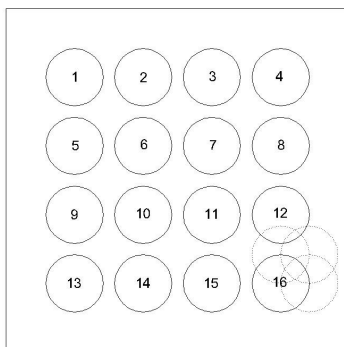
Fig. 2.6. Dynamic fatigue machine and test

Visą bandymą sudaro keturi ciklai, po kiekvieno ciklo bandinys pasukamas į kitą kampą, kad bandinio paviršius būtų visame plote paveiktas dinaminės apkrovos (2.7 pav.).

Bandymai atliekami tokia tvarka:

- iš tos pačios bandiniams paruoštos plokštės išpjunami 300×300 mm ir 600×600 mm dydžio kvadratiniai ir nominalaus gaminio storio bandiniai;
- 300×300 mm dydžio bandiniai naudoti sutelktosios apkrovos bandymams, o 600×600 mm dydžio bandiniai buvo veikiami dinamine apkrova;
- po dinaminio varginimo bandymo 600×600 mm dydžio bandiniai apipjaunami (iš visų keturių kraštų nupjaunant po 150 mm, kad liktų tik vidurinė dalis) iki 300×300 mm dydžio bandinių.

Šie 300×300 mm dydžio bandiniai ir buvo naudoti bandymams, siekiant nustatyti sutelktosios apkrovos pokyčius dėl dinaminio varginimo poveikio.



2.7 pav. Cikliško puansonų veikiamo bandinių paviršiuje schema

Fig. 2.7. Scheme of cyclic pistons acting on surface of test specimens

Bandymų rezultatams išreikšti naudotas sutelktosios apkrovos dinaminio atsparumo $\sigma_{PL}(DR)$ rodiklis, rodantis procentinį sutelktosios apkrovos ($F_{5(DL)}$) dydžio pokytį po dinaminio varginimo, lyginant su sutelktosios apkrovos dydžiu be dinaminio varginimo (F_5). Apskaičiuojama pagal (2.6) formulę:

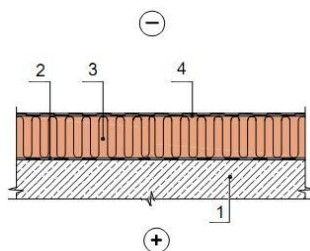
$$\sigma_{PL}(DR) = \frac{F_{5(DL)}}{F_5} \cdot 100, \% \quad (2.6)$$

čia: $F_{5(DL)}$ – išmatuotas bandinio sutelktosios apkrovos dydis po dinaminio varginimo, N; F_5 – bandinio sutelktosios apkrovos (be dinaminio varginimo) dydis, N.

2.1.7. Natūriniai klimatiniai veiksniai matavimai

Siekiant nustatyti klimatinis veiksniai (temperatūrą ir drėgnį), veikiančius termoizoliacinį sluoksnį plokščiojo stogo konstrukcijoje (2.8 pav.), buvo atlikti temperatūros ir santykinės oro drėgmės matavimai realiai egzistuojančiame ir eksploatuojamame pastate Hedehusene mieste (netoli Kopenhagos) Danijoje.

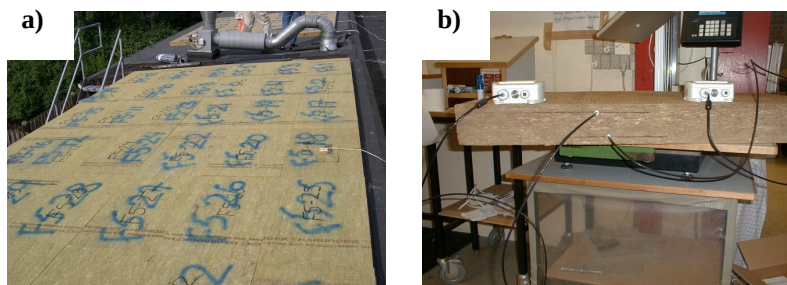
Matavimo duomenys buvo fiksuojami 42 mėnesius (nuo 2005 m. kovo 15 d. iki 2008 m. rugšėjo 10 d.), ir automatiškai į kompiuterio atmintį užrašomi keturis kartus per parą. Iš viso per šį periodą gauta ir užrašyta 4711 matavimų rezultatų.



2.8 pav. Plokščiojo stogo konstrukcijos schema: 1 – stogo pagrindas; 2 – garus izoliuojantis sluoksnis; 3 – termoizoliacijos sluoksnis; 4 – hidroizoliacinė stogo danga

Fig. 2.8. Drawing of low slope roof construction: 1 – roof base; 2 – vapour barrier layer; 3 – thermal insulation layer; 4 – hydroinsulation roofing layer

Temperatūros ir santykinio oro drėgnumo matavimo jutikliai buvo įrengti 100 mm storio termoizoliaciniame sluoksnyje iš akmens vatos plokščių (2.9 pav., a). Siekiant tiksliau išmatuoti duomenis ir fiksuoti klimatinės veiksniai poveikį visam termoizoliaciniam sluoksniui, jutikliai išdėstyti viršutinėje ir apatinėje termoizoliacijos sluoksnio dalyse (2.9 pav., b).



2.9 pav. Akmens vatos plokštės plokščiojo stogo konstrukcijoje:
 a – bendras vaizdas; b – jutiklių išdėstymas termoizoliaciniame sluoksnyje
Fig. 2.9. Stone wool slabs in the low-slope roof structure: a – general view;
 b – locations of sensors in the thermal insulation layer

2.1.8. Organinių medžiagų kiekio (kaitinimo nuostolių) nustatymas

Mineralinės vatos gaminio sudėtyje esančių organinių medžiagų (rišamųjų dervų, hidrofobinių tepalų) kiekis nustatytas pagal LST EN 13820 (2003) standartą. Bandymo metu buvo matuojami bandinių masės pokyčiai, bandinių fragmentus iškaitinus 500 ± 20 °C temperatūroje mažiausiai 120 minučių. Bandiniai organinių medžiagų kiekiui nustatyti buvo imami iš kelių skirtingų bandinio vietų (atmetant pakraščius). Kiekvieno bandinio masė (mažiausias kiekis – 20 g) prieš bandymą nustatoma sveriant ir patalpinama į kaitinimo krosnį (2.10 pav.), o paskui, po kaitinimo, medžiagos likučiai atvėsunami iki aplinkos temperatūros ir vėl pasveriami. Svarstyklių tikslumas – 0,001 g.



2.10 pav. Kaitinimo krosnis
Fig. 2.10. Heating oven

Bandinyje esančių organinių medžiagų dalis apskaičiuota pagal (2.7) formulę:

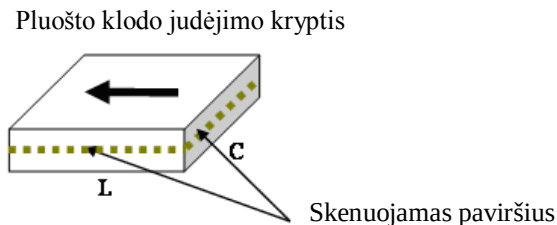
$$M = \frac{m_0 - m_l}{m_0} \cdot 100, \%, \quad (2.7)$$

čia: m_0 – bandinio masė prieš bandymą, g; m_l – bandinio masė po bandymo, g

2.1.9. Paviršiaus skenavimas ir vaizdų analizavimas

Plaušų ir jų grupių orientacijos dominavimas struktūroje nustatytas makrostruktūros skaitmeninio fiksavimo ir analizavimo principu. Mineralinės vatos plokščių paviršiaus per storį fragmentai buvo skenuojami, o užfiksuoti vaizdai perkeliama į kompiuterį. Tuomet kompiuterizuotu skaitmeninių vaizdų analizės metodu tiriama, kaip plaušai išsidėsto.

Bandiniai iš plokščių išpjunami lygiais kraštais ir taip, kad paviršiaus būtų kuo mažiau pašalintas. Prieš skenuojant reikia nustatyti pluošto klogo judėjimo konvejeriu kryptį ir pagal tai sužymėti paviršius: pjūvis L – lygiagrečiai su judėjimo kryptimi, pjūvis C – statmenai judėjimo kryptiai (2.11 pav.).



2.11 pav. Bandinių paviršių žymėjimo ir skenavimo schema

Fig. 2.11. Marking and scanning scheme for surfaces of test specimens

Bandinio kraštai buvo skenuojami plokščiuoju skaitytuvu (naudotasi „Hewlett Packard ScanJet 7400C“) perkeliama paviršinį vaizdą į skaitmeninį paveikslą. Bandinys ant skaitytuvo uždėdamas taip, kad tiriamojo bandinio kraštinė x ašyje sutaptų su skaitytuvo nuskaitymo kryptimi, o bandinio kraštinė y ašyje būtų statmena skaitytuvo skleidžiamos šviesos kryptiai (2.12 pav.).

Nuskaityta skenuojant visą skerspjūvį per bandinio storį. Analizuojami paviršiai skenuoti esant 120–400 dpi raiškai nespalviniu režimu, o vaizdas išsaugojamas 1000×500 vaizdo taškų (pikselių) ar kito dydžio BMP, TIF, GIF ar JPEG formato paveikslu.

Vaizdams apdoroti naudota programa UTHSCSA Image Tool 3.0 for Windows, skirta vaizdų, objektų ir fono analizei mikroskopijos, medicinos, metalurgijos ir daugelyje kitų sričių. Šią programą galima rasti internete adresu: <http://ddsdx.uthscsa.edu/dig/download.htm/>.

Kadangi vertinami nespaltoti vaizdai, jų spalvingumą pilkoje spalvų gamoje sudaro spalvos: nuo juodos spalvos (0 reikšmė) iki baltos (255). Kompiuteriu tiriamajame vaizde pažymimi visi objektai, išsiskiriantys pilkoje spalvų gamoje, o jų užimti plotai nusako makrostruktūros sudedamąsias dalis (karkasą ir poras). Balta spalva žymimi plaušai ir (arba) jų grupės, o poros ir tuštumos yra juodos spalvos. Paprastai balta spalva pažymimi plaušai, tiesiogiai kontaktuojantys su skaitytuvo paviršiumi, kintantis spalvingumas rodo objektų nutolimą nuo paviršiaus arba perėjimą iš vienos struktūrinės sudedamosios dalies į kitą.



2.12 pav. Bandinio paviršiaus nuskaitymas skaitytuvu
Fig. 2.12. Scanning of surface of test specimen by scanner

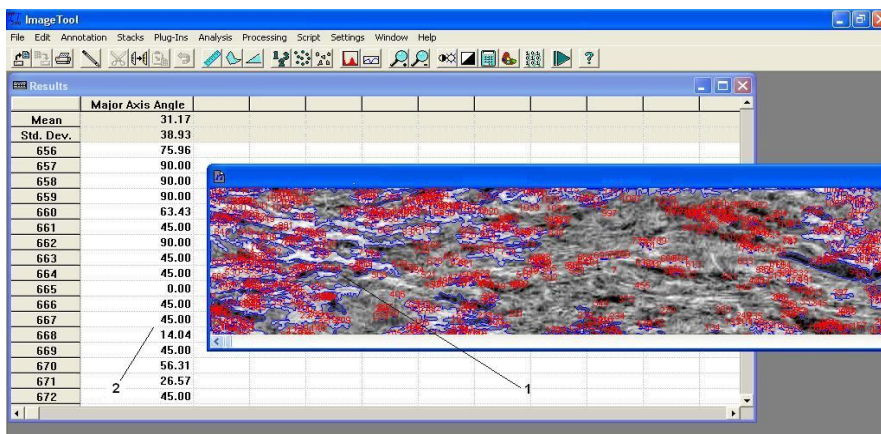
Prieš pradėdant darbą būtina programoje „Image Tool“ pasirinkti atitinkamas nuostatas (*Settings* → *Preferences*).

Vaizdai buvo apdorojami tokia tvarka:

- a) paleidus kompiuteryje instaliuotą programą „Image Tool“, atsidariusiame lange įkeliamas analizuojamas paveikslas (*File* → *Import Image*);
- b) automatiškai reguliuojamas vaizdo ryškumas ir kontrastas (spaudžiant *Show Contrast Control* ir po to *Stretch*);
- c) paveiksle objektai randami ir pažymimi (*Analysis* → *Object Analysis* → *Find Objects*);
- d) atsidariusiame *Find Objects* lange pažymima *Automatic*;

- e) programai skaičiais pažymėjus kiekvieną objektą (2.13 pav., 1), analizė tęsiama skaičiuojant kampus (*Analysis* → *Object Analysis* → *Analyze*);
- f) baigus skaičiuoti lange pasirodo gauti pavieniai išmatuotų kampų rezultatai ir vidutinis jų dydis (2.13 pav., 2).

Toliau atliekame 90° kampu pasukto ir nuskenuoto bandinio paveikslą analizę, vadovaudamiesi a–f punktais.



2.13 pav. Programos „Image Tool“ lango vaizdas: 1 – skenuotame paviršiuje pažymėti analizuojami objektai (charakteringi plaušai ir jų grupės); 2 – skaičiavimo rezultatai: apskaičiuoti kampai ir vidutinis jų dydis

Fig. 2.13. Window view of the programme Image Tool: 1 – selected analysed objects (characteristic fibres and fibre groups) on scanned surface; 2 – calculation results: calculated angles and their average value

Bandymų rezultatams išreikšti naudojamas makrostruktūros rodiklis (S). Jis nusako bandinio plokščiajame pjūvyje (per storį) dominuojančių plaušų ir jų grupių orientacijos kampų išmatuotų x ir x' (šiuo atveju x' yra stamena x) ašyse santykį. S apskaičiuojamas pagal (2.8) formulę:

$$S = \frac{\alpha_x}{\alpha_{x'}} , \quad (2.8)$$

čia: α_x – pjūvyje dominuojančių plaušų išsidėstymo x ašies atžvilgiu vidutinio kampo dydis; $\alpha_{x'}$ – pjūvyje dominuojančių plaušų išsidėstysiusi statmenai x ašiai vidutinio kampo dydis.

2.1.10. Statistinė eksperimentinių rezultatų analizė

Eksperimentų metų gautiems rezultatams grupuoti ir paruošti statistinei analizei naudojama programa „MS Excel“. Siekiant ištirti statistinę priklausomybę tarp tiriamųjų rodiklių, buvo atliekama duomenų regresinė analizė naudojantis „Statistica“ programiniu paketu. Duomenų pasiskirstymo normalumas nustatomas sudarant santykinų dažnių histogramas. Jų išorinis vaizdas leidžia pateikti hipotezę, kad statistinis tyrimų rezultatų pasiskirstymas gali būti apibūdintas normaliuoju skirstiniu su pasikliautinumo lygmeniu $P = 95,0$.

Siekiant gauti funkciją, kuri geriausiai atspindėtų turimus duomenis, buvo tikrinami įvairūs matematiniai modeliai: tiesinis ($y = b_0 + b \cdot x$), kvadratinis ($y = b_0 + b_1 \cdot x + b_2 \cdot x^2$), laipsninis ($y = b_0 \cdot x^b$), eksponentinis ($y = b_0 \cdot e^{bx}$), logaritminis ($y = b_0 + b \cdot \log_{10}(x)$). O funkcijos koeficientai b_0 ir b_1 yra apskaičiuojami taip (Sakalauskas 2003):

$$b_1 = \frac{\overline{xy} - \bar{x} \cdot \bar{y}}{x^2 - \bar{x}^2}, \quad (2.9)$$

$$b_0 = \bar{y} - b_1 \bar{x},$$

Koeficientai parodo, kiek pakinta y , x pakitus vienetu. Jei b_1 teigiamas, tuomet didėjant x didėja ir y , o jei neigiamas, tai atvirkščiai. Koeficientų reikšmingumas tikrinamas pagal p reikšmes (jei p mažesnė nei 0,05 jie reikšmingi).

Priklausomybei išreikšti pasirenkama funkcija, tiksliausiai apibūdinanti duomenų pasiskirstymo pobūdį. Tam skaičiuoti regresinio modelio kokybės rodikliai: koreliacijos (R), determinacijos (R^2) koeficientai turi būti artimiausi vienetui (Sakalauskas 2003).

Modelio tinkamumas buvo vertinamas pagal apskaičiuoto regresijos determinacijos koeficiento (R^2) dydį:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_{isk} - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}, \quad (2.10)$$

čia: y_{isk} – skaičiuotinas tiriamasis dydis, t. y. dydis apskaičiuotas pagal sudarytas empirines lygtis; y_i – eksperimentų metu nustatytas dydis; $\bar{y}$ – eksperimentinių dydžių vidurkis.

R^2 parodo, kiek procentų nagrinėjami tiriamieji veiksniai daro įtaką pagrindiniam kintamajam y . Kuo didesnis determinacijos koeficientas, tuo mūsų gautos nagrinėjamų savybių reikšmės labiau koncentruojasi apie

mažiausiųjų kvadratų metodu gautą kreivę, ir ji geriau tinka eksperimentiniams duomenims aprašyti.

Regresinė analizė taikytina, jeigu $R^2 \geq 0,25$, o jeigu $R^2 < 0,25$, labai abejotina, ar tiesinės regresijos modelis tinka (Čekanavičius, Murauskas 2002; Martinėnas 2004).

Priklausomybės tarp tiriamųjų ryšio stiprumas buvo vertinamas pagal koreliacijos koeficiento (R) skaitinius dydžius. Koreliacijos koeficientas (R) apskaičiuojamas taip (Liukaitis, Kleveckas 2006):

$$R = \sqrt{R^2}, \quad (2.11)$$

Jeigu R koeficiento reikšmė yra tarp 0,90 ir 1, tai tarp tiriamųjų dydžių yra labai stiprus tarpusavio ryšys, kai $0,7 < R < 0,89$ – stiprus ryšys. Kai dydis yra tarp 0,69 ir 0,4, jis yra vidutinio stiprumo, o kai mažiau nei 0,4 – priklausomybė tarp dydžių silpna (Kasiulevičius, Denapienė 2008).

Regresinėje duomenų analizėje buvo naudotas ir vidutinis standartinis nuokrypis (s_e), kuris išreiškiamas kvadratine šaknimi iš normuotos klaidų nuokrypio kvadratų sumos (Sakalauskas 2003):

$$s_e = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n - 2}}, \quad (2.12)$$

s_e parodo vidutinį nuokrypį nuo empirinės regresinės kreivės ir yra pastovus visoms kreivės dalims. Kuo apskaičiuotieji s_e dydžiai mažesni, tuo mažesnis nuokrypis nuo regresinės kreivės.

Regresinės analizės metu buvo sudarytos empirinės lygtys, kurios naudojamos apibūdinti ryšį tarp tiriamojo (rezultatinio požymio) y ir vieno ar eilės kintamųjų. Gautų empirinių lygčių adekvatumas buvo patikrintas pagal Fišerio kriterijų. Taikant kriterijų galima gauti vieną iš dviejų išvadų (Čekanavičius, Murauskas 2002; Kasiulevičius, Denapienė 2008):

- visi gaunami koeficientai lygūs 0, t. y. tiesinės regresijos modelis su gautais dydžiais nesuderinamas (statistinė hipotezė $H_0: b = 0$);
- bent vienas gaunamas koeficientas nėra lygus 0, t. y. tiesinės regresijos modelis prognozės tikslams tinka (statistinė hipotezė $H_1: b \neq 0$).

Kai klaidingo sprendimo tikimybė lygi α , tai teisingo sprendimo tikimybė – $(1 - \alpha)$, kuri dažniausiai išreiškiama procentais. Mūsų nagrinėjamu atveju statistinė H_0 hipotezė atmetama, nes visi nustatyti dydžiai yra mažesni nei reikšmingumo lygmuo ($\alpha = 0,05$). Taigi teigiama, kad koeficientai reikšmingai skiriasi nuo nulio, o apskaičiuotas kriterijus didesnis už nurodytą etaloninę

lentelėje, taigi lygtys laikomos adekvačiomis ir tinkamomis eksperimentiniams duomenims aprašyti (Čekanavičius, Murauskas 2002; Martinėnas 2004; Liukaitis, Kleveckas 2006).

Lygties kintamųjų reikšmingumas buvo tikrinamas pagal Stjudento kriterijų. Kintamasis laikomas reikšmingu, jeigu apskaičiuota jo Stjudento koeficiento reikšmė didesnė nei etaloninėje lentelėje (pavyzdžiui, kai tiriame 60 bandinių, esant $\alpha = 0,05$ reikšmingumui, Stjudento kriterijaus kritinis lentelės dydis – 2,00). Kai lygtyje yra keli kintamieji, jų reikšmingumą taip pat rodo Stjudento kriterijaus dydis (kuo jis didesnis, tuo kintamasis reikšmingesnis) (Čekanavičius, Murauskas 2002; Martinėnas 2004; Liukaitis, Kleveckas 2006).

2.2. Bandiniai ir jų charakteristikos

Bandinių matmenys, paruošimas ir aplinkos sąlygos atliekant bandymus aprašyti 2.1.1 skirsnyje.

Bandymams buvo naudotos skirtingo tankio ir struktūros mineralinės (akmens ir stiklo) vatos plokštės, pagamintos ir pažymėtos pagal darniojo standarto LST EN 13162 (2009) reikalavimus.

Eksperimentiniuose tyrimuose naudotų bandinių techniniai duomenys pateikiami 2.1–2.7 lentelėse.

2.1 lentelė. Mineralinės vatos plokštės, naudotos dominuojančios plaušų orientacijos nustatymo bandymuose (3 skyrius)

Table 2.1. Mineral wool slabs used in tests to determine dominant orientation of fibres (Chapter 3)

Bandinys	Bandinių skaičius n , vnt.	Storis d , mm	Tankis ρ , kg/m ³	Gniuždymo įtempis esant 10 % deformacijai σ_{10} , kPa	Organinių medžiagų kiekis M , %
MW-1.1 ¹⁾	9	30–50	45	–	3,6
MW-1.2 ¹⁾	11	50–200	100	≥ 10	3,5
MW-1.3 ¹⁾	9	200	100	≥ 10	3,5
MW-1.4 ¹⁾	9				
MW-1.5 ¹⁾	9	100	110	≥ 50	4,2
MW-1.6 ¹⁾	9	40–50	150	≥ 20	4,0
MW-1.7 ¹⁾	9	40–50	170	≥ 60	4,8

2.2 lentelė. Akmens vatos plokštės, naudotos homogeniškos ir heterogeniškos struktūros gaminių gniuždymo stiprio ir sutelktosios apkrovos bandymuose (4.1 poskyris)

Table 2.2. Stone wool slabs used in tests to determine compressive strength and point load of products with homogeneous and heterogeneous structure (section 4.1)

Bandinys	<i>n</i> , vnt.	<i>d</i> , mm	ρ , kg/m ³	σ_{10} , kPa	<i>F</i> ₅ , N	<i>M</i> , %
MW-1.8 ¹⁾	167	40–80	155	≥50	≥400	3,5
MW-1.9 ¹⁾	60	40–150	135	≥40	–	3,0
MW-1.10 ¹⁾	80	40–80	125	≥30	≥300	3,5
MW-1.11 ¹⁾	69	40–160	120	≥30	≥300	3,0
MW-1.12 ¹⁾	65	40–70	145	≥40	≥350	3,5
MW-1.13 ¹⁾	64	40–150	160	≥50	≥400	3,0
MW-1.14 ¹⁾	57	40–60	110	≥10	–	2,0
MW-1.15 ¹⁾	50	50–70	70	≥10	–	2,0
MW-1.16 ¹⁾	50	130–150	90	≥10	–	4,0
MW-2.1 ²⁾	98	80–200	156–164 220 ³⁾ 150 ⁵⁾	≥70	≥500	3,5
MW-2.2 ²⁾	182	80–200	95–103 160 ³⁾ 90 ⁵⁾	≥10	–	4,0
MW-2.3 ²⁾	19	80–100	106–114 170 ³⁾ 100 ⁵⁾	≥30	≥300	3,5
MW-2.4 ²⁾	271	80–200	122–132 200 ³⁾ 115 ⁵⁾	≥40	≥400	3,5
MW-2.5 ²⁾	51	80–200	136–146 210 ³⁾ 130 ⁵⁾	≥50	≥500	3,5
MW-2.6 ²⁾	87	80–150	74–80 120 ³⁾ 70 ⁵⁾	≥10	–	2,0

2.3 lentelė. Akmens vatos plokštės, naudotos sluoksnių storio įtakos dvitankių gaminių gniuždymo stiprio ir sutelktosios apkrovos bandymuose (4.2. poskyris)

Table 2.3. Stone wool slabs used in tests to determine impact of thickness of layers on compressive strength and point load of dual density products (section 4.2)

Bandinys	<i>n</i> , vnt.	<i>d</i> , mm	ρ , kg/m ³	σ_{10} , kPa	<i>F</i> ₅ , N	<i>M</i> , %
MW-2.7 ²⁾	žr. 2.4 lentelę	50–190	140–154 200 ³⁾ 135 ⁵⁾	≥60	≥600	3,8

2.4 lentelė. MW-2.7 bandinių serijos**Table 2.4.** MW-2.7 series of test specimens

Serija	d , mm	n , vnt.
V-1	190	35
V-2	185	35
V-3	180	35
V-4	51–70	93
V-5	71–100	135
V-6	101–130	149
V-7	131–160	88
V-8	161–190	84

2.5 lentelė. Akmens vatos plokštės, naudotos atskirų sluoksnių įtakos dvitankių gaminių gniuždymo stiprio ir sutelktosios apkrovos bandymuose (4.3 poskyris)**Table 2.5.** Stone wool slabs used in tests to determine impact of separate layers on compressive strength and point load of dual density products (section 4.3)

Bandinys	n , vnt.	d , mm	ρ , kg/m ³	σ_{10} , kPa	F_5 , N	M , %
MW-2.8 ²⁾	87	80–100	78–80 120 ³⁾ 70 ⁵⁾	≥ 10	–	2,0
MW-2.9 ²⁾	182	160–180	95–97 160 ³⁾ 90 ⁵⁾	≥ 10	–	4,0
MW-2.10 ²⁾	87	190	140 200 ³⁾ 135 ⁵⁾	≥ 60	≥ 600	3,8

2.6 lentelė. Akmens vatos plokštės naudotos skirtingos struktūros gaminių gniuždymo stiprio ir sutelktosios apkrovos palyginamuosiuose bandymuose (4.4 poskyris)**Table 2.6.** Stone wool slabs used in comparison tests of compressive strength and point load of products with different structure (section 4.4)

Bandinys	n , vnt.	d , mm	ρ , kg/m ³	σ_{10} , kPa	F_5 , N	M , %
MW-1.17 ¹⁾	55	40–160	120	≥ 30	≥ 300	3,0
MW-2.11 ²⁾	55	80–160	114–136 200 ³⁾ 115 ⁵⁾	≥ 40	≥ 400	3,5
MW-1.18 ¹⁾	55	100	122	≥ 80	–	4,0

2.7 lentelė. Akmens vatos plokštės, naudotos atsparumo klimatinių veiksnių ir dinaminių apkrovų poveikio bandymuose (5 skyrius)

Table 2.7. Stone wool slabs used in tests to determine resistance to climatic factors and dynamic load effects (Chapter 5)

Bandinys	<i>n</i> , vnt.	<i>d</i> , mm	ρ , kg/m ³	σ_{10} , kPa	<i>F</i> ₅ , N	<i>M</i> , %
MW-1.19 ¹⁾	90	50–150	148	≥50	≥500	4,0
MW-2.12 ²⁾	121	60–150	138–165 210–220 ³⁾ 130–138 ⁵⁾	≥50	≥500	3,5
MW-3.1 ²⁾	44	60–160	145–185 550 ³⁾ 200 ⁴⁾ 140 ⁵⁾	≥50	≥1000	3,5
MW-1.20 ¹⁾	32	57	170	≥75	–	4,0
MW-2.13 ²⁾	22	50	142 205 ³⁾ 125 ⁵⁾	≥30		4,2
MW-3.2 ²⁾	41	60–160	145–185 550 ³⁾ 200 ⁴⁾ 140 ⁵⁾	≥50	≥1000	3,5
MW-1.21 ¹⁾	37	60–100	155	≥50	≥500	4,0
MW-1.22 ¹⁾	36	50–140	175	≥90	≥1000	3,9

Pastabos:

- ¹⁾ Homogeniškos struktūros vieno tankio plokštės.
- ²⁾ Heterogeniškos struktūros plokštės, sudarytos daugiau kaip iš vieno tankio.
- ³⁾ Viršutinio sluoksnio tankis.
- ⁴⁾ Vidurinio sluoksnio tankis.
- ⁵⁾ Apatinio sluoksnio tankis.

2.3. Antrojo skyriaus išvados

1. Naudotų mineralinės (akmens ir stiklo) vatos bandinių fizinės ir mechaninės savybės nustatytos pagal galiojančius Lietuvos perimtus Europos normų ir Tarptautinių standartų reikalavimus.
2. Nestandartinių bandymų metu taikyti ES šalių normatyviniai dokumentai ir (arba) nauji tyrimų metodai. Kai kuriems bandymams atlikti naudota specialios konstrukcijos įranga.

Dominuojančios plaušų orientacijos nustatymas skirtingos struktūros mineralinės vatos gaminiuose

Tradiciniu gamybos technologijos būdu gaminant mineralinę vatą, dauguma plaušų ant konvejerinio tinklo išsidėstyto horizontalia kryptimi. Tačiau visuomet dėl gamybos proceso ypatumų tam tikra dalis plaušų yra orientuoti atsitiktine kryptimi (1.3.1 skirsnis). Mineralinės vatos ir kitų pluoštinių medžiagų savybės yra plaušų orientacijos funkcija, nes jų išsidėstymo kryptis daro poveikį gaminių fizinių ir mechaninių rodiklių dydžiui (Strazdas 1998).

Pluoštinės struktūros valdymas – reguliuojant plaušų išsidėstymo kryptį pluošto klode gamybos technologinio proceso etape leidžia gaminti norimų šiluminių, stiprumo ir deformacinių savybių mineralinės vatos gaminius (Strazdas, Eidukevičius 1985; Bliūdžius, Samajauskas 2001).

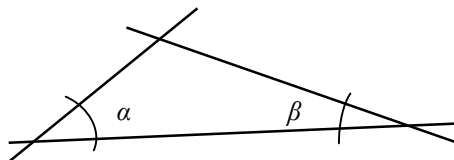
Dominuojančių plaušų orientacijos gaminio struktūroje nustatymas, pasitelkus makrostruktūros rodiklius, leidžia kiekybiškai vertinti mineralinės vatos gaminius pagal plaušų orientaciją.

Skyriaus medžiaga nebuvo viešai skelbta ir šia tematika nėra publikacijų, bet kokia forma siekiant išlaikyti naujumo reikalavimą teikiant paraišką patentuoti.

3.1. Makrostruktūros rodiklių nustatymas

Kadangi visų pavienių plaušų orientacijos struktūroje, kai yra palyginti didelis plotas, išmatuoti beveik neįmanoma, įprasta, kad matuojamas makrostruktūroje dominuojančių plaušų grupių vidutinis posvyrio kampas tiriamos ašies atžvilgiu.

Kai kurių autorių (Склизов 1966; Бобров 1987a) nuomone, pluoštinė struktūra gali būti vaizduojama kaip sudėtinga ryšinė sistema, sudaryta iš daugybės elementarių sistemų, sudėtų viena ant kitos (grafškai dviejų koordinatinių ašyje galima pavaizduoti kaip trikampį, kuriame kampai α ir β svyruoja nuo 0 iki 180° (3.1 pav.)). Kiekviena tokia sistema susideda iš struktūrinių elementų: plaušo, mažų organinės medžiagos dalelių ir neplaušinių lydalų tarpų.



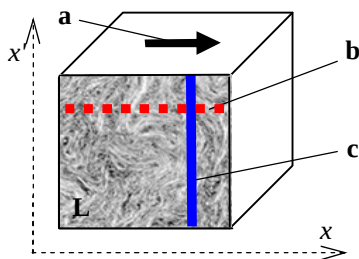
3.1 pav. Mineralinės vatos struktūros elementas, sudarytas iš trijų plaušų
Fig. 3.1. An element of the mineral wool structure comprising three fibres

Pourdeyhimi ir Kim (2002) darbe teigiama, kad plaušų orientacija neaustinėse medžiagose gali būti nusakoma orientacijos pasiskirstymo funkcija ψ , todėl ir ψ yra kampo α funkcija. Šios funkcijos ψ integralas tarp kampų α_1 ir α_2 yra lygus tikimybei, kad plaušas yra išsidėstęs tarp kampų α_1 ir α_2 .

Dominuojančiai plaušų orientacijai ir kryptingumui išreikšti naudojamas makrostruktūros rodiklis (S). Jis nusako bandinio plokščiajame pjūvyje (per storį) dominuojančių plaušų ir jų grupių orientacijos kampų išmatuotų pagrindinės ašies x ir statmenos jai x' santykį. Šiuo atveju x' ašis gaunama to paties bandinio plokštumą pasukant 90° kampu. Priimta, kad x ašis yra pagrindinė, nes sutampa su pluošto klando judėjimo konvejeriu kryptimi (3.2 pav., a), todėl plaušų orientacija gaminyje ir apibūdinama atsižvelgiant į tai.

Makrostruktūros rodiklio išreiškimas kampų santykiu padidina matavimo tikslumą (ypač chaotiškos plaušų orientacijos gaminiuose, nes esant kryptingai plaušų orientacijai jų išsidėstymas akivaizdesnis), kadangi struktūroje dominuojančių plaušų kampai matuojami dviem kryptimis: lygiagrečiai (3.2 pav., b) ir statmenai (3.2 pav., c) x ašiai.

Kai kuriuose bandiniuose matomas skirtingas plaušų išsidėstymas abiejuose pjūviuose (lygiagrečiai L ir statmenai C pluošto klando judėjimo kryptims), todėl ir makrostruktūros rodikliai skaičiuoti atskirai, juos pažymint atitinkamomis pjūvio raidėmis (L arba C).



3.2 pav. Chaotiškos struktūros bandinio paviršius L pjūvyje: a – pluošto klando judėjimo kryptis; b – plaušų išsidėstymas lygiagrečiai x ašies atžvilgiui; c – plaušų išsidėstymas statmenai x ašies atžvilgiui

Fig. 3.2. The surface of the test specimen in L section with a chaotic structure: a – direction of fibre web movement; b – orientation of fibres in parallel to axis x ; c – orientation of fibres perpendicularly to axis x

Šių tyrimų metu tirti homogeniškos struktūros kryptingos ir chaotiškos plaušų orientacijos mineralinės vatos gaminiai, kurių tankis – 33–200 kg/m³. Bandiniai aprašyti 2.1 lentelėje (2.2 poskyris), o skenavimo ir vaizdų analizavimo eiga – 2.1.8 skirsnyje.

Eksperimentinių tyrimų metu išmatuotų ir apskaičiuotų dominuojančių plaušų posvyrio kampų bei makrostruktūros rodiklių vidutiniai dydžiai pateikti 3.1 lentelėje.

3.1 lentelė. Visų tipų bandinių plaušų posvyrio kampų ir makrostruktūros rodiklių vidutiniai dydžiai

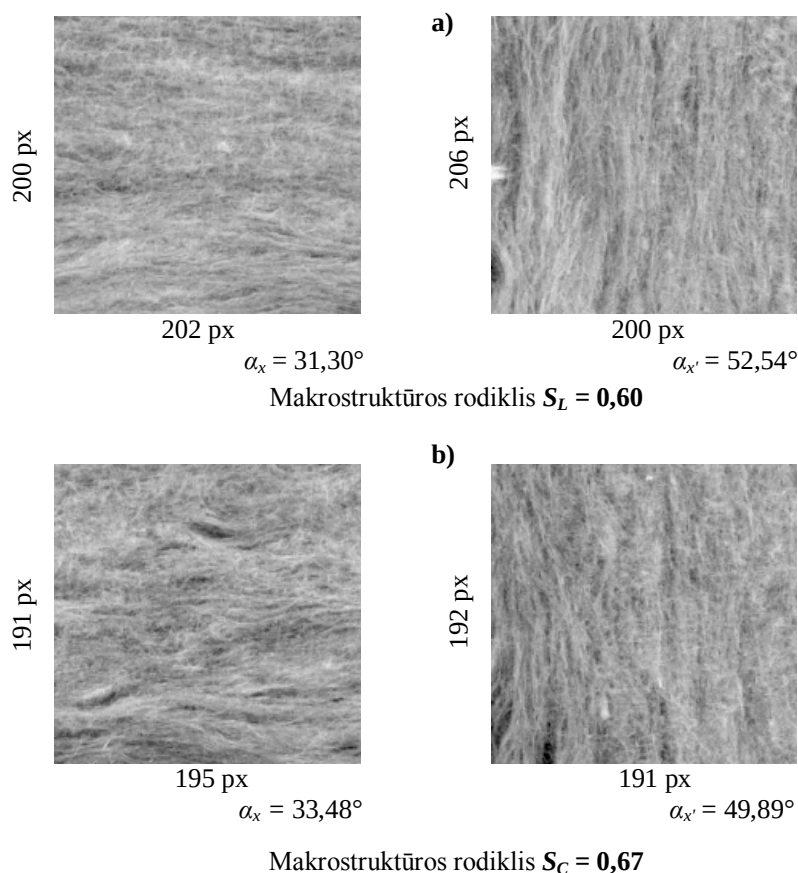
Table 3.1. Measured average values of fibres tilt angles and macrostructure parameters for all types of test specimens

Bandinio tipas	Pjūvis L		Pjūvis C		S_L	S_C	S_{L-C}
	α_x°	$\alpha_{x'}^\circ$	α_x°	$\alpha_{x'}^\circ$			
MW-1.1	32,12	52,20	31,96	51,96	0,62	0,62	0,62
MW-1.2	41,02	45,38	37,68	49,05	0,90	0,77	0,84
MW-1.3	46,16	39,48	48,12	37,53	1,17	1,28	1,23
MW-1.4	45,78	40,77	40,44	45,73	1,12	0,88	1,00
MW-1.5	42,35	43,68	49,16	35,94	0,97	1,37	1,17
MW-1.6	37,07	46,51	35,23	48,62	0,80	0,73	0,76
MW-1.7	39,48	44,82	36,84	48,13	0,89	0,77	0,83

Iš rezultatų, pateiktų 3.1 lentelėje, matome, kad apskaičiuoti skirtingo tipo bandinių vidutiniai kampai x ir x' ašių atžvilgiu skiriasi. Didžiausi kampų skirtumai išmatuoti bandinių, kurių ir vizualiai apžiūrint plaušų kryptingumas

matomas aiškiai. Skirtumas tarp MW-1.1 bandinių vidutinių α_x ir $\alpha_{x'}$ kampų sudarė $20,08^\circ$, o MW-1.5 bandinių vidutinio kampo skirtumas tarp α_x ir $\alpha_{x'}$ siekė $13,22^\circ$. Iš visų bandinių didžiausias kampų skirtumas buvo išmatuotas vieno iš MW-1.1 tipo bandinių (pjūvyje C) ir siekė $29,19^\circ$.

Toliau pateikiamos vizualios vieno bandinio (kurio apskaičiuoti kampai ir makrostruktūros rodikliai artimi to tipo vidurkiui) iš kiekvieno MW-1.1–MW-1.7 bandinių tipo iliustracijos. Kairėje pateikiamas paviršiaus struktūros fragmentas yra lygiagretus su pagrindine x ašimi (kuri sutampa su pluošto klando judėjimo konvejeriu kryptimi). O dešinėje esantis plaušų struktūros fragmentas statmenas pagrindinei ašiai (pasuktas 90° kampu).

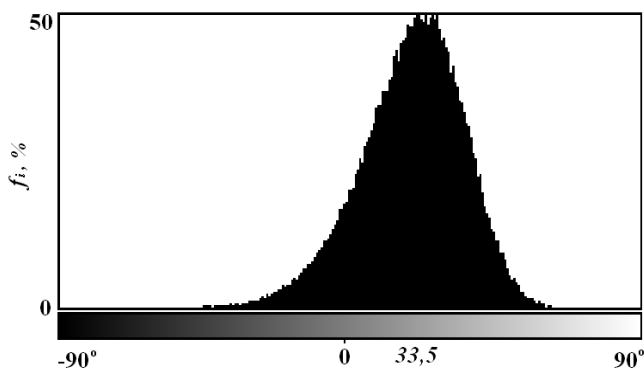


3.3 pav. Bandinio MW-1.1/1 makrostruktūros fragmentai ir rodikliai:

a – L pjūvyje; b – C pjūvyje

Fig. 3.3. Fragments of macrostructure and parameters for MW-1.1/1 test specimen:

a – in section L; b – in section C

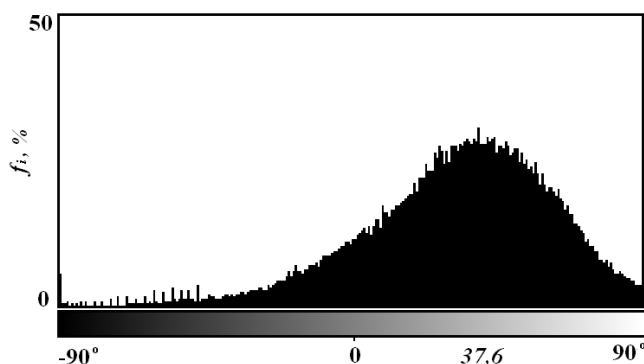


3.4 pav. Plaušų α_x pasiskirstymo histograma bandinio MW-1.1/1 C pjūvyje

Fig. 3.4. A histogram of the spread of fibres α_x in section C for MW-1.1/1 test specimen

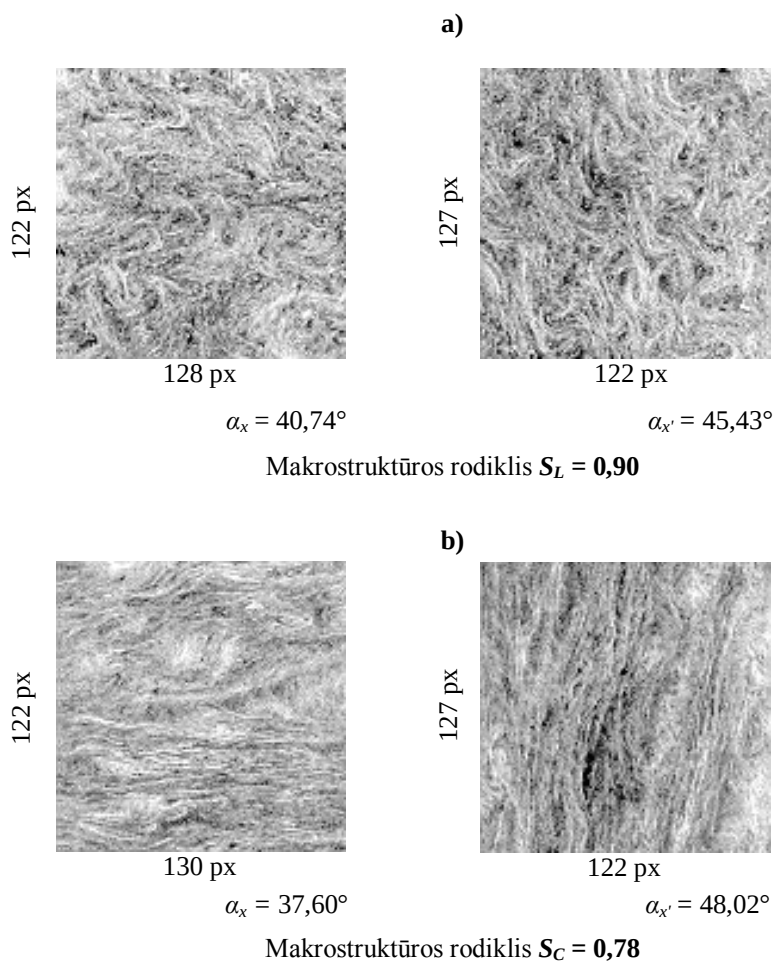
Vizualiai apžiūrėjus MW-1.1/1 tipo bandinį buvo matyti, kad struktūroje dominuoja horizontali plaušų orientacija, o ir abiejose pjūviuose (L ir C) plaušų išsidėstymas x ašies atžvilgiu yra panašus. Tai patvirtina išmatuoti artimi α_x kampų dydžiai ($31,3^\circ$ pjūvyje L ir $33,48^\circ$ pjūvyje C). Tuo tarpu $\alpha_{x'}$ kampai nežymiai skiriasi: pjūvyje L išmatuotas vidutinis $\alpha_{x'} = 52,54^\circ$, o pjūvyje C $\alpha_{x'}$ buvo $49,89^\circ$. Apskaičiavus makrostruktūros rodiklius atitinkamame pjūvyje (3.3 pav., a ir b) gauti panašūs dydžiai: abiejų pjūvių ($S_L = 0,6$ ir $S_C = 0,67$).

Toliau skirtingo tipo bandinių plaušų išsidėstymo ypatumams aprašyti naudojami tik makrostruktūros rodikliai, o ne skaitiniai kampų dydžiai.



3.5 pav. Plaušų α_x pasiskirstymo histograma bandinio MW-1.2/5 C pjūvyje

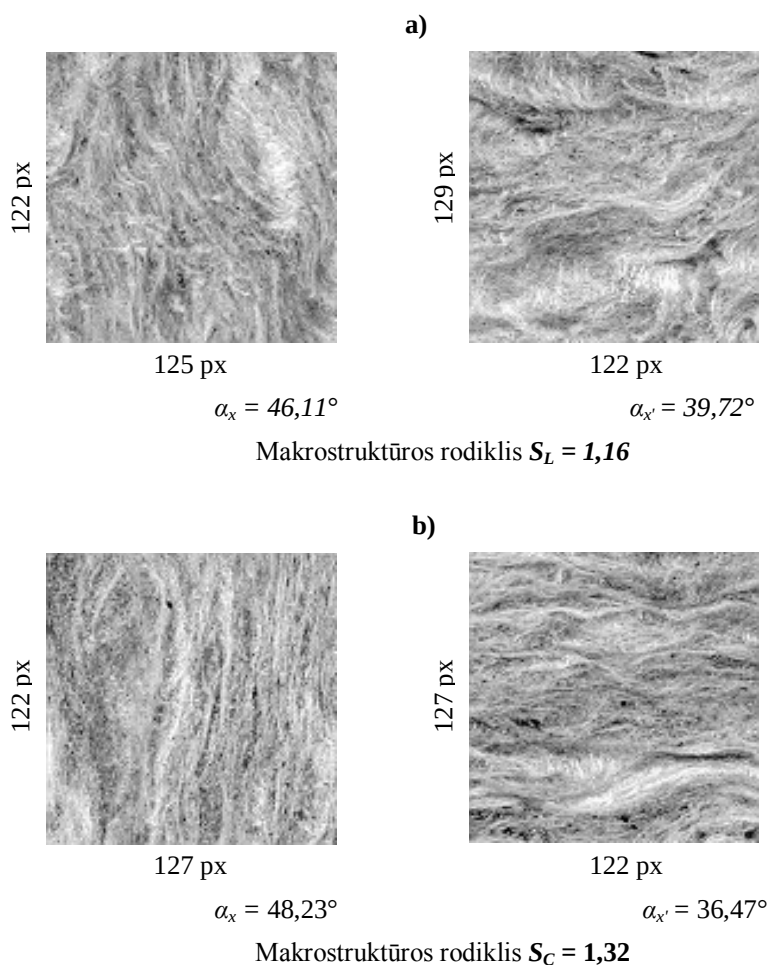
Fig. 3.5. A histogram of the spread of fibres α_x in section C for MW-1.2/5 test specimen



3.6 pav. Bandinio MW-1.2/5 makrostruktūros fragmentai ir rodikliai:
a – L pjūvyje; b – C pjūvyje

Fig. 3.6. Fragments of macrostructure and parameters for MW-1.2/5 test specimen: a – in section L ; b – in section C

MW-1.2/5 tipo bandinio L ir C pjūviuose buvo matomas skirtingas plaušų išsidėstymas: pjūvyje L dominuoja chaotiškesnės orientacijos plaušai, o pjūvyje C matomas didesnis horizontaliai išsidėsčiusių plaušų kiekis. Todėl atitinkamai skiriasi ir apskaičiuoti makrostruktūros rodikliai (0,9 – pjūvio L , o 0,78 – pjūvio C) (3.6 pav., a ir b).

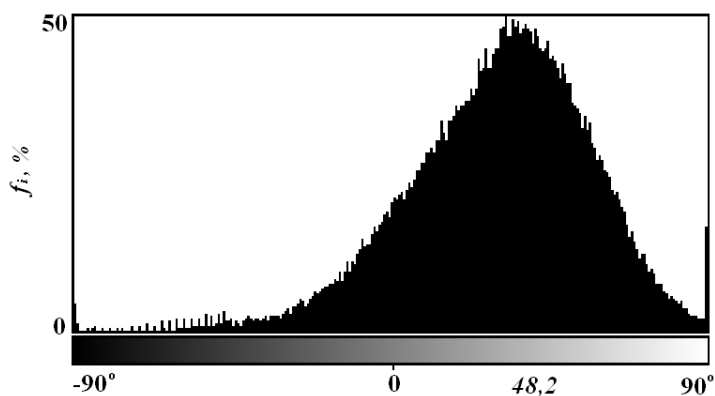


3.7 pav. Bandinio MW-1.3/7 makrostruktūros fragmentai ir rodikliai:

a – L pjūvyje; b – C pjūvyje

Fig. 3.7. Fragments of macrostructure and parameters for MW-1.3/7 test specimen:
a – in section L; b – in section C

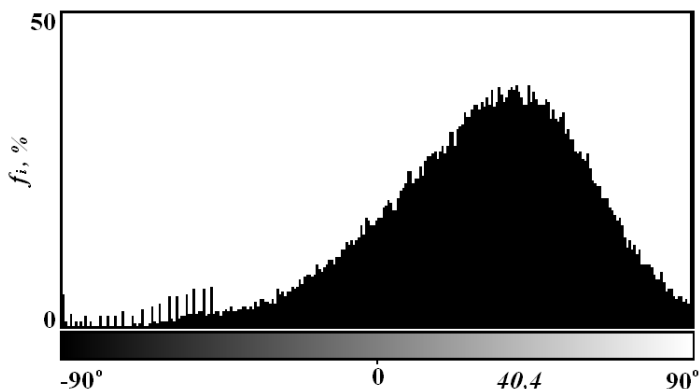
MW-1.3/7 tipo bandinio išmatuotų α_x kampų ir apskaičiuotų S_L ir S_C rodiklių dydžiai (3.7 pav., a ir b) buvo labai dideli (1,16 ir 1,32), lyginant su prieš tai analizuotų bandinių (MW-1.1 ir MW-1.2) apskaičiuotais makrostruktūros rodikliais. Bandinyje abu pjūviai rodo kryptingą vertikaliai išsidėsčiusių plaušų dominavimą struktūroje.



3.8 pav. Plaušų α_x pasiskirstymo histograma bandinio MW-1.3/7 C pjūvyje

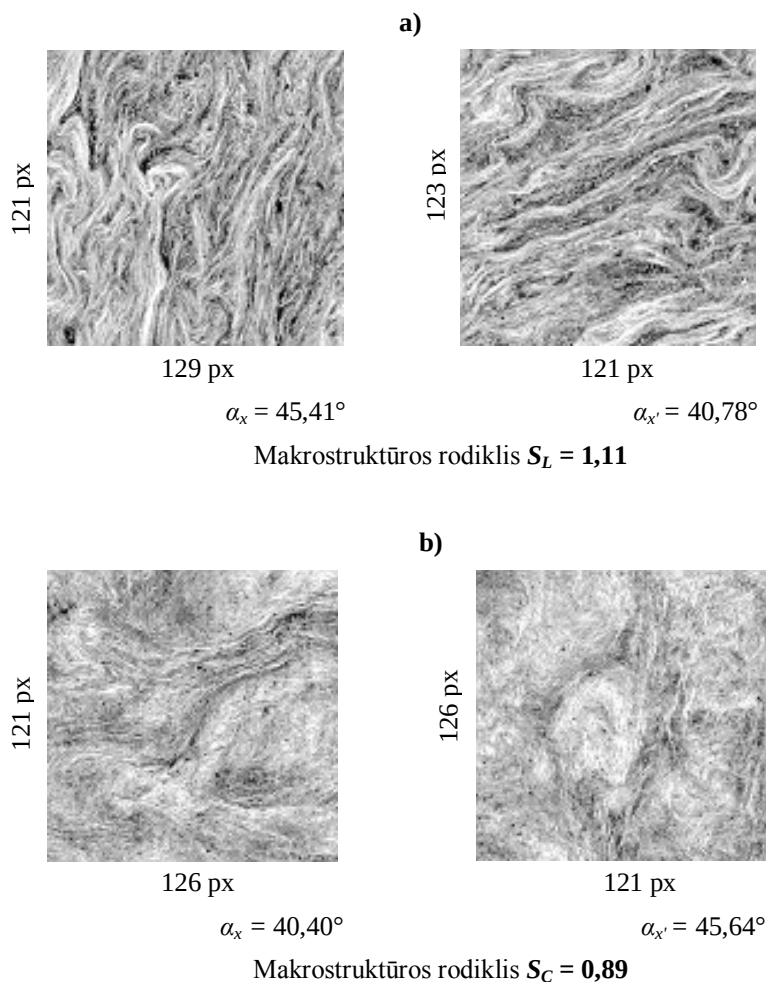
Fig. 3.8. A histogram of the spread of fibres α_x in section C for MW-1.3/7 test specimen

Skirtingos struktūros bandiniuose dominuojančių kampų (C pjūvyje) dažnio pasiskirstymas pagrindinės x ašies atžvilgiu pavaizduotos histogramomis. Pagal 3.7 paveikslą b fragmentą matyti, kad bandinio MW-1.3/7 C pjūvyje dominuoja vertikaliai išsidėstę plaušai, o apskaičiuotas $S_C = 1,32$. Tuo tarpu MW-1.4/8 bandiniui apskaičiuotas S_C siekia 0,89. Palyginę histogramas (3.8 pav. ir 3.9 pav.) matyti, kad skiriasi jų formą ir aukštis, kuriuos lemia plaušų orientacija struktūroje. Tai patvirtina ir skirtingi makrostruktūros rodiklių dydžiai.



3.9 pav. Plaušų α_x pasiskirstymo histograma bandinio MW-1.4/8 C pjūvyje

Fig. 3.9. A histogram of the spread of fibres α_x in section C for MW-1.4/8 test specimen

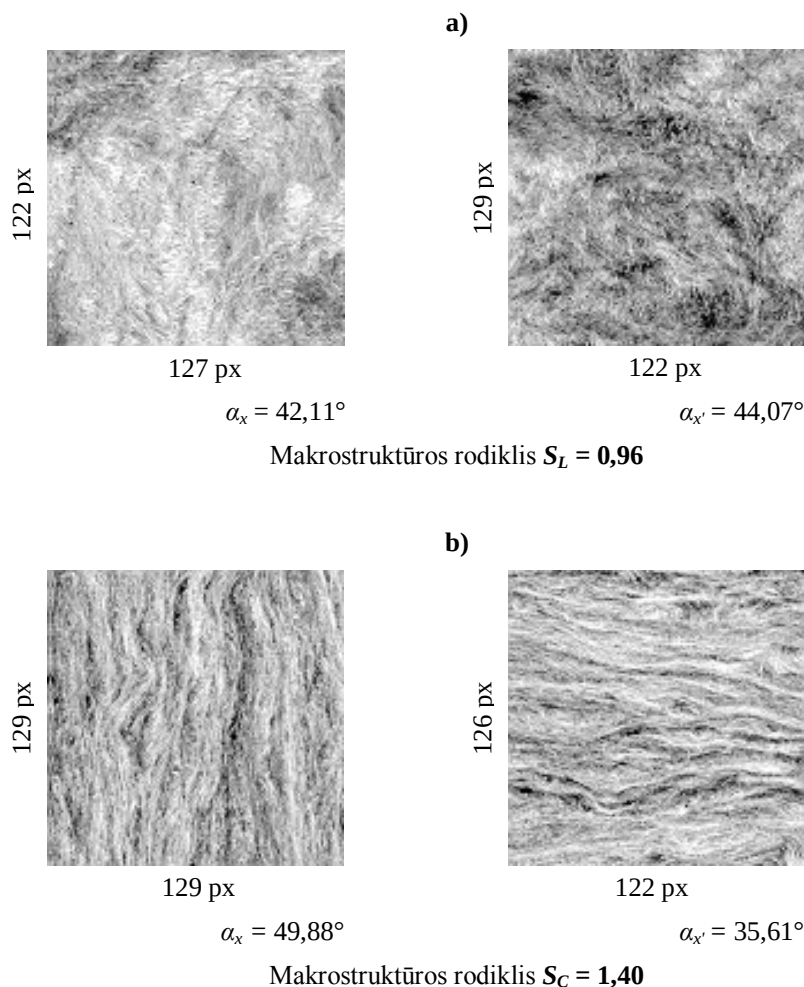


3.10 pav. Bandinio MW-1.4/8 makrostruktūros fragmentai ir rodikliai:

a – L pjūvyje; b – C pjūvyje

Fig. 3.10. Fragments of macrostructure and parameters for MW-1.4/8 test specimen: a – in section L ; b – in section C

Iš 3.10 paveikslo., a ir b fragmentų matyti, kad MW-1.4/8 bandinio abu pjūviai gana skirtingi: L pjūvyje aiškiai matoma vertikalia kryptimi (nes $\alpha_x = 45,41^\circ$ ir $\alpha_{x'} = 40,78^\circ$, o $S_L = 1,11$) išsidėsčiusių plaušų orientacija. C pjūvyje nėra aiškaus dominuojančių plaušų pasiskirstymo kurios nors vienos ašies atžvilgiu, todėl makrostruktūros rodiklis $S_C = 0,89$.



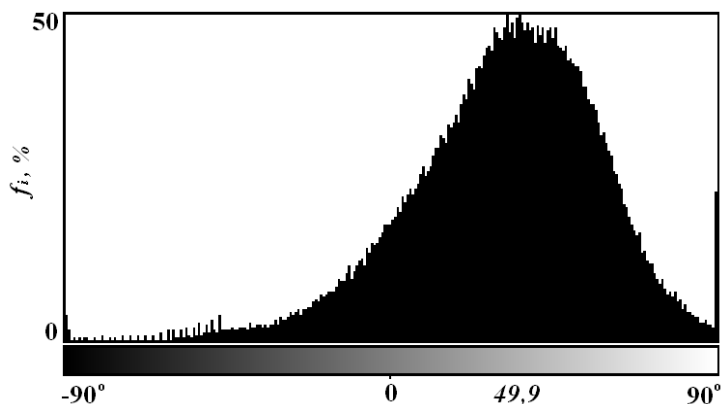
3.11 pav. Bandinio MW-1.5/8 makrostruktūros fragmentai ir rodikliai:

a – L pjūvyje; b – C pjūvyje

Fig. 3.11. Fragments of macrostructure and parameters for MW-1.5/8 test specimen:
a – in section L ; b – in section C

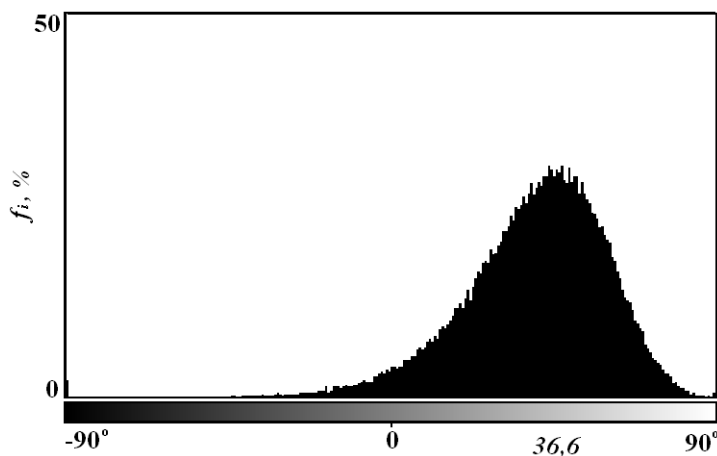
MW-1.5/8 tipo bandinio struktūroje vyrauja plaušų išsidėstymas, labai artimas MW-1.3 tipo bandiniams (3.7 pav.). Iš 3.11 paveikslo a matyti, kad MW-1.5 bandinio L pjūvyje dominuoja plaušų struktūrinis chaotiškumas ($S_C = 0,96$), o C pjūvyje labai aiškiai matoma gana tvarkingai vertikalia kryptimi išsidėsčiusių plaušų orientacija (3.11 pav., b).

Tai patvirtina ir apskaičiuotas makrostruktūros (tame pjūvyje) rodiklio didžiausias dydis ($S_C = 1,4$) iš visų šiuose tyrimuose naudotų bandinių.



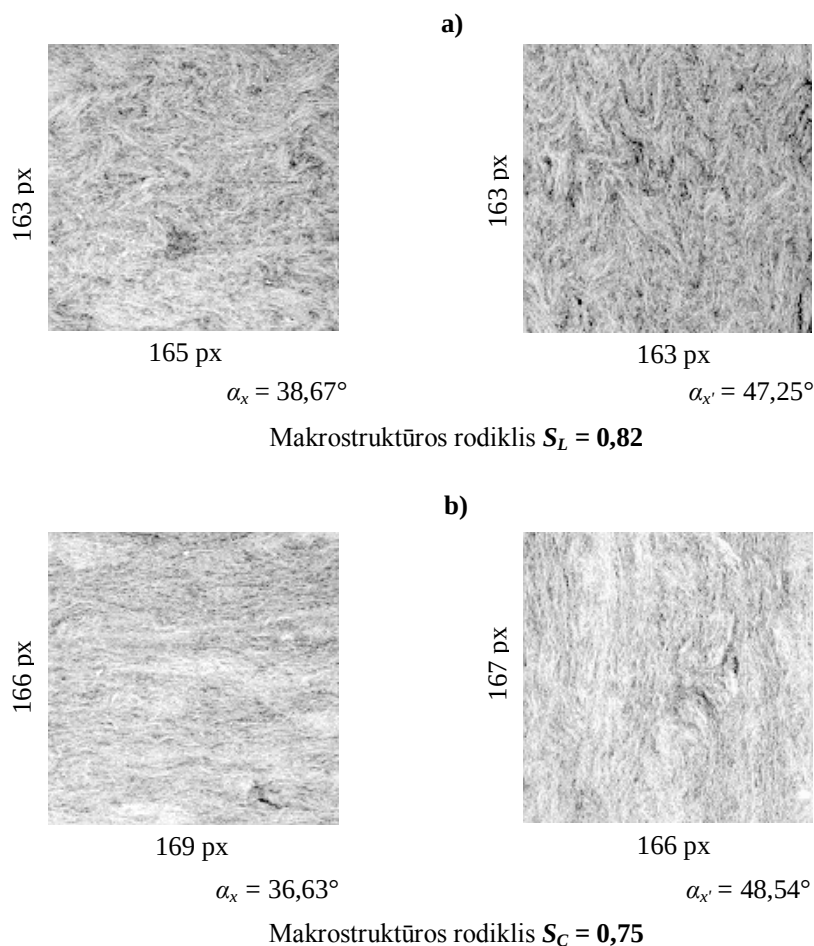
3.12 pav. Plaušų α_x pasiskirstymo histograma bandinio MW-1.5/8 C pjūvyje

Fig. 3.12. A histogram of the spread of fibres α_x in section C for MW-1.5/8 test specimen



3.13 pav. Plaušų α_x pasiskirstymo histograma bandinio MW-1.6/2 C pjūvyje

Fig. 3.13. A histogram of the spread of fibres α_x in section C for MW-1.6/2 test specimen

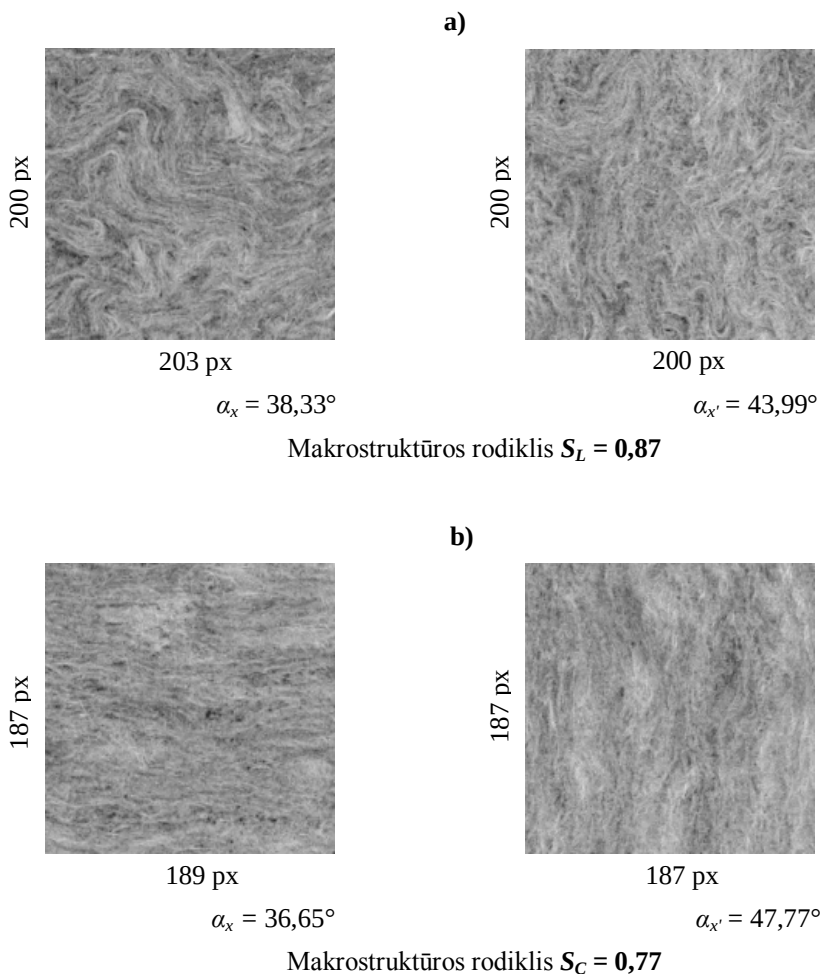


3.14 pav. Bandinio MW-1.6/2 makrostruktūros fragmentai ir rodikliai:

a – L pjūvyje; b – C pjūvyje

Fig. 3.14. Fragments of macrostructure and parameters for MW-1.6/2 test specimen: a – in section L ; b – in section C

Bandinių MW-1.6/2 ir MW-1.7/2 abiejuose (L ir C) pjūviuose buvo matoma chaotiška plaušų orientacija. Nors, kaip matyti iš 3.14 ir 3.15 paveikslų b fragmentų ir apskaičiuotų nedidelių (0,75; 0,77) makrostruktūros rodiklių, ryškėja „horizontalėjanti“ plaušų išsidėstymo x ašies atžvilgiu tendencija (t. y. dalis plaušų struktūroje išsidėstę lygiagrečiai pluošto klogo judėjimo kryptčiai).



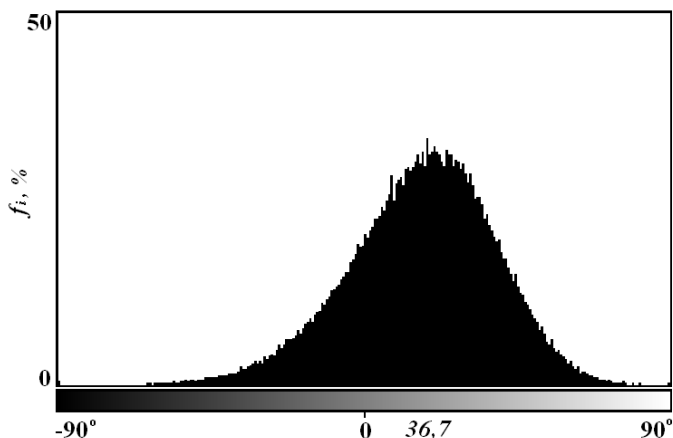
3.15 pav. Bandinio MW-1.7/2 makrostruktūros fragmentai ir rodikliai:

a – L pjūvyje; b – C pjūvyje

Fig. 3.15. Fragments of macrostructure and parameters for MW-1.7/2 test specimen:
a – in section L; b – in section C

Visų tipų bandinių histogramose (3.4, 3.5, 3.8, 3.9, 3.12, 3.13 ir 3.16 pav.) pavaizduotas dominuojančių kampų (C pjūvyje) dažnio pasiskirstymas x ašies atžvilgiu. Iš 3.4, 3.8, 3.12 ir 3.16 paveikslų matome, kad kryptingesnės plaušų orientacijos bandiniuose vienodesnių kampų skaičius yra didelis ir kampai labiau grupuojasi apie vidutinį dydį (aukštos ir smailios formos). Tai rodo kampų pasiskirstymo pobūdis histogramoje.

Chaotiškesnės struktūros bandinių histogramose (3.5, 3.9, 3.13, 3.16 pav.) matomas kampų pasiskirstymas platesniu diapazonu (žemos ir užapvalintos formos histogramų pobūdis) (Dimovski *et al.* 2004).



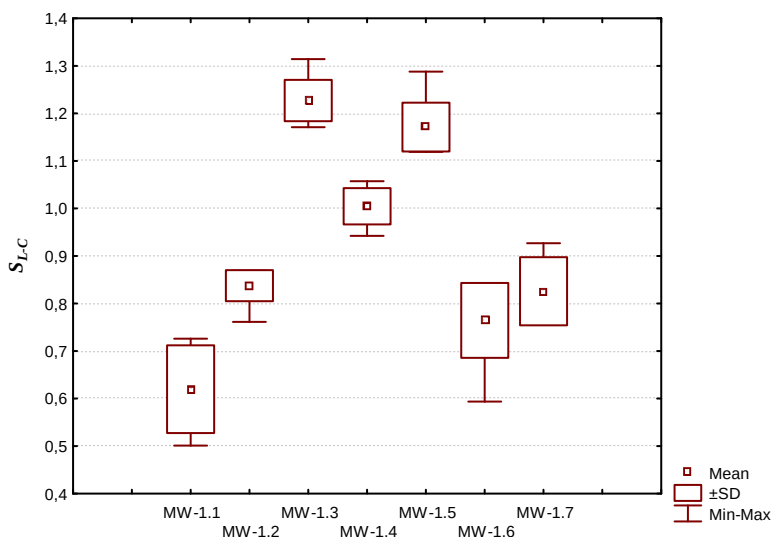
3.16 pav. Plaušų α_x pasiskirstymo histograma bandinio MW-1.7/2 C pjūvyje

Fig. 3.16. A histogram of the spread of fibres α_x in section C for MW-1.7/2 test specimen

Kadangi apskaičiuoti S_L ir S_C dydžiai tam pačiam bandiniui skiriasi, todėl vietoj makrostruktūros rodiklių atskiriems pjūviams buvo apskaičiuojamas rodiklių vidurkis ir pateikiamas vienas dydis S_{L-C} .

Apskaičiuotų makrostruktūros rodiklių vidurkiai, standartiniai nuokrypiai ir mažiausių bei didžiausių dydžių pasiskirstymas pateikiamas 3.17 paveiksle.

Susiejus (3.17 pav.) pavaizduotų S_{L-C} dydžių pasiskirstymą su 3.3–3.15 paveiksluose a ir b kairėje pusėje pateiktais fragmentais galima matyti, kad dominuojančių plaušų išsidėstymo kryptis struktūroje gali būti apibūdinama makrostruktūros rodikliu. MW-1.1 bandinių, kurių struktūroje dominuoja daugiau horizontalios orientacijos plaušai (3.3 pav.), S_{L-C} rodiklis yra mažas (0,5–0,73), o apskaičiuotas variacijos koeficientas svyruoja $\pm 14,8$ %. MW-1.3 ir MW-1.5 bandinių (3.7 ir 3.11 pav.), kuriuose dominuoja vertikalios orientacijos plaušai, S_{L-C} yra didelis (1,12–1,31), bet variacijos koeficientas gana mažas $\pm (3,5-4,4)$ %. Iš tokių variacijos koeficiento dydžių galima teigti, kad vertikalios plaušų orientacijos bandinių struktūra vienalytiškesnė. Likusių chaotiškos struktūros bandinių S_{L-C} rodiklis kinta ir išsidėsto tarp kryptingos struktūros minimalaus ir maksimalaus rodiklio dydžių (0,76–1,09) dėl aiškios plaušų orientacijos nebuvimo.



3.17 pav. Apskaičiuotų makrostruktūros rodiklio S_{L-C} vidutinių dydžių pasiskirstymas visų tipų bandiniams

Fig. 3.17. The spread of the average values of the macrostructure parameter S_{L-C} for all types of test specimens

Taigi galima teigti, kad makrostruktūros rodikliai S_L , S_C , S_{L-C} yra tinkami kiekybiškam plaušų orientacijos mineralinės vatos struktūroje įvertinimui. Iš gautų rodiklių dydžių galima nustatyti dominuojančių plaušų pasiskirstymą.

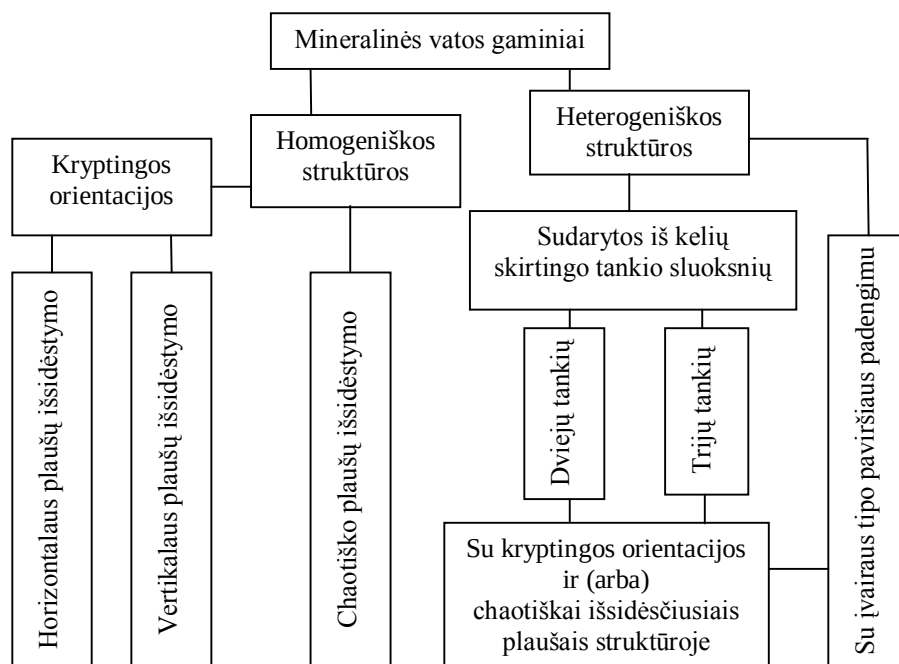
3.1.1. Mineralinės vatos gaminių klasifikacija pagal struktūrą

Ankstesniame poskyryje aprašytas makrostruktūros nustatymo metodas leidžia objektyviu būdu atliekant matavimus ir remiantis nustatytais skaitiniais dydžiais apibrėžti plaušų orientaciją struktūroje. Literatūros šaltiniuose iki šiol nėra pateiktos mineralinės vatos gaminių klasifikacijos pagal struktūroje dominuojančių plaušų išsidėstymą. Tačiau galima rasti (LST 1433:1996) mineralinės vatos gaminių skirstymą pagal įvairius techninius (formą ir išvaizdą), fizinius (tankį), mechaninius (spūdumą) ir kitus požymius.

Kadangi nuo struktūros (daugeliu atvejų) priklauso šių gaminių savybės ir su jomis susijusi naudojimo sritis, tai pagal struktūrą mineralinės vatos gaminius galima suklasifikuoti (3.18 pav.).

Pateiktas klasifikavimas sudarytas remiantis teoriniais poringų kūrų (Лыков 1978) ir erdviųjų kompozitų struktūros pagrindais (Берестова 2006;

Tamulevičius, Jucius 2007) bei patentiniais technologiniais aprašymais kaip gamybos metu formuojami skirtingos struktūros gaminiai (1.3 poskyris). Todėl ši klasifikacija apima ir aprašo pastaruoju metu realiai gaminamus mineralinės vatos gaminius.



3.18 pav. Mineralinės vatos gaminių klasifikacija pagal struktūrą

Fig. 3.18. Classification of mineral wool products according to the structure

Pirmiausia dvi pagrindinės gaminių grupės pagal plaušų pasiskirstymo pobūdį ir sluoksniuotumą išskiriamos į homogeniškas ir heterogeniškas. Homogeniška – iš esmės vieno tankio struktūra be aiškiai išsiskiriančių ribų tarp pluoštinės matricos elementų visame tūryje. Savo ruožtu homogeniškos struktūros gaminiai yra kryptingos ir chaotiškos plaušų orientacijos. Gaminiais su kryptingai orientuotais plaušais būdingas aiškus anizotropiškumas, o pagal plaušų išsidėstymo kryptį gali būti su horizontaliais ar vertikaliais plaušais.

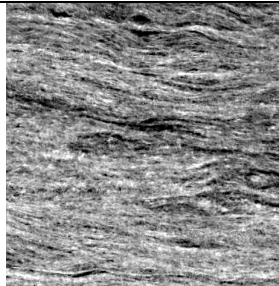
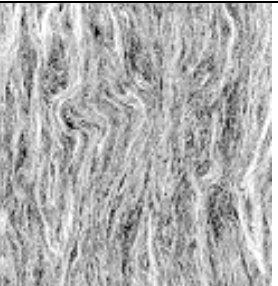
Chaotiškos plaušų orientacijos gaminiai teoriškai turėtų būti struktūriškai izotropiški, tačiau realiai tokiems mineralinės vatos gaminiams su chaotišku plaušų išsidėstymu struktūroje matomas tik dalinis izotropiškumo dominavimas, nes savybės paprastai tik dviem kryptimis yra panašios. Struktūros heterogeniškumas nusakomas matomu sluoksniuotumu bei galimybe atskirti

sluoksnius jų sąlyčio zonoje. Paprastai heterogeniškos struktūros mineralinės vatos gaminiai susideda iš kelių dalių – gamybos metu jų struktūroje suformuojant 2–3 skirtingo (dažniausiai nevienodo) tankio sluoksnius, kuriuose taip pat gali būti ir skirtinga plaušų orientacija (pavyzdžiui, kryptinga viršutinėje ir (arba) chaotiška apatinėje dalyse). Arba pirmiau aprašytų struktūrų gaminius padengiant visai skirtingo tipo ar rūšies dangomis. Dažniausiai naudojamos dangos iš stiklo audinio ar pluošto, aliuminio folijos, popieriaus ar hidroizoliacinės medžiagos (tvirtinant klijavimo būdu). Be to, paviršiuje danga gali būti suformuota iš skystųjų medžiagų (bitumo, dažų ir kt.), kurios užtepamos ar užpurškiamos.

Pagal makrostruktūros rodiklio dydžius mineralinės vatos gaminiams galima taikyti sąlyginę klasifikaciją, atsižvelgiant į struktūroje dominuojančių plaušų išsidėstymą pagrindinės ašies atžvilgiu (3.2 lentelė).

3.2 lentelė. Mineralinės vatos gaminių skirstymas į grupes pagal makrostruktūros rodiklio dydį atsižvelgiant į pluošto klogo judėjimo konvejeriu kryptį

Table 3.2. Categorisation of mineral wool products by the value of the macrostructure parameter according to the direction of the fibre web movement on the conveyor

Tariamai horizontalios orientacijos	Tariamai chaotiškos orientacijos	Tariamai vertikalios orientacijos
kai $S_{L-C} \leq 0,75$	kai $S_{L-C} = 0,76-1,09$	kai $S_{L-C} \geq 1,10$
		

Iš 3.2 lentelės matome, kad homogeniškos struktūros gaminiai, kuriuose daugiausia plaušų išsidėstę lygiagrečiai su x ašimi, gali būti vadinami tariamai horizontalios orientacijos. Gaminiai, kuriuose dominuoja statmeni x ašiai plaušai, vadinami tariamai vertikalios orientacijos. O gaminiai su atsitiktinai išsidėsčiusiais ar su aiškiai neapibrėžtos krypties ir (arba) orientacijos plaušais vadinami tariamai chaotiškos orientacijos. Bendrai priimtas pluoštinės struktūros skirstymas yra labiau sąlyginis, nes greičiausiai idealių vienos ar kitos struktūros gaminių praktiškai nepagaminama.

Skirtingos struktūros gaminių skirstymas į grupes grindžiamas struktūriniais skirtumais, kuriuos lemia plaušų orientacija. To įrodymui naudojami makrostruktūros rodiklio skaitiniai dydžiai, apskaičiuoti pagal eksperimentinių

tyrimų metu gautus rezultatus (3.1 poskyris) išbandžius skirtingos orientacijos homogeniškos struktūros gaminius. Plaušų padėties gaminio struktūroje apibūdinimas buvo pasirinktas atsižvelgiant į dominuojančių plaušų padėtį gniuždymo apkrovų veikimo krypties atžvilgiu ir pluošto klogo judėjimo konvejeriu kryptį (gamybinės linijos kryptis). Pavyzdžiui, horizontalios kryptingos orientacijos plaušai gaminio struktūroje yra išsidėstę statmenai apkrovos veikimo krypčiai, o dominuojančių plaušų kryptis sutampa su pluošto klogo judėjimo, t. y. horizontalia kryptimi.

Taigi nuskenavus gaminio paviršius ir atlikus gauto vaizdo analizę bei apskaičiavus dominuojančių plaušų struktūroje vidutinius išsidėstymo kampus ir apskaičiavus makrostruktūros rodiklį galima kiekybiškai apibrėžti gaminio tipą pagal plaušų struktūros orientaciją.

Klasifikacija palengvina skirtingos struktūros mineralinės vatos gaminių vertinimą sprendžiant tradicinių termoizoliacinių medžiagų efektyvumo didinimo problemas, nes pluoštinės struktūros valdymas, plaušų išsidėstymo krypties keitimas bei skirtingų tankių ir (arba) sluoksnių naudojimas gamybos procese lemia pagrindines mineralinės vatos gaminių stiprumo ir deformacinės savybės.

3.2. Makrostruktūros rodiklių įtakos gniuždymo stipriui nustatymas

Kaip aprašyta ankstesniuose poskyriuose, mineralinės vatos gaminiai skiriasi savo struktūra dėl dominuojančios plaušų orientacijos. Vizualiai apžiūrėjus paruoštus bandinius akivaizdžiai matoma skirtinga gaminių struktūra.

Bandymų metu išmatuoti vidutiniai tankio, gniuždymo ribinio įtempio, organinių medžiagų kiekio ir makrostruktūros rodiklių dydžiai pateikti suvestinėje 3.3 lentelėje. Gniuždymo ribinio įtempio nustatymas pasirinktas todėl, kad skirtingos struktūros bandiniai deformuosi skirtingai: vienu matuojamas σ_{10} , o kitų – σ_m dydis.

Vidutiniai išmatuoti tankių dydžiai svyruoja labai plačiai: mažiausias vidutinis MW-1.1 bandinių tankis siekia $48,9 \text{ kg/m}^3$, o didžiausias MW-1.7 bandinių – $178,8 \text{ kg/m}^3$. Kadangi MW-1.1 tipo bandiniai buvo nedidelio tankio ($33,3\text{--}67,4 \text{ kg/m}^3$) ir jų gniuždymo įtempis paprastai nenustatomas bei nedeklaruojamas, o mūsų išmatuoti dydžiai labai maži ($1,1\text{--}3,5 \text{ kPa}$), tai šių bandinių skaičiuodami nevertinsime. Apskaičiuoti ρ_s vidutiniai standartiniai nuokrypiai (s) kiekvieno tipo bandinių yra kitokie ir kinta $5,7\text{--}11,9 \text{ kg/m}^3$. Vidutiniai M dydžiai svyruoja nuo 3,63 iki 4,26 %, o apskaičiuotas $s = 0,05\text{--}0,88 \text{ \%}$.

3.3 lentelė. Bandinių tankio, gniuždymo ribinio įtempio, organinių medžiagų kiekio ir makrostruktūros rodiklių vidutiniai dydžiai

Table 3.3. The average values of density, critical compression stress, organic material content, and macrostructure parameters

Bandiniai	Tankis (atliekant gniuždymo bandymus) ρ_s , kg/m ³	Gniuždymo ribinis įtempis σ_e , kPa	Organinių medžiagų kiekis M , %	Makrostruktūros rodikliai		
				S_L	S_C	S_{L-C}
MW-1.1	48,9	2,6	4,15	0,62	0,62	0,62
MW-1.2	95,2	11,5	3,70	0,90	0,77	0,84
MW-1.3	98,8	46,8	3,66	1,17	1,28	1,23
MW-1.4	97,1	20,4	3,63	1,12	0,88	1,00
MW-1.5	108,0	52,6	4,18	0,97	1,37	1,17
MW-1.6	119,7	21,1	4,26	0,80	0,73	0,76
MW-1.7	178,8	59,3	4,01	0,89	0,77	0,83

Iš 3.3 lentelės galima matyti, kad σ_e dydis labiausiai priklauso nuo tankio ir makrostruktūros rodiklių. Kadangi kai kuriuose bandiniuose L ir C pjūviuose dominuojančių plaušų kampai skiriasi, tai ir apskaičiuoti makrostruktūros rodikliai kiekviename pjūvyje yra skirtingo dydžio. Siekiant nustatyti fizinių ir mechaninių savybių bei makrostruktūros rodiklių tarpusavio funkcines priklausomybes, buvo atlikti statistiniai daugialypės regresijos skaičiavimai ir sudaryta empirinė lygtis:

$$\sigma_e = -107,77 + 0,51 \cdot \rho_s + 5,93 \cdot M + 54,81 \cdot S_C + 7,02 \cdot S_L. \quad (3.1)$$

Sudarytos (3.1) empirinės lygties statistiniai rodikliai pateikti 3.4 lentelėje. Iš šios lentelės duomenų matyti, kad lygties determinacijos koeficientas $R^2 = 0,9161$ daug didesnis už 0,7, taigi galima teigti, kad parinktas matematinis modelis yra teisingas.

3.4 lentelė. σ_e ir tiriamųjų rodiklių (ρ_s , M , S_C ir S_L) funkcinės priklausomybės ir reikšmingumai

Table 3.4. Functional dependence and significance of σ_e and parameters considered (ρ_s , M , S_C and S_L)

R	R^2	s_e	Stjudento kriterijaus reikšmės			
			ρ_s	M	S_C	S_L
0,9571	0,9161	5,83	13,94	3,35	15,19	2,27

Iš 3.4 lentelės matome, kad visi tiriamieji rodikliai: tankis, organinių medžiagų kiekis, L ir C pjūvių makrostruktūros rodikliai – yra reikšminiai, nes

visų jų apskaičiuotos (2,27–15,19) Stjudento kriterijaus reikšmės didesnės nei kritinis dydis iš lentelės (2,021).

Tačiau makrostruktūros rodikliai skirtingai veikia σ_e : S_C rodiklis daro didesnę poveikį nei S_L , nes S_C rodiklio Stjudento kriterijaus dydis yra daugiau kaip šešis kartus didesnis nei S_L rodiklio. Tai lemia plaušų išsidėstymas gamybos proceso metu, nes, kaip aprašyta 2.1.8 skirsnyje, bandinių kraštinės buvo pažymėtos pagal pluošto klando judėjimo konvejeriu kryptį: pjūvis L – lygiagrečiai su judėjimo kryptimi, pjūvis C – statmenai judėjimo kryptčiai. Tačiau realiomis sąlygomis ir (arba) turint nedidelį tiriamos medžiagos fragmentą gali būti gana sudėtinga nustatyti konvejerio judėjimo kryptį ir teisingai pažymėti pjūvių kraštines. O neteisingai pažymėti pjūviai iškreips skaičiavimo rezultatus.

Todėl siekiant išvengti netikslumų matuojant buvo atliekami papildomi statistiniai skaičiavimai (3.5 lentelė), kurių metu įvertinta abiejų makrostruktūros rodiklių vidutinio dydžio, tankio ir organinių medžiagų įtaka ribiniam gniuždymo įtempiui. Ryšiui aprašyti apskaičiuota patikslinta empirinė lygtis:

$$\sigma_e = -140,66 + 0,55 \cdot \rho_S + 8,06 \cdot M + 82,35 \cdot S_{L-C}. \quad (3.2)$$

Šios (3.2) lygties daugialypės koreliacijos R , determinacijos R^2 koeficientai, vidutinis standartinis nuokrypis s_e ir Stjudento kriterijaus reikšmės pateiktos 3.5 lentelėje.

3.5 lentelė. S_{L-C} , ρ_S ir M įtakos σ_e dydžiui funkcinės priklausomybės bei reikšmingumai apskaičiuoti daugialypės regresijos metodu

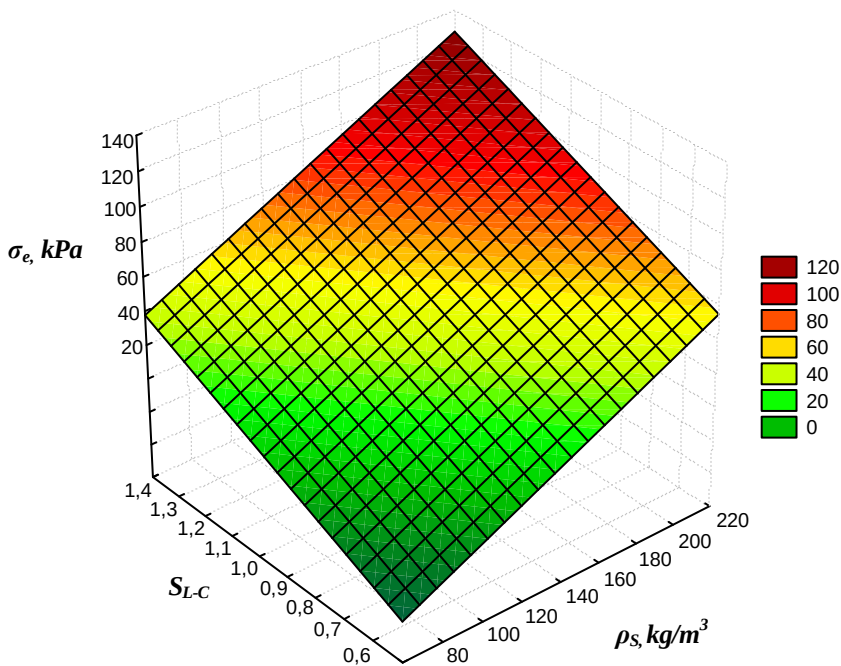
Table 3.5. The functional dependencies and significances of the impact of S_{L-C} , ρ_S and M on the values σ_e calculated by using the multiple regression method

R	R^2	s_e	Stjudento kriterijaus reikšmės		
			ρ_S	M	S_{L-C}
0,9492	0,9006	7,22	12,43	3,79	14,03

Sudarytos empirinės lygties (3.2) determinacijos koeficientas yra didesnis nei 0,7 (3.5 lentelė), todėl matematinis tiesinės daugialypės regresijos modelis parinktas teisingai, o lygtis tinkamai aprašo eksperimentinius duomenis.

Palyginę 3.4 ir 3.5 lentelių duomenis matome, kad daugialypės koreliacijos, determinacijos koeficientų ir vidutinio standartinio nuokrypio dydžiai skiriasi nedaug, todėl galima teigti, kad vietoj makrostruktūros rodiklių atskiriems pjūviams panaudojus vieną rodiklį (vidutinį jų dydį) rezultatų tikslumas bus pakankamas. Tokiu būdu pašalinama tikimybė gauti klaidingą rezultatą, jei netinkamai būtų pažymėtos bandinių kraštinės.

Iš 3.5 lentelės matome, kad ρ_s ir S_{L-C} labiausiai veikia σ_e , nes apskaičiuotos didelės Stjudento kriterijaus reikšmės (12,43; 14,03). Taigi reikšmingiausių rodiklių priklausomybė gali būti pavaizduota grafiškai naudojantis paviršine diagrama (3.19 pav.).



3.19 pav. Gniuždymo ribinio įtempio priklausomybės nuo makrostruktūros rodiklio ir tankio diagrama

Fig. 3.19. Diagram of dependency of critical compression stress on macrostructure parameter and density

Iš 3.19 paveikslo, 3.2 lygties ir 3.5 lentelės duomenų galima spręsti, kad ribinį gniuždymo įtempį labiausiai veikia makrostruktūros rodiklis S_{L-C} (didžiausias Stjudento kriterijaus dydis 14,03), nes jis apibūdina plaušų struktūros kryptingumą. Didėjanti šio rodiklio skaitinė išraiška rodo, kad didėja vertikaliai išsidėsčiusių plaušų kiekis (kurių kryptis sutampa su išorinės spaudimo jėgos veikimo kryptimi). Tokiu būdu struktūroje dominuojantys vertikalios orientacijos plaušai labiau priešinasi gniuždymo apkrovai bei mažai deformuojasi. Jei $S_{L-C} < 0,75$, tai struktūroje dominuoja horizontaliai išsidėstę plaušai ir jų grupės (3.2 lentelė), kurie dėl apkrovos veikimo poveikio lengviau deformuojasi, nes tik nedidelė dalis vertikalios kryptimi ar chaotiškai struktūros tūryje pasiskirsčiusių plaušų priešinasi suspaudimui. Reikšminga tankio įtaka

matoma ir gniuždymo įtempiui (nes Stjudento kriterijaus dydis 12,43), taigi didėjant tankiui didėja ir stipris. Šiuo atveju tankis turi tiesioginių sąsajų su makrostruktūros rodikliu, nes nusako plaušų kiekį tūrio vienetu. Todėl didėjant kiekybiniam plaušų skaičiui (t. y. tankiui) ir aiškiam jų kryptingumui veikiančios apkrovos atžvilgiu didėja mechaninės savybės. Organinių medžiagų kiekio reikšmingumas (nes Stjudento kriterijus – 3,79) rodo, kad yra svarbi ir jungiamoji pluoštinės struktūrose fazė. Esant didesniai rišklio kiekiui, susidaro daugiau suklijuotų kontaktų plaušų sąlyčio vietose, todėl veikianti apkrova tolygiau pasiskirsto suklijuotų plaušų grupėse ir veikia visame plote.

Naudojantis apskaičiuota empirine lygtimi (3.2) galima 90 % tikslumu apskaičiuoti mineralinės vatos gaminio gniuždymo ribinio įtempio dydį (su $\pm 7,2$ kPa paklaida), nustačius vidutinį makrostruktūros rodiklių dydį, gaminio tankį ($70\text{--}200\text{ kg/m}^3$) bei organinių medžiagų kiekį. Taigi net neturint specialios bandymų gniuždymui skirtos įrangos kiekvienoje laboratorijoje, galima gana greitai nustatyti apytikrį σ_e dydį. Tai būtų pirmasis nedestrukcinis mineralinės vatos gniuždymo stiprio nustatymo metodas. Ankstesni bandymai susieti destruktinių (gniuždymo) bandymų metu gautus dydžius su nedestrukciniu metodu (pasitelkus virpesių slopinimo bandinio struktūroje metodą) aprašyti Järlevä *et al.* (1984) publikacijoje, tačiau jie nebuvo praktiškai pritaikyti ir plačiai naudojami.

Kaip jau rašyta 1.4.2 skirsnyje, mineralinės vatos plaušų orientacija struktūroje išreiškiama ir kitais rodikliais. Šaltiniuose (Dyrbøl 1998; Clausen, Jacobsen 2003) autoriai plaušų orientacijai išreikšti naudojo rodiklius Tau (T) ir Kappa (K), nusakančius struktūros kryptingumą ir dominuojančių plaušų pasiskirstymo laipsnį.

Siekiant palyginti makrostruktūros rodiklius (S_C , S_L) su pirmiau aprašytais ir autorių naudotais T ir K rodikliais, atlikti lyginamieji skaičiavimai. Naudojantis tais pačiais skenuotais MW-1.2–MW-1.5 bandinių paviršių vaizdais, apskaičiuoti T ir K rodikliai. Bandinių pjūviai buvo pažymėti tokia pačia tvarka ir simboliais, kurie aprašyti metodikoje (Clausen, Jacobsen 2003) (t. y. mūsų L pjūvis atitinka X , o C pjūvis žymimas Y). Gauti skaičiavimai pateikiami 3.6 lentelėje.

Iš 3.6 lentelėje pateiktų vidutinių dydžių galima pastebėti, kad kai kurių rodiklių ir jų dydžių išsidėstymo tendencijos panašios. Pavyzdžiui, MW-1.3 ir MW-1.5 bandinių C pjūvyje apskaičiuoti rodikliai ($S_C = 1,28$ ir $1,37$; $T_Y = 11,3$ ir $13,0$; $K_Y = 18,9$ ir $14,9$) yra gerokai didesni, palyginti su kitais. Pažvelgus į 3.7 ir 3.11 paveikslų b fragmentus aiškiai matomas kryptingas dominuojantis plaušų išsidėstymas struktūroje vertikalia kryptimi. Bandinio MW-1.2 pjūvyje L (3.6 pav., a) rodikliai ($S_L = 0,90$; $T_X = 2,75$ ir $K_X = 1,86$) gana maži – tai rodo aiškos plaušų orientacijos nebuvimą (t. y. chaotiškumą). Todėl galima daryti prielaidą, kad tarp makrostruktūros rodiklių S_C , S_L , T , K egzistuoja priklausomumas.

3.6 lentelė. Apskaičiuoti skirtingų makrostruktūros rodiklių (S , T , K) vidutiniai dydžiai

Table 3.6. Average values of different macrostructure parameters (S , T , K)

Bandiniai	L pjūvis			C pjūvis			Vidutiniai dydžiai		
	S_L	T_X	K_X	S_C	T_Y	K_Y	S_{L-C}	$T_Y:T_X$ ¹⁾	$K_Y:K_X$ ¹⁾
MW-1.2	0,90	2,75	1,86	0,77	6,95	11,6	0,84	2,53	6,22
MW-1.3	1,17	6,45	6,95	1,28	11,3	18,9	1,23	1,76	2,73
MW-1.4	1,12	4,45	2,89	0,88	3,06	1,66	1,00	0,69	0,57
MW-1.5	0,97	2,05	0,90	1,37	13,0	14,9	1,17	6,36	16,63

¹⁾ Vidurkiai apskaičiuoti kaip abiejų pjūvių rodiklio santykis (Clausen, Jacobsen 2003)

Siekiant nustatyti sąryšį tarp lyginamųjų rodiklių atlikta porinė rodiklių koreliacinė analizė. Skaičiavimai rodo, kad egzistuoja koreliaciniai ryšiai tarp tų pačių pjūvių apskaičiuotų rodiklių: S_L ir atitinkamų T_X ir K_X (poriniai koreliacijos koeficientai $R = 0,67$ – $0,82$), o tarp S_C ir T_Y ir K_Y rodiklių poriniai koreliacijos koeficientai $R = 0,58$ – $0,84$. Tarp vidutinių (S_{L-C} , $T_Y:T_X$, $K_Y:K_X$) dydžių nėra tarpusavio priklausomybės, nes apskaičiuoti nedideli porinės koreliacijos koeficientai $0,19$ – $0,28$ nėra reikšminiai. Tai gali būti aiškinama skirtingų programų ir metodikų taikymu išreiškiant vidutinius gautų rodiklių dydžius. Mūsų atveju buvo skaičiuojamas aritmetinis abiejų rodiklių vidurkis, o Clausen ir Jacobsen (2003) nurodo, kad turi būti imamas to paties rodiklio C pjūvių santykis su dydžiu L pjūvyje.

Nustačius priklausomumą tarp skirtingų autorių taikytų ir kitokiais metodais apskaičiuotų bei išreikštų makrostruktūros rodiklių, statistiškai panagrinėtos jų sąsajos su mechaninėmis tirtų bandinių savybėmis (t. y. gniuždymo ribiniu įtempiu). Skaičiavimuose vertinti išmatuotų MW-1.2–MW-1.5 tipo bandinių ρ_s , σ_e , M (3.3 lentelė) bei apskaičiuoti makrostruktūros (S_{L-C} , $T_Y:T_X$, $K_Y:K_X$) rodikliai (3.6 lentelė). Atlikus regresinę analizę buvo sudaryta empirinė lygtis (3.3), kuri rodo patente (Clausen, Jacobsen 2003) aprašytų makrostruktūros rodiklių ir bandinių fizinių bei mechaninių parametrų tarpusavio priklausomybę:

$$\sigma_e = -126,21 + 0,67 \cdot \rho_s + 22,79 \cdot M + 2,47 \cdot T_Y:T_X - 0,23 \cdot K_Y:K_X. \quad (3.3)$$

3.3 empirinės lygties koreliacijos ir determinacijos koeficientų, vidutinio standartinio nuokrypio bei Stjudento kriterijaus reikšmių dydžiai, apskaičiuoti daugialypės koreliacijos būdu, pateikti 3.7 lentelėje.

Palyginę skirtingais metodais apskaičiuotų makrostruktūros rodiklių (S_{L-C} , $T_Y:T_X$, $K_Y:K_X$) daugialypių koreliacijos ir determinacijos koeficientų bei vidutinių standartinių nuokrypių dydžius (3.5 ir 3.7 lentelės) matome, kad visi makrostruktūros rodikliai koreliuoja su σ_e rodikliu.

3.7 lentelė. ρ_s , M , $T_Y:T_X$, $K_Y:K_X$ įtakos σ_e dydžiui funkcinės priklausomybės ir reikšmingumai apskaičiuoti daugialypės regresijos metodu

Table 3.7. Functional dependencies and significances of the impact of ρ_s , M , $T_Y:T_X$, and $K_Y:K_X$ on σ_e – calculations done using the multiple regression method

R	R^2	s_e	Stjudento kriterijaus reikšmės			
			ρ_s	M	$T_Y:T_X$	$K_Y:K_X$
0,7065	0,4991	14,33	4,15	2,76	7,75	2,21

Tačiau funkcinės priklausomybės stiprumas priklauso nuo naudojamų makrostruktūros rodiklių. Stipriausias tarpusavio ryšys yra tarp σ_e ir S_{L-C} (nes $R = 0,9492$), o pagal empirinę (3.2) lygtį gniuždymo ribinio įtempio dydžius galima apskaičiuoti su $\pm 7,2$ kPa paklaida. $T_Y:T_X$ ir $K_Y:K_X$ rodikliai su σ_e koreliuoja silpniau ($R = 0,7065$), o naudojantis (3.3) lygtimi apskaičiuoti gniuždymo ribinio įtempio dydžiai neviršys $\pm 14,3$ kPa paklaidos.

Iš apskaičiuotų (3.5, 3.7 lentelės) determinacijos koeficiento dydžių matome, kad to paties bandinio gniuždymo ribinio įtempio dydį 90 % tikslumu apskaičiuosime naudodamiesi S_{L-C} rodikliu, ir 49,9 % tikslumu pasitelkus $T_Y:T_X$ ir $K_Y:K_X$ rodiklius. Taigi galima tvirtinti, kad makrostruktūros rodiklis (S_{L-C}) tiksliau nei kiti rodikliai apibūdina funkcinį ryšį tarp makrostruktūros ir fizinių ir mechaninių savybių.

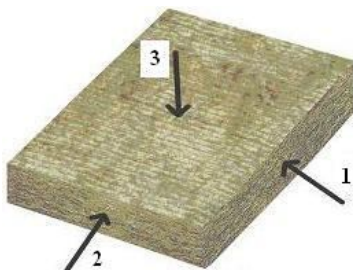
3.3. Mineralinės vatos plokščių gniuždymo stiprio priklausomybė nuo apkrovos pridėjimo krypties

Plaušų dominavimas kurios nors vienos krypties atžvilgiu keičia įvairių medžiagų charakteristikas (Берестова 2006), nes erdvinės pluoštinės struktūros medžiagų savybės įvairiomis kryptimis nevienodos. Konvejeriniu būdu (Strazdas, Eidukevičius 1985) gaminamuose mineralinės vatos gaminiuose dauguma plaušų yra išsidėstę horizontalia kryptimi, todėl nuo apkrovos veikimo krypties priklauso bandinių gniuždymo stipris.

Žinant dominuojančių plaušų išsidėstymo struktūroje kryptingumą ir tai susiejus su mechaninėmis bei deformacinėmis charakteristikomis, galima reguliuoti plaušų orientaciją. Tai leidžia optimizuoti gamybos procesus ar gaminti norimų stiprumo (deformacijos) savybių gaminius pasinaudojus aiškiu kryptingumu.

Siekdami nustatyti akmens vatos gaminių gniuždymo stiprio dydžius ir deformatyvumą atsižvelgiant į struktūros ypatumus, buvo nustatyti makrostruktūros rodikliai ir išmatuotas gniuždymo stipris priklausomai nuo apkrovos veikimo krypties pluošto klando judėjimo konvejeriu atžvilgiu.

Homogeniškos struktūros chaotiškos plaušų orientacijos plokštėse pagal gamybos technologijos nulemtą plaušų kryptingumą galima išskirti tris galimas gniuždymo apkrovos pridėjimo kryptis, kai gniuždymo rezultatai bus skirtingi: 1 – išilgai pluošto klando judėjimo krypties; 2 – statmenai pluošto klando judėjimo kryptčiai; 3 – statmenai gaminio paviršiui (3.20 pav.). Tai sąlyginis žymėjimas, pasirinktas pagal pluošto klando judėjimo konvejeriu kryptį (šiuo atveju ji sutampa su pažymėta 1 kryptimi) bei gniuždymo apkrovos veikimo kryptį gaminio paviršiaus atžvilgiu (matoma pagal gaminio paviršiuje suformuotas įspaudas).



3.20 pav. Gniuždymo apkrovos pridėjimo kryptys: 1 – išilgai pluošto klando judėjimo krypties; 2 – statmenai pluošto klando judėjimo kryptčiai; 3 – statmenai gaminio paviršiui

Fig. 3.20. Direction of working of the compressive load: 1 – along the direction of movement of the fibre web; 2 – perpendicularly to the direction of movement of the fibre web; 3 – perpendicularly to the surface of the product

Gniuždymo bandymų metodika aprašyta 2.1.3 skirsnyje. Tyrimams naudoti MW-1.2–MW-1.4 tipo bandiniai, kurių dydis 200×200×200 mm (2.1 lentelė).

Iš trijų pusių vizualiai apžiūrėjus iš vienos plokštės išpjautus bandinius akivaizdžiai matomas aiškus plaušų kryptingumas. Dėl skirtingos struktūros bandymų metu išmatuoti: gniuždymo įtempis (σ_{10}), esant 10 % deformacijai ir stipris gniuždant (σ_m), o šių parametrų palyginimui – dar ir gniuždymo ribinis įtempis (σ_e). Rezultatai pateikiami 3.8 lentelėje.

Iš 3.8 lentelėje pateiktų rezultatų matyti, kad iš vienos plokštės išpjautų bandinių struktūra ir mechaninės savybės skiriasi, t. y. pasireiškia anizotropiškumas. Gniuždymo įtempis, esant 10 % deformacijai, arba stipris gniuždant priklauso nuo plaušų išsidėstymo gaminio struktūroje ir apkrovos pridėjimo krypties. Statmenai pluošto klando judėjimo kryptčiai spaudžiamo bandinio vidutinis stipris gniuždant buvo 2,2–4 kartus didesnis, lyginant su dydžiu, gautu gniuždymo apkrovai veikiant išilgai pluošto klando judėjimo krypties ir statmenai gaminio paviršiui.

Nors visų bandinių vidutiniai tankiai ir organinių medžiagų kiekiai buvo labai panašūs ir skyrėsi labai nedaug (tai paaiškinama natūralia rezultatų sklaida). Taigi skirtingų gniuždymo įtempio, esant 10 % deformacijai (stiprio gniuždant), dydžių (priklausomai nuo plaušų orientacijos) negalėjo nulemti nei akmens vatos tankio, nei nedideli rišiklio kiekių nuokrypiai.

3.8 lentelė. Tankio, makrostruktūros rodiklio, gniuždymo įtempio esant 10 % deformacijai (stiprio gniuždant), gniuždymo ribinio įtempio, organinių medžiagų kiekio ir apskaičiuoto gniuždymo ribinio įtempio vidutiniai dydžiai

Table 3.8. Average values of density, macrostructure parameter, compression stress at 10% deformation (compression strength), critical compression stress, organic material content, and calculated critical compression stress

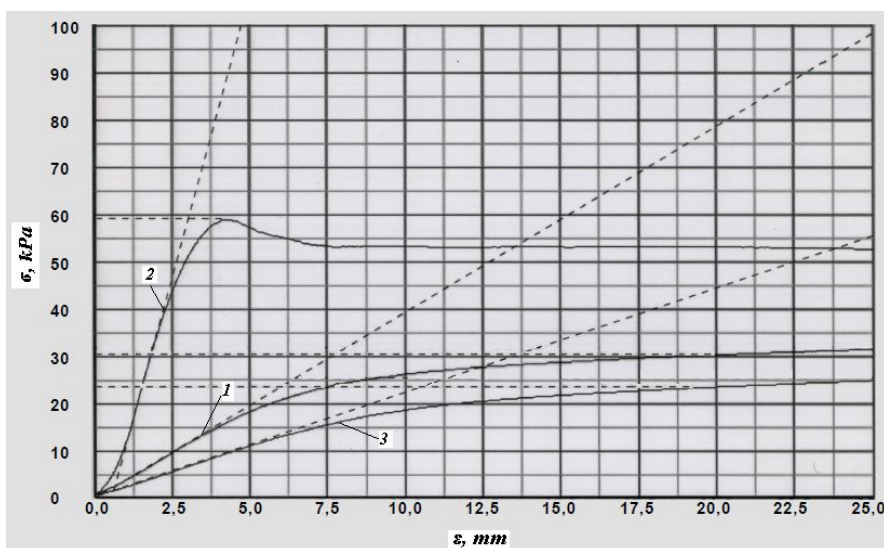
Bandinio tipas	Gniuždymo kryptis	ρ_s , kg/m ³	M, %	S_{L-C}	Išmatuota		Apskaičiuota ¹⁾
					σ_{10} , kPa	σ_e , kPa	σ_e , kPa
MW-1.2	3	95,2	3,70	0,84	16,1	11,5	10,7
MW-1.3	2	98,8	3,66	1,23	66,2 ²⁾	46,8	44,5
MW-1.4	1	97,1	3,63	1,00	29,7	20,4	24,4

¹⁾ Pagal empirinę 3.2 lygtį; ²⁾ Stipris gniuždant (σ_m)

Bandymų metu užrašytos apkrovos ir deformacijos kreivės (3.21 pav.) rodo skirtingas bandinių, apkraunamų gniuždymo apkrova, veikiančia skirtingomis kryptimis, deformacijas. Pirmu atveju (kai apkrova pridedama išilgai pluošto klogo judėjimo krypties (3.21 pav., 1) ir statmenai gaminio paviršiui (3.21 pav., 3), bandinys deformuojasi palaipsniui, be vizualiai pastebimos struktūros suirties. Gniuždymo įtempis sparčiau didėja apkrovimo pradžioje (maždaug iki 3–4 % deformacijos), o bandiniui deformavus 5–7 % matomas tik nedidelis stiprio didėjimas lyginant su deformacija.

Tuo atveju, kai pridedama apkrova, veikianči statmenai pluošto klogo judėjimo kryptčiai (3.21 pav., 2), bandiniai deformavosi lėčiau ir jų deformacijų kreivė pradiniam gniuždymo etape buvo kur kas statesnė, bet pasiekusi apie 2 % deformacijas staigiai suiro.

Didelis σ_{10} ir σ_m išmatuotų dydžių skirtumas paaiškinamas ir vizualiai (plika akimi) matoma struktūros anizotropija dėl dominuojančių plaušų išsidėstymo kurios nors vienos krypties atžvilgiu (3.9 lentelė). Tai patvirtina ir apskaičiuoti skirtingo dydžio makrostruktūros rodikliai, nes apkrovai veikiant 1 ir 3 kryptimis (pagal 3.20 pav.) S_{L-C} yra 0,84 ir 1,00 atitinkamai gauti σ_{10} rezultatai nėra dideli (16,1 ir 29,7 kPa).



3.21 pav. Apkrovos ir deformacijos kreivės priklausomai nuo gniuždymo apkrovos veikimo krypties: 1 – išilgai pluošto klogo judėjimo krypties (bandinys MW-1.4/8); 2 – statmenai pluošto klogo judėjimo kryptčiai (bandinys MW-1.3/7); 3 – statmenai gaminio paviršiui (bandinys MW-1.2/5)

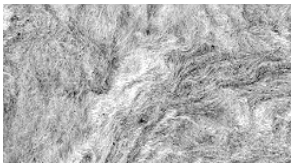
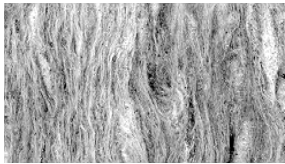
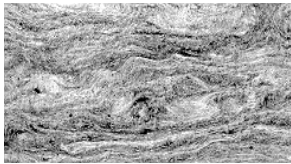
Fig. 3.21. Load and deformation curves depending on the direction of working of the compressive load: 1 – along the direction of movement of the fibre web (test specimen MW-1.4/8); 2 – perpendicularly to the direction of movement of the fibre web (test specimen MW-1.3/7); 3 – perpendicularly to the surface of the product (test specimen MW-1.2/5)

Jei apskaičiuotas makrostruktūros rodiklis kinta $0,76 < S_{L-C} < 1,09$ (3.2 lentelė), tai homogeniškos struktūros MW-1.4 ir MW-1.2 tipo bandinius galima priskirti prie tariamai chaotiškos plaušų orientacijos gaminių. Nors struktūroje dominuoja chaotiška plaušų orientacija, visgi ne mažai jų yra išsidėstę horizontalia kryptimi (MW-1.4/8 ir MW-1.2/5 iš 3.9 lentelės), kuri sutampa su pluošto klogo judėjimo konvejeriu kryptimi.

Chaotiškos plaušų orientacijos gaminių apkraunant gniuždymo apkrova ir ją pridėdant statmenai pluošto klogo judėjimo kryptčiai (2 kryptis pagal 3.20 pav.), kai plaušų išsidėstymo (dominuoja vertikalios orientacijos plaušai, nes $S_{L-C} = 1,24$ (bandinys MW-1.3/7 iš 3.9 lentelės)) ir gniuždymo kryptys sutampa, gaunamas didelis stipris gniuždant ($\sigma_m = 66,2$ kPa). Panašūs reiškiniai, kai apkrovos pridėjimo kryptis lemia medžiagos stiprumo savybių dydį, nustatyti ir tiriant kitas kompozitines medžiagas (Zeleniakienė *et al.* 2005; Schneider, Lauke 2007).

3.9 lentelė. Plaušų orientacija priklausomai nuo gniuždymo apkrovos veikimo krypties MW-1.2–MW-1.4 tipų charakteringuose bandiniuose

Table 3.9. Fibres orientation of characteristic MW-1.2–MW-1.4 test specimens depending on the direction of the compressive load

		
Bandinys: MW-1.4/8 Gniuždymo kryptis: 1 $S_{L-C} = 1,00$	Bandinys: MW-1.3/7 Gniuždymo kryptis: 2 $S_{L-C} = 1,24$	Bandinys: MW-1.2/5 Gniuždymo kryptis: 3 $S_{L-C} = 0,84$

Dėl skirtingo plaušų išsidėstymo struktūroje šių bandymų metu, be gniuždymo įtempio esant 10 % deformacijai ir stiprio gniuždant, buvo išmatuoti ir gniuždymo ribinio įtempio dydžiai (3.8 lentelė). Norint objektyviai palyginti visų bandinių tipų gniuždymo stiprio savybes, būtina lyginti σ_e vertinant išmatuotą dydį tamprumo zonos pabaigoje (nes viršijus šį dydį prasideda irimas). Taip pat atlikti lyginamieji skaičiavimai, kurių metu palyginti bandiniams išmatuoti ir pagal empirinę 3.3 lygtį apskaičiuoti gniuždymo ribinio įtempio dydžiai. Iš 3.8 lentelės matome, kad MW-1.2 bandinių išmatuotas vidutinis σ_e siekia 11,6 kPa. Todėl į (3.2) lygtį įstačius atitinkamų parametrų dydžius: tankio – 95,2 kg/m³, organinių medžiagų kiekio – 3,70 % ir makrostruktūros rodiklio – 0,84, gaunamas apskaičiuotas 10,7 kPa gniuždymo ribinio įtempio dydis. Tą patį atlikus su MW-1.3 ir MW-1.4 tipo bandiniais gauti MW-1.4 bandinių dydžiai: $\sigma_e = 44,5$ kPa MW-1.3 ir $\sigma_e = 24,4$ kPa. Palyginę apskaičiuotus dydžius su realiai išmatuotais matome, kad skirtumas nėra didelis ir neviršija vidutinio standartinio nuokrypio (3.5 lentelė). Taigi galima teigti, kad apskaičiuota empirinė (3.2) lygtis tinkama naudoti norint prognozuoti mineralinės vatos gaminių gniuždymo stiprio savybes.

Atliktų tyrimų metu gauti rezultatai rodo, kad anizotropiškumo laipsnis gali būti objektyviai ir kiekybiškai išreikštas naudojantis makrostruktūros rodikliu, nuo kurio dydžio priklauso mineralinės vatos gaminių mechaniniai rodikliai.

3.4. Trečiojo skyriaus išvados

1. Mineralinės vatos plaušų išsidėstymas struktūroje gali būti nusakomas makrostruktūros rodikliais S_L , S_C arba S_{L-C} . Pasitelkus skaitinius makrostruktūros rodiklių dydžius homogeniškos struktūros gaminius galima suskirstyti taip: gaminiai, kuriuose daugiausiai plaušų išsidėstę lygiagrečiai

- su x ašimi, vadinami tariamai horizontalios orientacijos, o jų $S_{L-C} \leq 0,75$. Gaminiai, kuriose dominuoja statmeni x ašiai plaušai, vadinami tariamai vertikalios orientacijos ir jų $S_{L-C} \geq 1,10$. Gaminiai su atsitiktinai išsidėsčiusiais ar su aiškiai neapibrėžtos krypties ir (arba) orientacijos plaušais vadinami tariamai chaotiškos orientacijos, kai jų $S_{L-C} = 0,76-1,09$.
2. Remiantis išanalizuotos literatūros šaltinių duomenimis, sudaryta mineralinės vatos gaminių klasifikacija pagal struktūrą. Ši klasifikacija leidžia tiksliau apibūdinti ir įvertinti skirtingos struktūros mineralinės vatos gaminius, sprendžiant tradicinių termoizoliacinių medžiagų efektyvumo didinimo problemas ir praplečiant naudojimo sritis.
 3. Įrodyta, kad tarp mineralinės vatos gaminių gniuždymo ribinio įtempio ir makrostruktūros rodiklių, tankio ir organinių medžiagų kiekio egzistuoja labai stiprus funkcinis ryšys, nes daugialypio koreliacijos koeficiento reikšmė – 0,9492. Nustatyta, kad pasiūlytas makrostruktūros rodiklis S_{L-C} ir jo nustatymo bei apskaičiavimo metodas beveik du kartus tikslesnis, lyginant su kitu metodu.
 4. Pateikta empirinė lygtis, kuria naudojantis galima apskaičiuoti σ_e dydį $\pm 7,2$ kPa tikslumu žinant makrostruktūros rodiklių vidutinį dydį, gaminio tankį (70–200 kg/m³) bei organinių medžiagų kiekį. Tai leidžia nedestrukciniu metodu prognozuoti mineralinės vatos gaminių gniuždymo stiprio savybes.
 5. Mineralinės vatos struktūros anizotropiškumo laipsniui išreikšti gali būti naudojami makrostruktūros rodikliai. Skaitiniais dydžiais įrodyta, kad apkrovos veikimo kryptis ir plaušų išsidėstymas gaminio struktūroje labai keičia mineralinės vatos plokščių stiprumo savybes. Bandinių, kuriuose plaušų orientacija sutampa su apkrovos veikimo kryptimi, gniuždymo stipris 2,2–4 kartus didesnis nei bandinių su kita plaušų orientacija.

Skirtingos struktūros mineralinės vatos gaminių gniuždymo rodiklių ir deformacinių savybių tyrimai

Vystantis technologijos pažangai tobulėja ir mineralinės vatos gamybos procesai. Dabar, be tradicinių gamybos būdų, yra galimybės ne tik reguliuoti plaušų orientaciją struktūroje, bet ir konvejeriniu būdu formuoti bei gaminti sluoksniuotos struktūros plokštės (Cridland, Larsø 1988; Meres 2000; Clausen, Jacobsen 2003). Tai iš esmės pakeitė standžių mineralinės vatos gaminių šilumines, stiprumo, deformacines ir eksploatacines savybes. Šiuo metu gaminamų mineralinės vatos gaminių savybės labai pasikeitė: ypač daug tankis ir stiprumo parametrai, o šilumos laidumas – mažiau. Pavyzdžiui, prieš 20 metų gamintų standžių mineralinės vatos plokščių tankis buvo 200–600 kg/m³ esant 60–100 kPa gniuždymo įtempiui, o dabar tokio dydžio įtempis išmatuojamas 90–200 kg/m³ tankio gaminių (priklausomai nuo plaušų orientacijos).

Šio skyriaus medžiaga publikuota Buskos ir kitų autorių darbuose (Buska 2005; Buska, Gailius 2005; Buska 2006; Buska 2007; Buska, Mačiulaitis 2007a; Buska, Mačiulaitis 2007b).

4.1. Homogeniškos ir heterogeniškos struktūros mineralinės vatos gaminių gniuždymo rodiklių tyrimai

Siekiant nustatyti gniuždymo įtempį, esant 10 % deformacijai, ir sutelktą apkrovą, esant 5 mm deformacijai, homogeniškos struktūros chaotiškos plaušų orientacijos ir heterogeniškos struktūros dviejų tankių akmens vatos gaminiams buvo atrinkti bandiniai plataus nominalaus tankio intervalo – nuo 80 iki 180 kg/m³. Detalus naudotų bandinių aprašymas pateikiamas 2.2 lentelėje 2.2 poskyryje.

4.1.1. Homogeniškos ir heterogeniškos struktūros gaminių gniuždymo įtempio, esant 10 % deformacijai, nustatymas

Eksperimentinių tyrimų metu išmatuoti vidutiniai tankio, gniuždymo įtempio ir organinių medžiagų kiekio dydžiai pateikti suvestinėje 4.1 lentelėje.

4.1 lentelė. Homogeniškos ir heterogeniškos struktūros bandinių tankio, gniuždymo įtempio ir organinių medžiagų kiekio vidutiniai dydžiai

Table 4.1. Average values of density, compression stress, and organic material content of test specimens with homogeneous and heterogeneous structure

Bandiniai	Tankis (atliekant gniuždymo bandymus) ρ_s , kg/m ³	Gniuždymo įtempis esant 10 % deformacijai σ_{10} , kPa	Organinių medžiagų kiekis M , %
MW-1.8	179,3	99,4	3,51
MW-1.9	143,9	77,1	2,93
MW-1.10	130,4	58,6	3,48
MW-1.11	120,6	52,7	3,05
MW-1.12	153,4	79,5	3,37
MW-1.13	159,4	89,1	3,01
MW-1.14	118,8	41,3	2,44
MW-1.15	83,8	24,1	2,03
MW-1.16	93,8	33,9	3,87
MW-2.3	167,1	95,1	3,52
MW-2.4	101,7	31,0	3,54
MW-2.5	124,4	57,8	3,39
MW-2.6	131,4	57,2	3,61
MW-2.7	148,5	76,3	3,63
MW-2.8	86,9	20,8	2,30

Iš 4.1 lentelėje pateiktų rezultatų matyti, kad išmatuoti vidutiniai tankių dydžiai apima gana platų intervalą: mažiausias MW-1.15 tipo bandinių $\rho_s = 83,8 \text{ kg/m}^3$, o didžiausias MW-1.8 $\rho_s = 179,3 \text{ kg/m}^3$. Apskaičiuoti tankių vidutiniai standartiniai nuokrypiai (s): homogeniškos struktūros bandinių – $7,6\text{--}30,2 \text{ kg/m}^3$, o heterogeniškos struktūros – $8,5\text{--}17,9 \text{ kg/m}^3$ (priklausomai nuo nominalaus bandinių tankio). Dideli tankio vidutinio standartinio nuokrypio dydžiai (ypač homogeniškos struktūros bandinių) rodo, kad akmens vatos struktūra nėra vienalytė dėl plaušų, organinių medžiagų ir mineralinių intarpų pasiskirstymo netolygumo. Didžiausią įtaką tam daro gamybos proceso ypatumai, be to, tam įtakos turėjo ir natūrali sklaida, nes buvo naudoti labai skirtingo tankio bandiniai gana plačiu intervalu (atskirų bandinių tankis kito $58\text{--}245 \text{ kg/m}^3$).

Abiejų struktūrų bandinių organinių medžiagų kiekio vidutiniai standartiniai nuokrypiai (s) buvo $0,2\text{--}0,4 \%$.

Siekiant nustatyti homogeniškos ir heterogeniškos struktūros plokščių gniuždymo įtempio, esant 10% deformacijai, sąryšio su tiriamais rodikliais (tankiu, storiu ir organinių medžiagų kiekiu) dėsninumus buvo atlikta statistinė ir regresinė analizės bei sudarytos empirinės lygtys (4.2 lentelė).

4.2 lentelė. ρ_s, M, d įtakos σ_{10} priklausomybės empirinės lygtys

Table 4.2. Empirical dependency equations of the impact of ρ_s, M , and d on σ_{10}

Lygtis	Bandiniai	Empirinė lygtis
4.1	Homogeniškos struktūros	$\sigma_{10} = -61,1 + 0,82 \cdot \rho_s + 2,72 \cdot M + 0,09 \cdot d$
4.2	Heterogeniškos struktūros	$\sigma_{10} = -63,1 + 0,88 \cdot \rho_s + 1,31 \cdot M + 0,014 \cdot d$

Apskaičiuotos empirinių lygčių (4.1 ir 4.2) daugialypės koreliacijos ir determinacijos koeficientų, vidutinio standartinio nuokrypio ir Stjudento kriterijaus reikšmės pateiktos 4.3 lentelėje.

4.3 lentelė. Tiriamųjų rodiklių ρ_s, M, d įtakos σ_{10} funkcinės priklausomybės ir reikšmingumai apskaičiuoti daugialypės regresijos metodu

Table 4.3. Functional dependencies and significances of the impact of the parameters ρ_s, M , and d being considered on σ_{10} – calculated using the multiple regression method

Lygtis	R	R^2	s_e	Stjudento kriterijaus reikšmės		
				ρ_s	M	d
4.1	0,9032	0,8159	13,04	46,11	2,70	1,87
4.2	0,9419	0,8872	8,57	65,62	2,09	1,41

Iš 4.3 lentelės matome, kad σ_{10} dydis labiausiai priklauso nuo ρ_s ir mažiau nuo M , nes apskaičiuotos Stjudento kriterijaus reikšmės didesnės nei lentelės reikšmė 1,96, o tai patvirtina šių rodiklių reikšmingumą. Tačiau storio įtaka σ_{10} nenustatyta (apskaičiuotas Stjudento kriterijus 1,87 ir 1,41).

Nustačius, kad σ_{10} daro įtaką tik tankis ir organinių medžiagų kiekis, atlikti papildomi daugialypės regresijos skaičiavimai įvertinant tik reikšminių rodiklių (ρ_s, M) įtaką. Sudarytos empirinės lygtys pateiktos 4.4 lentelėje.

4.4 lentelė. Reikšminių rodiklių ρ_s, M įtakos σ_{10} priklausomybės empirinės lygtys

Table 4.4. The empirical dependency equations of the impact of the significant parameters ρ_s and M on σ_{10}

Lygtis	Bandiniai	Empirinė lygtis
4.3	Homogeniškos struktūros	$\sigma_{10} = -52,8 + 0,78 \cdot \rho_s + 3,62 \cdot M$
4.4	Heterogeniškos struktūros	$\sigma_{10} = -62,7 + 0,88 \cdot \rho_s + 1,57 \cdot M$

Apskaičiuotų (4.3) ir (4.4) lygčių koreliacijos ir determinacijos koeficientų, vidutinio standartinio nuokrypio ir Stjudento kriterijaus reikšmės pateiktos 4.5 lentelėje.

4.5 lentelė. Reikšminių rodiklių ρ_s, M , įtakos σ_{10} funkcinės priklausomybės ir reikšmingumai apskaičiuoti daugialypės regresijos metodu

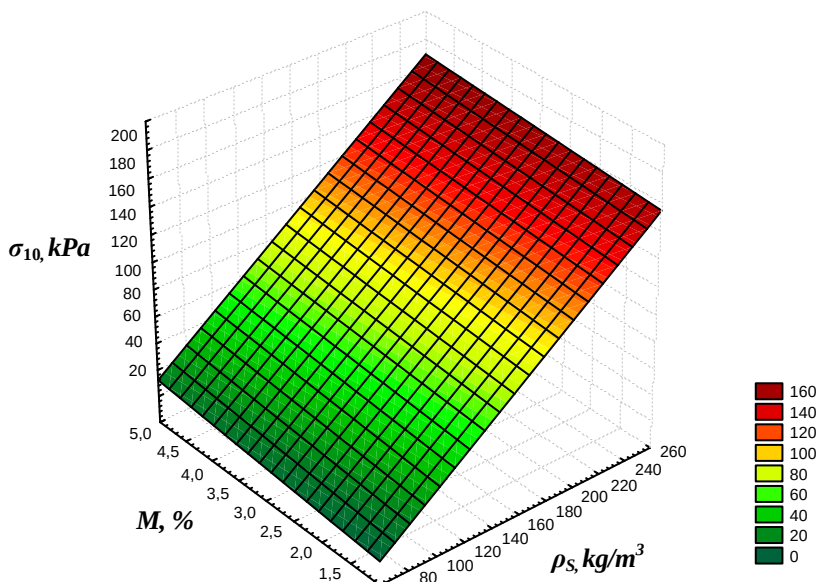
Table 4.5. Functional dependencies and significances of the impact of the significant parameters ρ_s and M on σ_{10} – calculated using the multiple regression method

Lygtis	R	R^2	s_e	Stjudento kriterijaus reikšmės	
				ρ_s	M
4.3	0,8991	0,8083	13,3	46,92	3,62
4.4	0,9416	0,8867	8,59	66,38	2,38

Palyginę 4.3 ir 4.5 lentelėse pateiktus apskaičiuotus koreliacijos ir determinacijos koeficientus bei vidutinius standartinius nuokrypius matome, kad jie skiriasi nedaug ($<1\%$). Todėl apskaičiuotos supaprastintos empirinės lygtys (4.3 ir 4.4) gana tiksliai aprašo eksperimentų duomenis, o kadangi koreliacijos koeficientai $R = 0,8991$ – $0,9416$ yra artimi vienetui bei apskaičiuoti determinacijos koeficientai $R^2 = 0,8083$ – $0,8867$ yra didesni už 0,5, taigi gali būti taikomas pasirinktas regresijos modelis.

4.5 lentelėje pateikti apskaičiuoti tankio ir organinių medžiagų kiekio rodikliai yra reikšminiai (nes Stjudento kriterijaus reikšmės didesnės nei lentelės dydis 1,96) abiejų struktūrų gaminiams, todėl gniuždymo įtempis, esant 10 % deformacijai, priklauso nuo jų dydžio.

Homogeniškos struktūros plokščių tankio, organinių medžiagų kiekio ir gniuždymo įtempio, esant 10 % deformacijai, sąryšį galima pavaizduoti paviršine diagrama (4.1 pav.).



4.1 pav. Homogeniškos struktūros gaminių gniuždymo įtempio, esant 10 % deformacijai (σ_{10}), priklausomybės nuo tankio (ρ_s) ir organinių medžiagų kiekio (M) paviršinė diagrama

Fig. 4.1. Diagram of dependency of compression stress at 10% deformation (σ_{10}) on density (ρ_s) and organic material content (M) for products with a homogeneous structure

Iš 4.1 paveikslo matome, kad σ_{10} dydį labiausiai lemia tankis ir kiek mažiau – organinių medžiagų kiekis. Šitai aiškinama tuo, kad esant didesniai plaušų kiekiui tūryje jie labiau susipina bei padidėja tarpusavyje kontaktuojančių plaušų skaičius, todėl spaudžiant dėl trinties ir plaušų tamprumo didėja pasipriešinimas gniuždymui. O didesnis rišamosios medžiagos kiekis dar tvirčiau suklįjuoja plaušus ir struktūra labiau priešinasi suspaudimui. Šiuo atveju gaminio gniuždymo įtempis 80,83–88,67 % priklauso nuo abiejų reikšminių rodiklių: tankio ir organinių medžiagų kiekio.

Homogeniškos struktūros gaminio gniuždymo įtempį, esant 10 % santykinei deformacijai, galima apskaičiuoti naudojantis duotąja (4.3) empirine lygtimi ir žinant gaminio tankį (80–180 kg/m³) bei organinių medžiagų kiekį (galima skaičiavimo paklaida – 13,3 kPa). (4.4) empirine lygtimi apskaičiuosime

heterogeniškos struktūros gaminio gniuždymo įtempį, esant 10 % santykinei deformacijai su 8,59 kPa tikslumu. Be to, gniuždymo įtempiui įtakos turi ir gaminių struktūra (plaušų išsidėstymo kryptis), ir jos vienalytiškumas: sritys su mažesniu ar didesniu rišiklio kiekiu, plaušų storis, neplaušinių tarpų skaičius ir kt. (Keršulis *et al.* 2009).

Atlikus lyginamuosius skaičiavimus pagal apskaičiuotą empirinę (4.3) lygtį ir Gnip *et al.* (2009) publikacijoje pateiktomis lygtimis, gaunami labai panašūs dydžiai. Pavyzdžiui, 103 kg/m³ tankio bandiniui su 3,84 % organinių medžiagų kiekiu, naudojantis (4.3) lygtimi, apskaičiuota $\sigma_{10} = 41,4$ kPa, o pagal lygtį iš Gnip *et al.* (2009) darbo – $\sigma_{10} = 42,1$ kPa. Šis skirtumas nedidelis ir neviršija vidutinio standartinio nuokrypio dydžio, todėl rezultatų atkartojimas pakankamas.

Kitame šaltinyje (Широкоподюк 2007b) pateikiami apskaičiuoti koreliacijos koeficientai, nusakantys mineralinės vatos plokščių tankio ir gniuždymo stiprio priklausomybę, svyruoja nuo 0,64 iki 0,9. Taigi 4.5 lentelėje pateiktas mūsų apskaičiuotas $R = 0,8991$ yra artimas publikacijoje pateiktam maksimaliam dydžiui.

Veiseh *et al.* (2007) publikacijoje σ_{10} priklausomybė išreikšta tik nuo tankio, panaudojus laipsninį modelį, o apskaičiuotas $R^2 = 0,79$. Atlikus lyginamuosius skaičiavimus pagal pateiktą empirinę lygtį, gaunami labai maži σ_{10} dydžiai (pvz., 100 kg/m³ tankio bandiniui apskaičiuotas tik $\sigma_{10} = 1,8$ kPa). Publikacijoje nėra detalaus bandinių aprašymo bei matoma, kad išmatuotos σ_{10} reikšmės pasiskirsčiusios labai plačiai, o tai aiškinama gamybos proceso ypatumais bei skirtingu gniuždymo laipsniu.

4.1.2. Homogeniškos ir heterogeniškos struktūros gaminių sutelktosios apkrovos nustatymas

Homogeniškos ir heterogeniškos struktūros bandiniai atrinkti plačiu tankio intervalu: homogeniškos struktūros 73,0–178,5 kg/m³, o heterogeniškos struktūros 85,2–165,3 kg/m³.

Bandymų metu išmatuoti homogeniškos struktūros chaotiškos plaušų orientacijos ir heterogeniškos struktūros dvitankių bandinių tankio sutelktosios apkrovos ir organinių medžiagų kiekio vidutiniai dydžiai pateikti suvestinėje 4.6 lentelėje.

Bandymų metu mažiausias išmatuotas MW-2.8/47 bandinio tankis buvo 68 kg/m³, o didžiausias 220 kg/m³ MW-1.8/72 bandiniui, taigi skirtumas siekia 152 kg/m³. Apskaičiuoti visų tipų bandinių tankio vidutiniai standartiniai nuokrypiai buvo 3,6–21 kg/m³ (priklausomai nuo nominalaus tankio). Organinių medžiagų kiekiai bandiniuose buvo labai panašūs – apytiksliai 3,0–3,5 % (išskyrus MW-1.15 ir MW-2.8 bandinius). Apskaičiuoti vidutiniai standartiniai nuokrypiai (s) buvo 0,2–0,4 %.

4.6 lentelė. Homogeniškos ir heterogeniškos struktūros bandinių tankio, sutelktosios apkrovos ir organinių medžiagų kiekio vidutiniai dydžiai

Table 4.6. The average values of density, point load, and organic material content of test specimens with homogeneous and heterogeneous structure

Bandiniai	Tankis (atliekant sutelktosios apkrovos bandymus) ρ_{F_5} , kg/m ³	Sutelktoji apkrova esant 5 mm deformacijai F_5 , N	Organinių medžiagų kiekis M , %
MW-1.8	178,5	834,8	3,51
MW-1.10	129,5	589,9	3,48
MW-1.11	121,7	483,1	3,05
MW-1.12	148,6	614,3	3,37
MW-1.13	157,9	785,6	3,01
MW-1.15	73,0	117,1	2,03
MW-1.16	92,0	268,8	3,87
MW-2.3	165,3	1168,5	3,52
MW-2.4	95,4	326,7	3,54
MW-2.5	124,0	613,4	3,39
MW-2.6	130,2	776,1	3,61
MW-2.7	146,6	968,5	3,63
MW-2.8	85,2	248,2	2,30

Siekiant nustatyti sutelktosios apkrovos, esant 5 mm deformacijai, dydžių priklausomybes nuo tiriamųjų rodiklių (tankio, organinių medžiagų kiekio bei bandinių storio) atlikti daugialypės regresijos skaičiavimai ir sudarytos empirinės lygtys (4.7 lentelė).

4.7 lentelė. ρ_{F_5} , M , d įtakos F_5 priklausomybės empirinės lygtys

Table 4.7. The empirical dependency equations of the impact of ρ_{F_5} , M , and d on F_5

Lygtis	Bandiniai	Empirinė lygtis
4.5	Homogeniškos struktūros	$F_5 = -412,0 + 6,84 \cdot \rho_{F_5} + 7,2 \cdot M + 0,57 \cdot d$
4.6	Heterogeniškos struktūros	$F_5 = -956,85 + 11,45 \cdot \rho_{F_5} + 9,23 \cdot M + 1,6 \cdot d$

Sudarytų empirinių (4.5 ir 4.6) lygčių koreliacijos ir determinacijos koeficientai, vidutiniai standartiniai nuokrypiai bei apskaičiuotos Stjudento kriterijaus reikšmės pateiktos 4.8 lentelėje.

4.8 lentelė. Homogeniškos ir heterogeniškos struktūros bandinių F_5 funkcinės priklausomybės ir reikšmingumai nuo ρ_{F5} , M , d paskaičiuoti daugialypės regresijos metodu

Table 4.8. The functional dependencies and significances of ρ_{F5} , M , and d on F_5 calculated by using the multiple regression method for test specimens with homogeneous and heterogeneous structure

Lygtis	R	R^2	s_e	Stjudento kriterijaus reikšmės		
				ρ_{F5}	M	d
4.5	0,8529	0,7275	146,43	31,76	0,45	2,48
4.6	0,8657	0,7494	154,65	35,58	0,56	7,99

4.8 lentelėje pateiktos Stjudento kriterijaus reikšmės rodo, kad homogeniškos ir heterogeniškos struktūros gaminių sutelktoji apkrova labiausiai priklauso nuo tankio (nes Stjudento kriterijus 31,76–35,58), mažiau nuo storio (Stjudento kriterijus 2,48–7,99), tačiau nepriklauso nuo organinių medžiagų kiekio (nes apskaičiuotos Stjudento kriterijaus reikšmės gerokai mažesnės už lentelės dydį 1,96).

Siekdami supaprastinti lygtis buvo atlikti regresijos skaičiavimai ir sudarytos empirinės lygtys įtraukiant tik reikšminius rodiklius (nes svarbūs F_5 dydžiui poveikį turintys tiriamieji parametrai).

Sudarytos empirinės lygtys pateiktos 4.9 lentelėje.

4.9 lentelė. Reikšminių rodiklių ρ_{F5} , d įtakos F_5 priklausomybės empirinės lygtys

Table 4.9. The empirical dependency equations of the impact of the significant parameters ρ_{F5} , and d on F_5

Lygtis	Bandiniai	Empirinė lygtis
4.7	Homogeniškos struktūros	$F_5 = -392,8 + 6,87 \cdot \rho_{F5} + 0,58 \cdot d$
4.8	Heterogeniškos struktūros	$F_5 = -932,64 + 11,49 \cdot \rho_{F5} + 1,63 \cdot d$

(4.7 ir 4.8) empirinių lygčių koreliacijos ir determinacijos koeficientai, vidutiniai standartiniai nuokrypiai bei apskaičiuotos Stjudento kriterijaus reikšmės pateiktos 4.10 lentelėje.

Palyginę (4.8 ir 4.10 lentelės) apskaičiuotų koreliacijos ir determinacijos koeficientų, vidutinio standartinio nuokrypio dydžius galime matyti, kad rezultatai skiriasi labai nedaug (<1 %), todėl galime naudoti supaprastintas empirines lygtys eksperimento duomenims aprašyti.

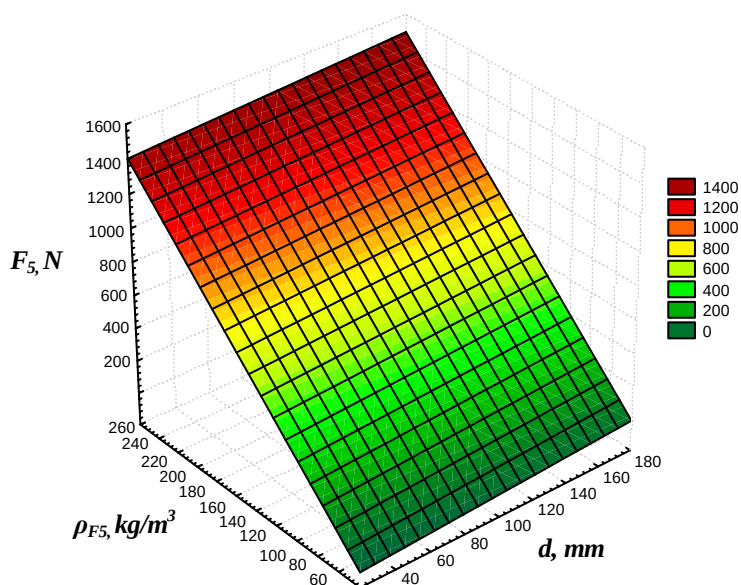
Sudarytų empirinių (4.7, 4.8) lygčių apskaičiuotas determinacijos koeficientas $R^2 > 0,25$, todėl priimtinas ir taikytas matematinis modelis yra teisingas.

4.10 lentelė. Homogeniškos ir heterogeniškos struktūros bandinių F_5 funkcinės priklausomybės ir reikšmingumai nuo ρ_{F5} , d apskaičiuoti daugialypės regresijos metodu

Table 4.10. The functional dependencies and significances of ρ_{F5} and d on F_5 calculated by using the multiple regression method for test specimens with homogeneous and heterogeneous structure

Lygtis	R	R^2	s_e	Stjudento kriterijaus reikšmės	
				ρ_{F5}	d
4.7	0,8529	0,7274	146,3	33,6	2,5
4.8	0,8656	0,7492	154,5	36,6	8,33

Tankio ir bandinių storio įtaką sutelktajai apkrovai, esant 5 mm deformacijai (4.2 pav.), galima paaiškinti tuo, kad gniuždymo bandymo metu bandinys veikiamas nedideliame plote, o taškinė jėga, deformuojanti tik 5 mm, veikia paviršiniame sluoksnyje, taigi tankesnė struktūra labiau priešinasi deformacijai, todėl tankis yra reikšmingas rodiklis.



4.2 pav. Homogeniškos struktūros gaminių sutelktosios apkrovos (F_5) priklausomybės nuo tankio (ρ_{F5}) ir storio (d) paviršinė diagrama

Fig. 4.2. Diagram of dependency of point load (F_5) on density (ρ_{F5}) and thickness (d) for products with a homogeneous structure

Be to, svarbus ir plaušų kiekis bei jų pasiskirstymo struktūroje (ypač paviršiniuose sluoksniuose) tolygumas bei kontaktų tarp gretimų plaušų stiprumas. Storio įtaka pasireiškia tuo, kad plonuose (pvz., 15 mm) bandiniuose 5 mm deformacija yra santykinai didelė ir kartais siekia net 30 %, lyginant su storais (pvz., 200 mm) bandiniais, kuriose 5 mm atitiks 2,5 % santykinę deformaciją. Be to, didesnio storio bandiniuose apkrova nuo paviršiaus pasiskirsto didesniame plote per visą bandinio aukštį.

Naudojantis apskaičiuotomis regresinėmis (4.7 ir 4.8) lygtimis ir žinant homogeniškos ir heterogeniškos struktūros plokščių tankį bei storį galima apskaičiuoti gaminių sutelktąją apkrovą.

Empirinėje (4.7) lygtyje nuo homogeniškos struktūros gaminio tankio ir storio sutelktosios apkrovos dydis priklauso 72,74 %, o skaičiuosime 146,3 N tikslumu. (4.8) lygties determinacijos koeficientas rodo, kad F_5 beveik 75 % priklauso nuo vidutinio tankio ir storio (bet paklaida didesnė 154,5 N).

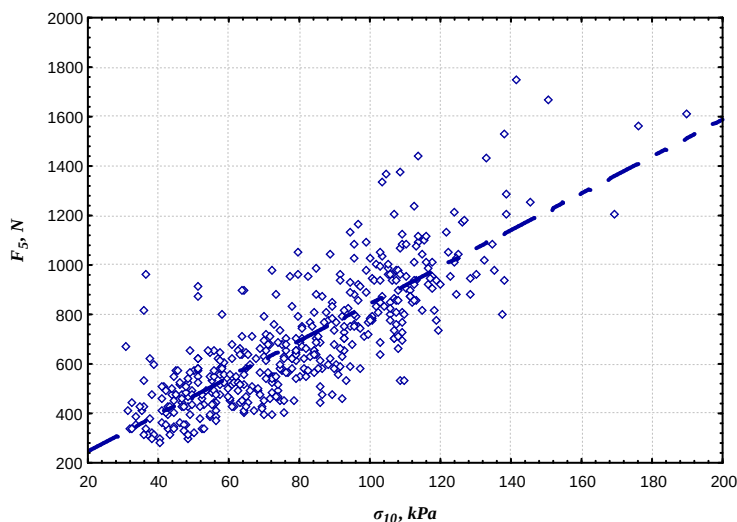
Nepaisant skirtingų gniuždymo įtempio ir sutelktosios apkrovos matavimo metodikų (gniuždymo įtempis nustatomas apkrovai veikiant visame bandinio plote, o sutelktoji apkrova tik paviršiniame bandinio sluoksnyje (2.1.3 ir 2.1.4 skirsniai)) apskaičiuotas homogeniškos struktūros bandinių porinės koreliacijos koeficientas ($r = 0,8151$) rodo, kad egzistuoja stipri (nes $r > 0,7$) σ_{10} ir F_5 tarpusavio tiesinė priklausomybė.

Iš 4.3 paveikslu matyti, kad didėjant gniuždymo įtempiui, esant 10 % deformacijai didėja ir sutelktosios apkrovos dydis. Tai paaiškinama itin didele ir reikšmine σ_{10} ir F_5 dydžių priklausomybe nuo homogeniškos struktūros bandinių tankio (jam didėjant didėja ir σ_{10} , F_5).

Be to (4.3 pav.) stebimas σ_{10} ir F_5 išsibastymas beveik visame dydžių intervale: gniuždymo įtempio 11,3–33,9 %, o sutelktosios apkrovos 13,2–36,8 %. Pirmiausia tai aiškinama metodiniais bandymų atlikimo skirtumais, nes σ_{10} matuojama esant 10 % santykinai deformacijai, F_5 esant 5 mm deformacijai (nepriklausomai nuo storio).

Matome, kad išmatuojami ypač dideli nuokrypiai bandinių, kurių tankis $>140 \text{ kg/m}^3$. Greičiausiai tai lemia struktūros nevienalytiškumas – σ_{10} atveju ir F_5 paviršiaus defektai. Defektai ir kiti esminiai veiksniai, darantys įtaką σ_{10} ir F_5 sąlygojantys jų dydžių išsibastymą aprašyti 4.3.1–4.3.2 skirsniuose.

Tačiau atlikus statistinius skaičiavimus heterogeniškos struktūros bandinių σ_{10} ir F_5 tarpusavio priklausomybei nustatyti, gautas vidutinio stiprumo porinės koreliacijos koeficientas $r = 0,6755$. Tai galima paaiškinti ne tik heterogeninės struktūros ypatumais, bet ir bandymų metodų skirtumais. Atliekant gniuždymo įtempio bandymus, gniuždymas vyksta visame plote, o sutelktoji apkrova veikia paviršiniame sluoksnyje ir todėl F_5 dydžiui poveikį daro viršutinis (didesnio tankio) sluoksnis. Viršutinio sluoksnio storis gaminyje paprastai būna 15–30 mm, todėl sutelktoji apkrova išmatuojama 5 mm praktiškai deformuojantis šiam sluoksniui.



4.3 pav. Homogeniškos struktūros gaminių σ_{10} ir F_5 tarpusavio priklausomybės regresinė tiesė

Fig. 4.3. The regression line of the interdependency of σ_{10} and F_5 for products with a homogeneous structure

Taigi fizikine prasme negalima lyginti skirtingai heterogeniškos struktūros bandiniuose veikiančių gniuždomųjų apkrovų ir jų tarpusavio priklausomumą.

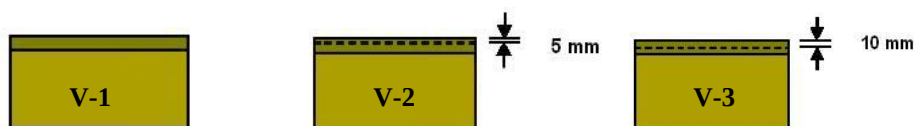
Panašūs reiškiniai (Vilys 2007) užfiksuoti ir kitų medžiagų bandymų metu, kai pastebėta, kad paviršiniame sluoksnyje vykstantys procesai neatspindi procesų, vykstančių visame tūryje.

4.2. Sluoksnių storio įtakos dvitankių mineralinės vatos plokščių gniuždymo stipriui ir sutelktajai apkrovai tyrimai

Heterogeniškos struktūros akmens vatos gaminiai paprastai yra sudaryti iš kelių skirtingų: dažniausiai viršutinio (didesnio) ir apatinio (mažesnio) tankio sluoksnių. Todėl šių sluoksnių parametrai gali skirtingai (nei homogeniškos struktūros gaminiuose) veikti heterogeniškos struktūros plokščių stiprumo savybes. Siekiant nustatyti stiprumo rodiklių priklausomybę nuo viršutinio sluoksnių storio ir išaiškinti apatinio sluoksnių storio įtaką tirtos vieno tipo ir to paties nominalaus tankio akmens vatos plokštės MW-2.7 (2.3 lentelė). Iš jų sudarytos 8 bandinių serijos: V-1–V-8 (2.4 lentelė).

4.2.1. Viršutinio sluoksnio storio įtakos gniuždymo įtempiai ir sutelktajai apkrovai nustatymas

Šioje dalyje apibendrinami rezultatai gauti išbandžius V-1 (kai viršutinio sluoksnio storis – 15 mm), V-2 (kai viršutinio sluoksnio storis – 10 mm) ir V-3 (kai viršutinio sluoksnio storis – 5 mm) serijos bandinius. Skirtingo viršutinio sluoksnio storis gautas nupjaunant atitinkamo sluoksnio dalį (4.4 pav.).



4.4 pav. Bandinių su skirtingo storio viršutiniu sluoksniu paruošimas:

V-1 – pagamintas gaminy; V-2 – nuo viršaus nupjauta 5 mm;

V-3 – nuo viršaus nupjauta 10 mm

Fig. 4.4. The preparation of test specimens with top layers having different thicknesses: V-1–manufactured product; V-2 – 5 mm cut from top; V-3 – 10 mm cut from top

Bandymų metu išmatuoti tankių, gniuždymo įtempio, esant 10 % deformacijai, organinių medžiagų kiekių, sutelktosios apkrovos, esant 5 mm deformacijai, vidutiniai dydžiai esant skirtingam viršutinio sluoksnio storiui pateikti 4.11 lentelėje.

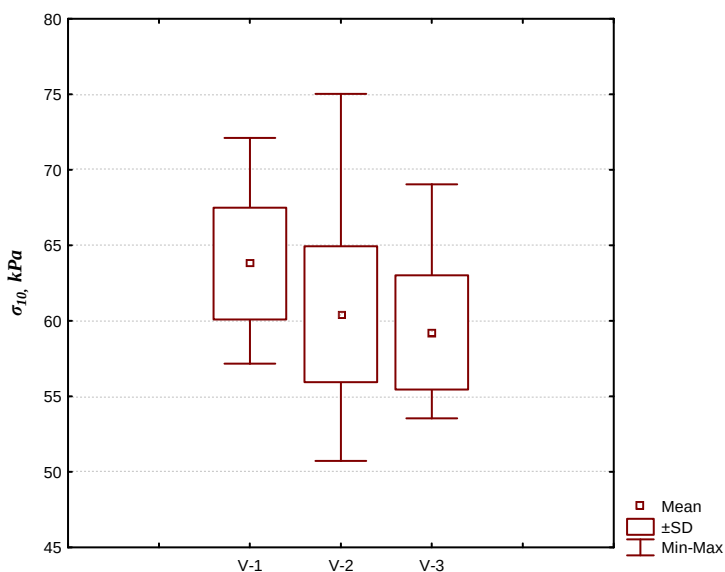
4.11 lentelė. Tankių, gniuždymo įtempio, esant 10 % deformacijai, organinių medžiagų kiekių, sutelktosios apkrovos, esant 5 mm deformacijai, vidutiniai dydžiai

Table 4.11. The average values of densities, compression stress at 10% deformation, organic material content, point load at 5 mm deformation

Bandinių serijos	Gniuždymo bandymai			Sutelktosios apkrovos bandymai		
	tankis ρ_s , kg/m ³	gniuždymo įtempis esant 10 % deformacijai σ_{10} , kPa	organinių medžiagų kiekis M_s , %	tankis ρ_{F5} , kg/m ³	sutelktoji apkrova esant 5 mm deforma- cijai F_5 , N	organinių medžia- gų kiekis M_{F5} , %
V-1	139,3	63,8	3,79	139,9	724,3	3,70
V-2	133,8	60,4	3,64	133,6	724,2	3,59
V-3	129,8	59,2	3,84	130,0	633,3	3,64

Kiekvienos serijos bandinių tankio vidutiniai dydžiai išmatuoti abiem gniuždymo įtempio (σ_{10}) ir sutelktosios apkrovos (F_5) bandymuose praktiškai vienodi (4.11 lentelė), nes skirtumas siekia $<0,5\%$. Apskaičiuoti vidutiniai standartiniai nuokrypiai nedideli ($3,6\text{--}4,2\text{ kg/m}^3$). Tačiau atskiruose bandymuose naudotų bandinių tankio vidurkiai skiriasi V-1–V-3 bandinių serijoms. Tankio skirtumas atsirado dėl skirtingo viršutinio sluoksnio storio $5\text{--}15\text{ mm}$ (kietesnės dalies sluoksnio suplonėjimas mažina bendrąjį tankį). V-2 serijos bandinių tankis vidutiniškai $4,1\%$, o V-3 serijos vidutiniškai $7,3\%$ mažesnis, lyginant su V-1 serijos bandiniais.

Iš 4.11 lentelės ir 4.5 paveikslo matome nedidelę viršutinio sluoksnio storio įtaką bandinių gniuždymo įtempio, esant 10% deformacijai, vidutiniams dydžiams: V-1 $\sigma_{10} = 63,8\text{ kPa}$, V-2 $\sigma_{10} = 60,4\text{ kPa}$, V-3 $\sigma_{10} = 59,2\text{ kPa}$.



4.5 pav. Išmatuoti V-1, V-2, V-3 bandinių gniuždymo įtempio, esant 10% deformacijai, dydžiai ir jų pasiskirstymas

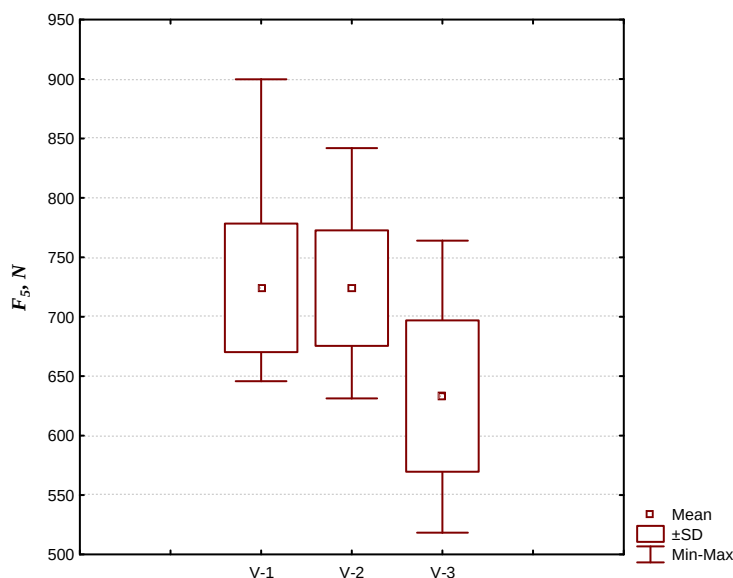
Fig. 4.5. Measured compression stress at 10% deformation of the test specimens of series V-1, V-2, and V-3 and the spread of the values

Atlikus gautų rezultatų statistinę analizę nustatyta, kad gniuždymo įtempis, esant 10% deformacijai, koreliuoja su tankiu (porinis $r = 0,722$), tačiau σ_{10} nepriklauso nuo viršutinio sluoksnio storio, nes apskaičiuotoji ($1,89$) Stjudento kriterijaus reikšmė nėra reikšminė (t. y. mažesnė už Stjudento kriterijaus lentelės reikšmę).

Apskaičiuoti visų trijų serijų bandinių σ_{10} ir M_5 porinės koreliacijos koeficientai ($r = 0,326-0,450$) nerodo didelio tarpusavio ryšio tarp gniuždymo įtempio, esant 10 % deformacijai, ir organinių medžiagų kiekio.

Pažymėtina, kad esant plonesniam viršutiniam sluoksniui yra nedidelis σ_{10} sumažėjimas, bet ir didesnis gniuždymo įtempio, esant 10 % deformacijai, dydžių išsibarstymas (4.5 pav.). Tai akivaizdžiai patvirtina V-2 serijos bandinių rezultatai (skirtumas tarp didžiausio ir mažiausio išmatuotų dydžių siekia net 24,3 kPa). Tai galėjo atsitikti ir dėl to, kad pjaunant viršutinį sluoksnį buvo pažeistas struktūrinis jo vientisumas.

Visai kiti rezultatai gauti sutelktosios apkrovos bandymų metu (4.6 pav.).



4.6 pav. Išmatuoti V-1, V-2, V-3 bandinių sutelktosios apkrovos dydžiai ir jų pasiskirstymas

Fig. 4.6. Measured point load of test specimens of series V-1, V-2, and V-3 and the spread of the values

Išmatuoti visų tipų bandinių mažiausi ir didžiausi dydžiai rodo F_5 priklausomybę nuo storio. V-1 ir V-2 serijos bandinių sutelktosios apkrovos vidutiniai dydžiai identiški (V-1 $F_5 = 724,3$ N, o V-2 $F_5 = 724,2$ N), nors viršutinio sluoksnio storiai skyrėsi 33 %. V-3 bandinių, kurių viršutinio sluoksnio storis buvo 5 mm, išmatuota vidutiniškai apie 14,4 % mažesnė sutelktoji apkrova ($F_5 = 633,3$ N), lyginant su kitų dviejų serijų bandiniais.

Apskaičiuoti porinės koreliacijos koeficientai rodo, kad, be vidutinio stiprumo funkcinės priklausomybės, tarp tankio ir sutelktosios apkrovos (nes $r = 0,560$) yra panašaus stiprumo viršutinio sluoksnio storio įtaka sutelktosios apkrovos dydžiui (nes apskaičiuotas $r = 0,533$). Storio įtakos egzistavimą patvirtina ir apskaičiuotoji Stjudento kriterijaus reikšmė (6,39), kuri yra statistiškai reikšminga (t. y. didesnė už Stjudento kriterijaus lentelės reikšmę). Skirtingas organinių medžiagų kiekis bandinių serijose nedarė įtakos sutelktosios apkrovos dydžiams, nes apskaičiuoti porinės koreliacijos koeficientai gana nedideli ($r = 0,06-0,288$).

Sutelktosios apkrovos dydžių sumažėjimas ir jų išsibarstymas (4.6 pav.) aiškinamas tuo, kad kai bandymų metu gniuždoma iki 5 mm deformacijos, o ir viršutinio sluoksnio storis toks pats. Taigi jis tiesiog „pralaužiamas“, nes po juo yra labiau besideformuojantis mažesnio tankio apatinis sluoksnis, pasižymintis mažesnėmis stiprumo savybėmis.

Taigi eksperimentinių tyrimų rezultatai rodo, kad viršutinio sluoksnio storis neturi lemiamos įtakos gniuždymo įtempio, esant 10 % deformacijai, dydžiams, nes išmatuoti vidutiniai $\sigma_{10} = 59,2-63,8$ kPa, nors viršutinio sluoksnio storis kito 66 %. Tačiau viršutinio sluoksnio storis daro įtaką sutelktosios apkrovos dydžiui, nes viršutinio sluoksnio storį sumažinus iki 5 mm F_5 dydis sumažėjo apie 15 %. Tyrimai rodo, kad heterogeniškos struktūros plokščių minimalus viršutinio sluoksnio storis turėtų būti 10 mm, nes yra pakankamas, kad atlaikytų paviršines gniuždomąsias koncentruotas apkrovas iki 5 mm deformacijos, nes esant 10 ar 15 mm storio viršutiniam sluoksniui, F_5 nesiskiria (abiem 724,2–724,3 N).

Atsižvelgiant į gautus rezultatus, galima parinkti viršutinio (didesnio tankio) sluoksnio storį ir taip optimizuoti gamybos procesą (t. y. padidinti technologinės linijos našumą, sumažinti vidutinį heterogeniškos struktūros plokščių tankį ir kt.).

4.2.2. Apatinio sluoksnio įtakos gniuždymo įtempio ir sutelktajai apkrovai nustatymas

Šioje dalyje analizuojamų bandinių viršutinio sluoksnio storis buvo vienodas (storis – 15 mm), o apatinio sluoksnio dalis bandinyje skirtinga – nuo 35 mm iki 175 mm. Bandiniai buvo suskirstyti į serijas (V-4–V-8) pagal storį. Vienoje serijoje bandinių storio pokytis yra 30 mm intervale (pvz., 71–100 mm ir t. t.) (2.4 lentelė 2.2 poskyryje).

Bandymų metu gauti vidutiniai tankio ir gniuždymo įtempio dydžiai pateikiami 4.12 lentelėje. Kadangi visuose bandiniuose viršutinio sluoksnio storis buvo toks pats, tai plonesniuose bandiniuose jis sudarė apie 25 % tūrio, o storiausiuose bandiniuose – tik apie 8 %.

Apskaičiuota, kad skirtumas tarp didžiausio vidutinio tankio V-4 serijos ir mažiausio V-8 serijos bandinių siekė 10,6 % sutelktosios apkrovos ir 11,2 % gniuždymo bandymuose. Nedidelį skirtumą tarp išmatuotų tankio dydžių gniuždymo ir sutelktosios apkrovos bandymuose, naudotų tos pačios serijos bandinių, lėmė pluoštinės struktūros netolygumas.

4.12 lentelė. Tankių ir gniuždymo įtempio vidutiniai dydžiai esant skirtingam apatinio sluoksnio storiui V-4–V-8 serijų bandiniuose

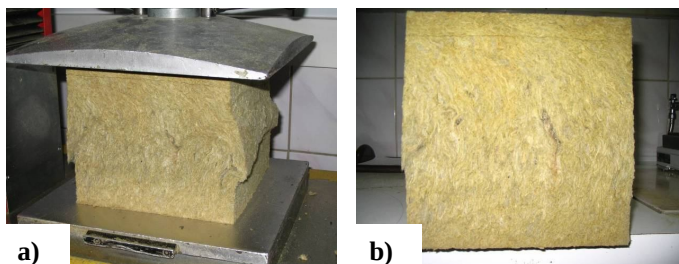
Table 4.12. Average values of density and compression stress when the thickness of the bottom layer in the test specimens of the series V-4–V-8 is different

Serijos Nr.	Apatinio sluoksnio storis, mm	Tankis, kg/m ³		Gniuždymo įtempis esant 10 % deformacijai (σ_{10}), kPa
		atliekant gniuždymo bandymus (ρ_s)	atliekant sutelktosios apkrovos bandymus (ρ_{F5})	
V-4	35–55	164,1	162,7	79,4
V-5	56–85	154,4	152,2	79,8
V-6	86–115	151,9	151,0	79,1
V-7	116–145	150,0	149,5	78,4
V-8	146–175	145,8	144,9	71,4

Iš 4.12 lentelės matyti, kad mažiausias vidutinis $\sigma_{10} = 71,4$ kPa dydis išmatuotas V-8 serijos, o didžiausias vidutinis $\sigma_{10} = 79,8$ kPa V-4 bandiniams. Tai aiškinama tuo, kad V-8 bandiniai turėjo mažiausią vidutinį tankį (145,8 kg/m³). Taip pat šiuose bandiniuose apatinis (mažesnio tankio) sluoksnis sudarė apie 91–92 % viso storio. Tačiau nedidelio (51–70 mm) storio bandinių, turėjusių didžiausią tankį, išmatuotas vidutinis σ_{10} siekė 79,8 kPa. Šiose bandiniuose apatinis sluoksnis sudarė apie 70–78 % viso storio.

Iš gautų rezultatų galima teigti, kad apatinio sluoksnio storis mažai veikia gniuždymo įtempio, esant 10 % deformacijai, dydį. Ši teiginį patvirtina ir statistiniai porinės koreliacijos koeficiento skaičiavimai, nes gniuždymo įtempis, esant 10 % deformacijai, silpnai koreliuoja su apatinio sluoksnio storio (porinės koreliacijos koeficientas $r = 0,238$). Šitai aiškinama tuo, kad spaudžiamas bandinys deformuojasi tolygiai per visą storį, o kadangi viršutinis sluoksnis yra ganėtinai tankus ir jis praktiškai nesideformuoja, o tik perduoda apkrovą apatiniam sluoksniui, nesvarbu, kokio jis būtų storio.

Heterogeniškos struktūros bandiniuose susispaudimas ir irimas dėl gniuždomosios apkrovos vyksta „silpniausiam“, t. y. mažiausią tankį turinčiame sluoksnyje ar jo dalyje (Hild *et al.* 2009). Pastebėta, kad didesnio storio (160–200 mm) bandinių silpniausia vieta yra viduriniame gaminio trečdalyje (per storį). Todėl gniuždymo metu bandinio struktūra suyra būtent vidurinėje dalyje (4.7 pav.).



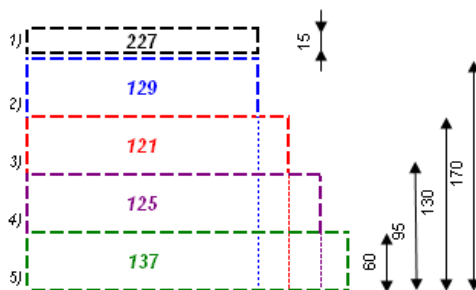
4.7 pav. 190 mm storio MW-2.7/18 bandinio deformavimasis gniuždant:

a – bandymų metu; b – bandinys po bandymo

Fig. 4.7. Deformation of a 190 mm-thick test specimen (MW-2.7/18) as a result of compression:

a – during testing; b – the test specimen after testing

Siekiant nustatyti, kodėl heterogeniškos struktūros dviejų tankių bandinių silpniausia dalis yra jo viduryje, buvo atlikti papildomi tankio pasiskirstymo (pjūvyje per storį) tyrimai. Jų metu pirmiausia buvo atskirti vizualiai matomi viršutinis ir apatinis sluoksniai. Atskiros viršutinio sluoksnio vidutinis tankis buvo apie $227,0 \text{ kg/m}^3$ (4.8 pav., 1), todėl šį sluoksnį lengvai pastebėsime bandinyje.



4.8 pav. Tankio pasiskirstymas per bandinio storį: 1 – 15 mm storio viršutinis sluoksnis; 2 – 170 mm storio apatinis sluoksnis; 3 – 130 mm storio apatinis sluoksnis; 4 – 95 mm storio apatinis sluoksnis; 5 – 60 mm storio apatinis sluoksnis

Fig. 4.8. Spread of density throughout the thickness of test specimens: 1 – top layer with a thickness of 15 mm; 2 – bottom layer with a thickness of 170 mm; 3 – bottom layer with a thickness of 130 mm; 4 – bottom layer with a thickness of 95 mm; 5 – bottom layer with a thickness of 60 mm

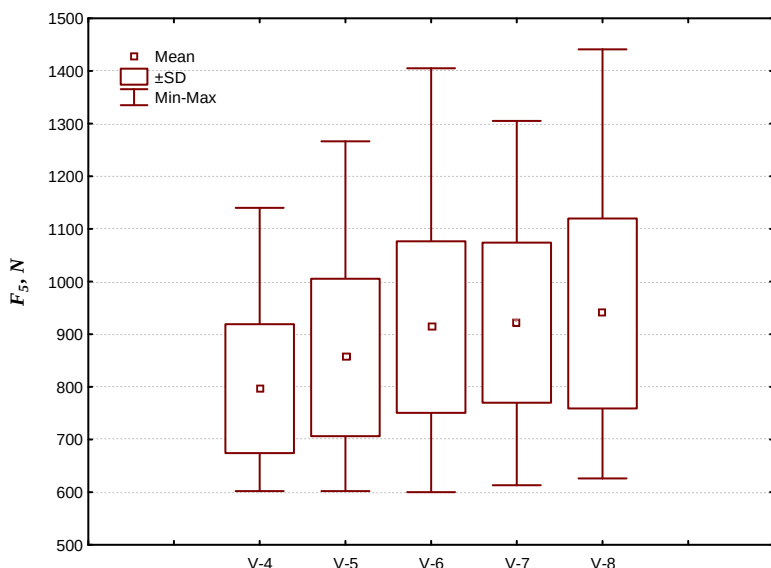
Paskui bandinio apatinis sluoksnis (apytiksliai 170 mm storio) buvo dalijamas pagal storį į dalis: $2/3 = 130$ mm, $1/2 = 95$ mm ir $1/3 = 60$ mm. Nustatyta, kad plokštės apatinio sluoksnio struktūroje tankis pasiskirstęs nevienodai (4.8 pav., 2–5). $137,0 \text{ kg/m}^3$ tankis išmatuotas apatinėje sluoksnio dalyje (4.8 pav., 5), kurio storis buvo 60 mm, $129,0 \text{ kg/m}^3$ tankis išmatuotas viršutinėje (4.8 pav., 2) bandinio dalyje, kuri kontaktuoja su viršutiniu sluoksniu. Vidurinėje dalyje (4.8 pav., 3–4) tankis mažiausias (atitinkamai 121–125 kg/m^3). Taigi susidaro 10–13 % tankio nuokrypis struktūroje per storį.

Skirtingas tankio reikšmių pasiskirstymas bandinio storyje gali būti paaiškinamas technologijos ypatumais gamybos metu. Prieš patekdamas į terminio apdorojimo (kietinimo) kamerą judantis pluošto klotas yra stipriai apspaudžiamas viršutinio ir apatinio konvejerinių tinklų iki nustatyto lygio. Nustatymai (tinklų suspaudimas) priklauso nuo jau pagamintam gaminiui deklaruojamų storio nuokrypų, tankio ir kt. reikšmių. Taigi gaminant mažo ar vidutinio storio plokštės konvejeriniai tinklai perspaudžia pluošto klotą per storį taip, kad plaušai susispaudžia vienodai. Dėl išorinių spaudimo jėgų jie persislenka ir persidengia tarpusavyje.

Gaminant storus ir didelio tankio gaminius suformuojamas storas klotas, kurio vidurinėje dalyje greičiausiai susidaro mažesnio tankio zona dėl nepakankamo suspaudimo. Viršutiniu ir apatiniu tinklais spaudžiant pluošto klotą pirmiausia vyksta plaušų, esančių arti tinklų, sutankėjimas, todėl bandinio viršuje ir apačioje (zonos prie tinklų) formuojasi tankesni sluoksniai (Perelkin, Savitskii 1976). Vidurinėje dalyje suspaudimas mažėja dėl susidariusių tankesnių zonų prie tinklų (jos neleidžia tolygiai paskirstyti spaudimo jėgas) bei plaušų susipynimo. Dėl trinties jėgų (kurios labai padidėja esant dideliui storiui) tarp pačių susipynusių ir chaotiškai struktūroje išsidėsčiusių plaušų klando viduryje formuojasi mažesnio tankio sluoksnis. Tai paaiškina, kodėl vidurinė storesnių bandinių dalis deformuojasi. Panaši irimo tendencija ryškėja (Kyriakides, Ruff 1997) ir kitų pluoštinių kompozitų gniuždymo bandymų metu.

Apatinio sluoksnio storio įtaka tirta matuojant V-4–V-8 serijos bandinių sutelktąją apkrovą. Sutelktosios apkrovos, esant 5 mm deformacijai, vidurkiai, standartiniai nuokrypiai ir mažiausių bei didžiausių dydžių pasiskirstymas pateiktas 4.9 paveiksle. Jame matome, kad sutelktosios apkrovos (F_5) dydžiai pasklidę gana plačiai. Mažiausias vidutinis dydis nustatytas ploniausių V-4 serijos bandinių – $F_5 = 791,4 \text{ N}$, o didžiausias – storiausių V-8 bandinių $F_5 = 939,1 \text{ N}$.

Šiuo atveju didėjant apatinio sluoksnio storiui didėja ir vidutiniai sutelktosios apkrovos dydžiai.



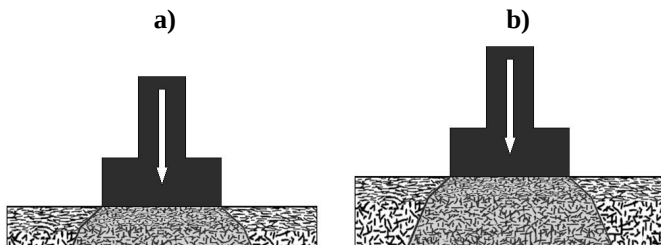
4.9 pav. Sutelktosios apkrovos (F_5) dydžių pasiskirstymas esant skirtingam apatinio sluoksnio storiui V-4–V-8 serijų bandiniuose

Fig. 4.9. Spread of point load (F_5) in test specimens of the series V-4–V-8 when the thickness of the bottom layer is different

Atlikus statistinius skaičiavimus matyti, kad vidutiniai sutelktosios apkrovos dydžiai koreliuoja su apatinio sluoksnio storiu (porinės koreliacijos koeficientas $r = 0,942$). Todėl didėjant bandinio storiui išmatuojamas ir didesnis sutelktosios apkrovos dydis. Tai patvirtina ir 4.10 lentelėje pateiktas storiui apskaičiuotas (8,33) reikšminis Stjudento kriterijaus dydis. Tai gali būti paaiškinama tuo, kad bandymo metu gniuždymas vyksta paviršiniame sluoksnyje ir santykinai mažame plote (50 cm^2), o heterogeniškos struktūros bandiniuose viršutinis sluoksnis perima šią paviršinę koncentruotą apkrovą ir ją paskirsto per visą bandinio storį (4.10 pav.). Esant storam bandiniui (4.10 pav., b) apkrova nuo taškinės jėgos pavirsta plokščiąja ir pasiskirsto daug didesniame plote, lyginant su nedidelio storio bandiniu (4.10 pav., a).

Be to, sutelktoji apkrova visuomet matuojama ir jėga atskaitoma, esant 5 mm deformacijai, taigi mažo storio (pvz., 50 mm) bandiniuose 5 mm atitiks 10 % santykinę deformaciją, o didelio storio (pvz., 200 mm) bandiniuose – tik 2,5 %. Todėl plonuose bandiniuose dėl didelės santykinės deformacijos įvyksta struktūros pažeidimai ir išmatuojami mažesni sutelktosios apkrovos dydžiai. Rezultatai rodo, kad storesnių nors ir mažesnio vidutinio tankio bandinių F_5 dydis išmatuotas didesnis.

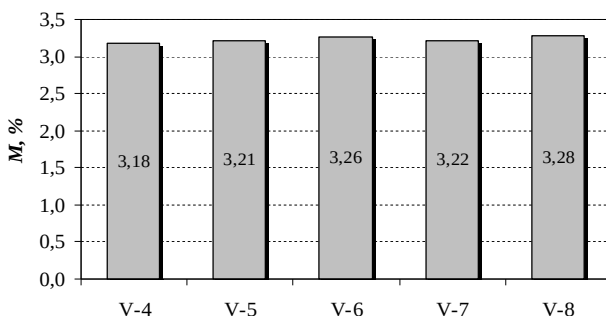
Todėl to paties tipo, bet storesnių heterogeniškos struktūros gaminių gali būti deklaruojami didesni sutelktosios apkrovos dydžiai arba mažinamas (apie $7,5 \text{ kg/m}^3$) apatinio sluoksnio tankis, siekiant mažinti žaliavų išėigą.



4.10 pav. Sutelktosios apkrovos poveikis skirtingo storio heterogeniškos struktūros bandiniuose: a – mažo storio; b – didelio storio bandiniuose

Fig. 4.10. The impact of point load on test specimens with heterogeneous structures having different thicknesses: a – thin; b – thick

Atlikus organinių medžiagų kiekio V-4–V-8 serijų bandiniuose tyrimus nustatyta, kad jų vidutiniai dydžiai labai panašūs (4.11 pav.).



4.11 pav. Organinių medžiagų kiekį vidutiniai dydžiai nustatyti V-4–V-8 serijų bandiniuose

Fig. 4.11. Average values of organic material content measured for the test specimens of the series V-4–V-8

Iš 4.11 paveikslo matyti nedidelis M dydžių skirtumas tarp V-4 ir V-8 serijose naudotų bandinių, kuris buvo nulemtas netolygaus jų pasiskirstymo bandinių tūryje gamybos proceso metu. Apskaičiuotas vidutinis standartinis nuokrypis – 0,37 %. Taigi galima teigti, kad sluoksnių storio įtakos dvitankių akmens vatos plokščių bandymuose organinių medžiagų kiekis nedarė poveikio gniuždymo įtempio, esant 10 % deformacijai, ir sutelktosios apkrovos dydžiams.

4.3. Heterogeniškos struktūros mineralinės vatos plokščių atskirų sluoksnių įtakos gniuždymo stipriui ir sutelktajai apkrovai tyrimai

Skirtingų sluoksnių naudojimas struktūroje formuojant pluošto klodą leidžia gaminti pakankamų šiluminių, stiprumo savybių ir optimalaus tankio sluoksniuotas mineralinės vatos plokštes, atitinkančias konkrečias naudojimo ir eksploatavimo sąlygas.

Šių tyrimų tikslas – nustatyti heterogeniškos struktūros dvitankių mineralinės vatos plokščių gniuždymo įtempio (σ_{10}), esant 10 % deformacijai, ir sutelktosios apkrovos (F_5), esant 5 mm deformacijai priklausomybes nuo tankio bei ištirti atskirų sluoksnių parametrų įtaką dvitankės struktūros mineralinės vatos plokščių gniuždymo įtempiui ir sutelktajai apkrovai.

Tyrimams pasirinktos trijų tipų (MW-2.8, MW-2.9, MW-2.10) skirtingo nominalaus tankio heterogeniškos struktūros akmens vatos plokštes. Plačiau bandiniai aprašyti 2.2 poskyrio 2.5 lentelėje.

4.3.1. Atskirų sluoksnių gniuždymo įtempio, esant 10 % deformacijai, nustatymas

Norint sužinoti heterogeniškos struktūros dvitankių akmens vatos plokščių (viso gaminio ir atskirų jį sudarančių sluoksnių) σ_{10} dydžius buvo atlikti eksperimentiniai tyrimai, o gauti rezultatai pateikti 4.13 lentelėje ir 4.12 paveiksle.

4.13 lentelė. Bandinių tankio, gniuždymo įtempio ir organinių medžiagų kiekio vidutiniai dydžiai

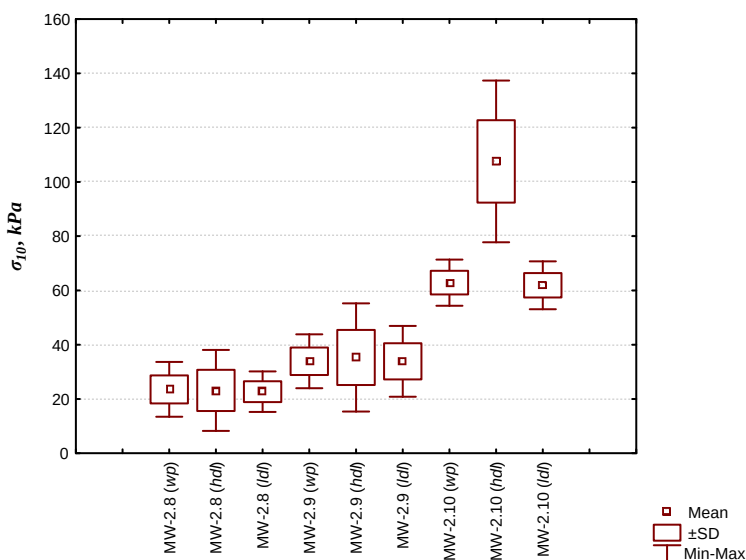
Table 4.13. Average measured density, compression stress, and organic material content of test specimens

Bandinio tipas	ρ_s , kg/m ³			σ_{10} , kPa			M, %		
	wp	gaminio sluoksniai		wp	gaminio sluoksniai		wp	gaminio sluoksniai	
		hdl	ldl		hdl	ldl		hdl	ldl
MW-2.8	93,5	121,6	79,8	23,5	23,2	22,7	2,11	2,21	2,1
MW-2.9	98,4	132,1	93,8	33,9	35,3	33,9	4,0	4,30	3,92
MW-2.10	138,4	228,3	129,5	62,9	107,6	61,9	3,78	3,82	3,7

Iš 4.13 lentelės matome, kad σ_{10} labai nevienodai priklauso nuo bandinių ρ_s . MW-2.8 tipo bandinių σ_{10} visam gaminiui (wp) ir atskiriems (hdl ir ldl) sluoksniams gauti labai panašūs rezultatai, nors jų ρ_s dydžiai skyrėsi vidutiniškai 23–34 %. Panašus reiškinys būdingas ir MW-2.9 bandinių ρ_s ir σ_{10} dydžiams.

Tai aiškinama keliais veiksniais: didelio viršutinio sluoksnio ρ dydžių pasiskirstymu, labai nedideliu viršutinio sluoksnio bandinių storio bei struktūros defektais. MW-2.8 ir MW-2.9 bandinių buvo išmatuotas gana didelis viršutinio sluoksnio tankio dydžių pasiskirstymas, nes apskaičiuotas vidutinis standartinis nuokrypis siekia 16,1–17,3 kg/m³. Kadangi viršutinio sluoksnio bandinių storis buvo vos 14–17 mm, todėl bandymo metu tokio storio bandiniams nuskaitant jėgą, atitinkančią 10 % santykinę deformaciją, jie deformuojami tik 1,4–1,7 mm. Taigi net nedidelis defektas bandinio struktūroje turi itin didelę reikšmę ir daro poveikį σ_{10} dydžiui. Be to, ir bandymo standarte (LST EN 826:1998) įrašytas komentaras, kad kai bandinio storis <20 mm, rezultatai gali būti ne tokie tikslūs.

Tokią prielaidą patvirtina ir 4.12 paveiksle pateiktų viršutiniams sluoksniui (visų bandinių su *hdl*) išmatuotų σ_{10} dydžių pasiskirstymas gan plačiame intervale. Būtent plonų viršutinio sluoksnio bandinių σ_{10} vidutinis standartinis nuokrypis (*s*) kinta 7,4–9,4 kPa. Didesnio storio apatinio sluoksnio tankio dydžių *s* gerokai mažesnis ir siekia 1,3–3,1 kg/m³. Didžiausias vidutinis $\sigma_{10} = 107,6$ kPa išmatuotas MW-2.10 bandinių viršutinio sluoksnio, nes buvo didžiausio tankio (vidutiniškai 228,3 kg/m³).

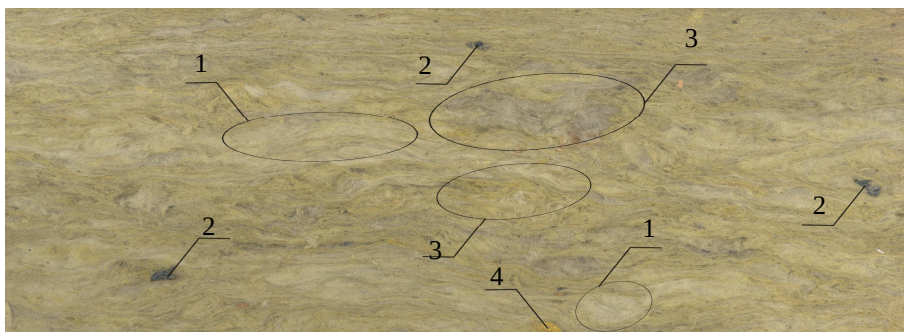


4.12 pav. MW-2.8, MW-2.9 ir MW-2.10 bandinių išmatuotų gniuždymo įtempio, esant 10 % deformacijai, dydžių pasiskirstymas

Fig. 4.12. The spread of the measured values of compression stress at 10% deformation of MW-2.8, MW-2.9 ir MW-2.10 test specimens

Apžiūrint gniuždymo bandymams naudotus bandinius pjūviuose per stori buvo akivaizdžiai matyti, kad kai kurių iš jų struktūra yra nevienalytė pirmiausia dėl netolygiai pasiskirsčiusios rišamosios medžiagos.

Kaip įprasta, skerspjūvyje matomos šviesios spalvos sritys be rišiklio, ištęstos ar suplotos formos, nors ir orientuotos ta pačia kryptimi, kaip ir plaušai gaminio struktūroje (4.13 pav., 1). Taip pat matomi skirtingo dydžio pavieniai (ar net jų grupių) neplaušinių dalelių (sukietėjusio lydalo) intarpai (4.13 pav., 2), o tai labai didina gaminio tankio nuokrypius. Kažkuriose pjūvio zonose ižiūrimos vietos su netolygiai pasiskirsčiusia rišamąja medžiaga (4.13 pav., 3): plaušų kuokštai visai be rišiklio arba su didesniu rišiklio kiekiu (ryškiai geltonos spalvos plaušų grupė). Atskirose zonose matomos ir rišiklio taškinės sankaupos (4.13 pav., 4).

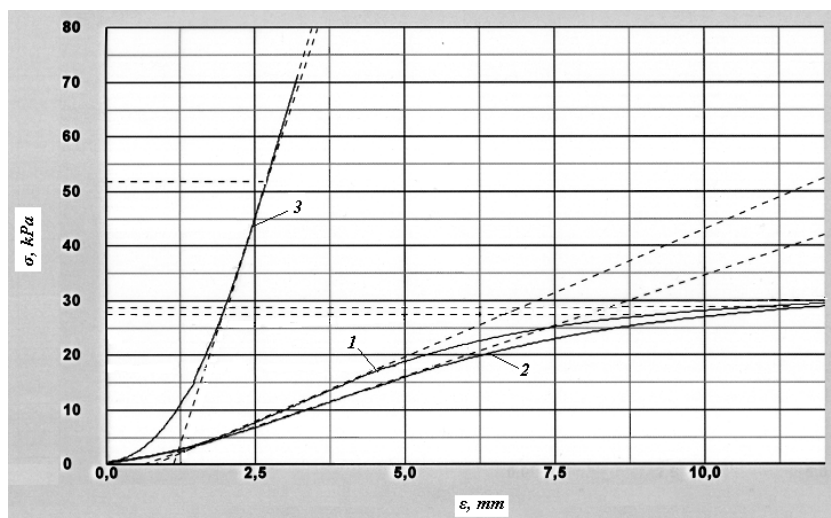


4.13 pav. Struktūros nevienalytiškumas: 1 – plaušai be rišiklio;
2 – pavieniai didesnio dydžio neišplaušinto lydalo lašeliai; 3 – zonos su
netolygiai pasiskirsčiusia rišamąja medžiaga ar visai be jos;
4 – rišiklio sankaupa

Fig. 4.13. Non-homogeneity of structure: 1 – fibres without binder;
2 – single large non-fibrous melt insertions; 3 – areas with unevenly
distributed binding material or without any binding material;
4 – accumulation of binding material

Kaip žinoma (LST EN 826:1998), bandymo metu gniuždymas vyksta visame bandinio paviršiaus plote ir skerspjūvyje, todėl galima konstatuoti, kad bandinių gniuždymo įtempio dydžiams (be anksčiau minėtų tankio ir storio) turėjo struktūros netolygumų ir rišamųjų medžiagų kiekio pasiskirstymo nevienalytiškumas.

Atliekant heterogeniškos struktūros plokščių, sudarytų iš skirtingo tankio sluoksnių, gniuždymo įtempio bandymus, matyti nevienodas abiejų sluoksnių deformavimasis, pavaizduotas nubraižius viso gaminio ir atskirų sluoksnių apkrovos ir deformacijos diagramas (4.14 pav.).

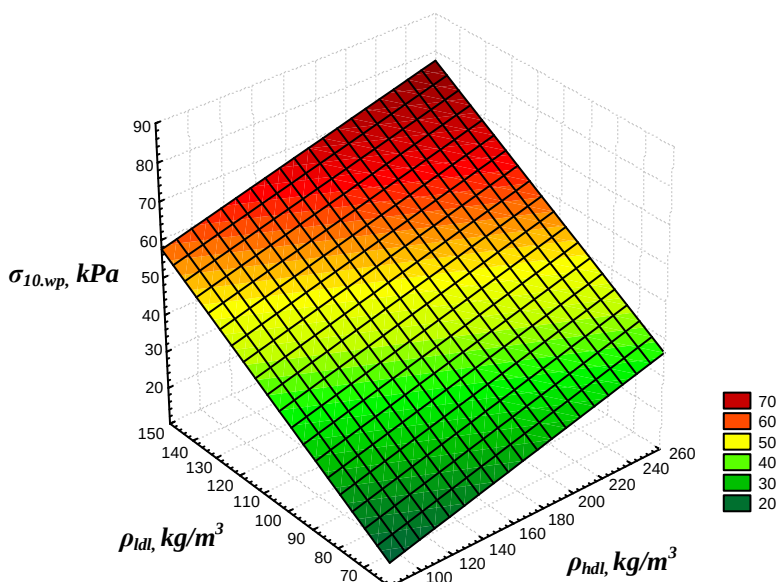


4.14 pav. Heterogeniškos struktūros dvitankių bandinių apkrovų ir deformacijų diagrama: 1 – viso MW-2.9/17 bandinio (wp); 2 – MW-2.9/18b mažesnio tankio sluoksnio (ldl); 3 – MW-2.9/18t didesnio tankio sluoksnio (hdl)

Fig. 4.14. Force and deformation curve diagram for dual density product with a heterogeneous structure: 1 – MW-2.9/17 whole product (wp); 2 – MW-2.9/18b lower density layer (ldl); 3 – MW-2.9/18t higher density layer (hdl)

Iš 4.14 paveikslo matome, kad panašios formos yra viso gaminio (1 kreivė) ir mažesnio tankio sluoksnio (2 kreivė) apkrovų ir deformacijų kreivės. Abi šios kreivės pradiniam gniuždymo etape buvo lėkštesnės (įtempis lėtai didėja apkrovimo pradžioje), o bandiniams deformavus apie 4–6 mm užfiksuotas didesnis kreivių palinkimas ir mažesnis gniuždymo įtempio didėjimas, lyginant su deformacija. Didesnio tankio sluoksnio (3 kreivė) didelė pradinė deformacija (apie 1 mm) išmatuota apkrovimo pradžioje. Paskui gniuždymo įtempis didėjo esant gana tolygiai deformacijai visą gniuždymo laiką (beveik tiesės formos kreivė) ir, pasiekus apie 15 % deformaciją, bandymas nutrauktas (nes nustatytas σ_{10} dydis, esant 10 % deformacijai). Skirtingas kreivių pobūdis rodo atskirų sluoksnių skirtingą deformavimąsi, tačiau viso gaminio ir mažesnio tankio sluoksnio apkrovos ir deformacijos kreivių (4.14 pav., 1 ir 2) suartėjimas, esant 10 % santykinei deformacijai, rodo lemiamą mažesnio tankio sluoksnio įtaką viso gaminio stiprumo ir deformacinėms savybėms.

Skirtingo tankio atskirų sluoksnių įtaka visos heterogeniškos struktūros akmens vatos plokščių gniuždymo įtempiui pavaizduota grafiškai (4.15 pav.).



4.15 pav. Viso gaminio gniuždymo įtempio ($\sigma_{10.wp}$) priklausomybės nuo didesnio tankio (ρ_{hdl}) ir mažesnio tankio (ρ_{ldl}) sluoksnio tankių
Fig. 4.15. The dependency of the whole product compression stress ($\sigma_{10.wp}$) on the densities of the higher density layer (ρ_{hdl}) and lower density layer (ρ_{ldl})

Ir iš 4.15 paveikslo matyti, kad viso gaminio σ_{10} dydis labiausiai priklauso nuo mažesnio tankio sluoksnio (*ldl*) parametrų (ρ_{ldl} , $\sigma_{10,ldl}$), nes heterogeniškos struktūros dvitankius bandinius veikiant gniuždymo apkrova pirmiausia deformuojasi silpniausia plokštės dalis (sluoksnis). O jai pasiekus tam tikrą sutankėjimo ribą, nedaug deformuojasi ir didesnio tankio (ρ_{hdl}) sluoksnis. Tai patvirtina ir 4.13 lentelėje pateikti išmatuoti σ_{10} dydžiai, nes viso gaminio išmatuotas σ_{10} beveik toks pats kaip ir apatinio sluoksnio σ_{10} . Didesnio tankio sluoksnis (*hdl*) gaminyje sumažina pradinę deformaciją ir paskirsto paviršiuje veikiančią gniuždomąją apkrovą palaipsniui – mažesnio tankio sluoksniui daug didesniame plote (per visą gaminio storį).

Siekiant nustatyti, kokią įtaką viso gaminio gniuždymo įtempiui turi kiti tiriamieji rodikliai: viso ir (arba) atskirų sluoksnių tankis, storis ir organinių medžiagų kiekis, atlikta gautų rezultatų statistinė analizė, o priklausomybei nusakyti apskaičiuota empirinė lygtis (4.9):

$$\sigma_{10.wp} = -51,325 + 0,672 \cdot \rho_{wp} + 3,826 \cdot M_{wp} + 0,0498 \cdot \rho_{ld}. \quad (4.9)$$

Tiriamųjų rodiklių tarpusavio sąryšis buvo vertinamas pagal daugialypės koreliacijos koeficiento dydį (kuo R arčiau 1, tuo ryšys tarp rodiklių stipresnis), o parinkto modelio tinkamumą nusako R^2 (jei $R^2 > 0,25$, gali būti taikomas tiesinis matematinis modelis). Daugialypės regresijos skaičiavimai (4.14 lentelė) rodo, kad koreliacijos bei determinacijos koeficientai artimi vienetui, o vidutinis standartinis nuokrypis įgyja mažus dydžius, todėl apskaičiuoti pagal empirinę lygtį ir faktiniai dydžiai skirsis mažai. Taigi pasirinktas modelis tinka eksperimentiniams duomenims aprašyti ir atitinka duomenų pasiskirstymo pobūdį.

4.14 lentelė. Tiriamųjų rodiklių ρ_{wp} , M_{wp} , ρ_{ldl} įtakos $\sigma_{10,wp}$ funkcinė priklausomybė ir reikšmingumai

Table 4.14. Functional dependency and significances of the impact of parameters ρ_{wp} , d_{wp} , and ρ_{ldl} being considered on $F_{5,wp}$

R	R^2	s_e	Stjudento kriterijaus reikšmės		
			ρ_{wp}	M_{wp}	ρ_{ldl}
0,9847	0,9690	3,27	29,04	7,87	3,09

4.14 lentelės duomenys rodo, kad yra labai stiprus ryšys (nes $R > 0,7$) tarp $\sigma_{10,wp}$ ir tiriamųjų ρ_{wp} , M_{wp} , ρ_{ldl} rodiklių. Matome, kad labiausiai $\sigma_{10,wp}$ veikia ρ_{wp} , nes apskaičiuota Stjudento kriterijaus reikšmė yra didžiausia (29,04), o tai patvirtina tankio reikšmingumą. Taip pat viso gaminio gniuždymo įtempiai, be ρ_{wp} ir ρ_{ldl} , įtaką turi organinių medžiagų kiekis visame gaminyje (M_{wp}). Šitai paaiškinama tuo, kad didesnis organinių medžiagų kiekis geriau „suriša“ plaušus tarpusavyje (taip pat ir atskirų sluoksnių susijungimo vietoje). Be to, tarp viso gaminio ir mažesnio tankio sluoksnio parametrų (ρ , σ_{10}) yra stipri priklausomybė (apskaičiuoti porinės koreliacijos koeficientai 0,8561–0,9251). Todėl būtent šie parametrai daugiausia ir lemia heterogeniškos struktūros bandinių $\sigma_{10,wp}$.

Didėjant ρ_{ldl} didėja ir ρ_{wp} dydis, todėl gaunamas didesnis viso gaminio gniuždymo įtempis. Kiti mūsų tiriamieji rodikliai (pvz., storis bei kitų sluoksnių parametrai) įtakos praktiškai neturi, nes apskaičiuotos jų reikšmės (0,059–1,83) nėra statistiškai reikšmingos (t. y. mažesnės už Stjudento kriterijaus lentelės dydį 2,02). Naudojantis regresine lygtimi (4.9) ir žinant viso gaminio tankį, organinių medžiagų kiekį bei mažesnio tankio sluoksnio tankį galima apskaičiuoti viso gaminio gniuždymo įtempį, esant 10 % deformacijai (neviršijant $\pm 3,3$ kPa paklaidos). Taigi viso gaminio gniuždymo įtempio dydis 96,9 % priklauso nuo lygtyje pateiktų parametrų. Tačiau norisi pabrėžti, kad kiti faktoriai – struktūriniai (plaušų išsidėstymas struktūroje, jų susipynimas, storis ir kt.), technologiniai (plaušų surinkimo būdas, pluošto klogo tolygumas, procesų kontrolė technologinėje linijoje ir t. t.) – turi įtakos fiziniams mechaninėms bei deformacinėms savybėms (Strazdas, Eidukevičius 1985; Veiseh 2007; Širok *et al.* 2008).

4.3.2. Atskirų sluoksnių sutelktosios apkrovos nustatymas

Tyrimų metu išmatuotų dvitankių akmens vatos plokščių (viso gaminio ir atskirų jį sudarančių sluoksnių) tankio, sutelktosios apkrovos ir organinių medžiagų kiekio vidutiniai dydžiai pateikti 4.15 lentelėje.

4.15 lentelė. Bandinių tankio, sutelktosios apkrovos ir organinių medžiagų kiekio vidutiniai dydžiai

Table 4.15. Average measured values of density, point load, and organic material content of test specimens

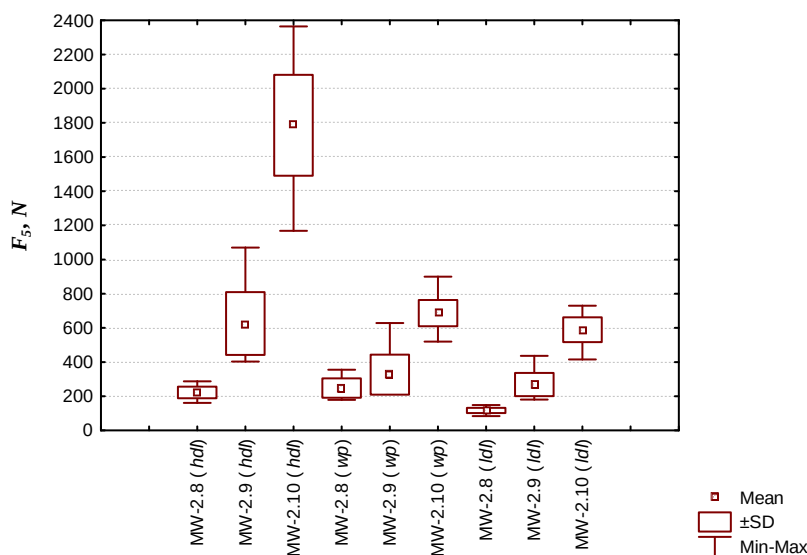
Bandinio tipas	ρ_{F_5} , kg/m ³			F_5 , N			M , %		
	wp	gaminio sluoksniai		wp	gaminio sluoksniai		wp	gaminio sluoksniai	
		hdl	ldl		hdl	ldl		hdl	ldl
MW-2.8	85,2	86,3	63,0	248,2	222,1	117,1	2,15	2,22	2,23
MW-2.9	95,4	136,3	92,0	326,7	625,7	268,8	3,92	4,23	3,80
MW-2.10	140,6	219,8	129,7	686,4	1786,0	589,2	3,71	3,62	3,70

Bandymų metu buvo matuoti viso gaminio ir atskirų sluoksnių tankiai. Apskaičiuoti nedideli tankio vidutinio standartinio nuokrypio (s) dydžiai (3,7–6,4 kg/m³), tik MW-2.9 bandinių $s = 11,1$ kg/m³. Organinių medžiagų kiekio vidutiniai kvadratiniai nuokrypiai kinta 0,18–0,35 %. Didžiausias F_5 pasiskirstymas yra plonuose visų tipų bandiniuose. Apskaičiuoti s kinta 56,4–117,2 N, o kitų sluoksnių mažiau, nes gniuždymas vyksta iki 5 mm deformacijos, o plonuose bandiniuose tai sudaro apytiksliai 30 % santykinę deformaciją. Tuo ir galima paaiškinti F_5 dydžius (kurie mažesni nei viso gaminio, nors jų vidutiniai tankiai panašūs), išmatuotus MW-2.8 bandinio didesnio tankio sluoksnio (4.15 lentelė).

Palyginus 4.10 ir 4.15 lentelėse pateiktus vidutinius tankio, organinių medžiagų kiekio skaitines išraiškas matomi skirtingi dydžiai, tai patvirtina struktūros nevienalytiškumą dėl tankio ir organinių medžiagų pasiskirstymo (4.13 pav.).

Viso gaminio ir atskirų jo sluoksnių išmatuoti sutelktosios apkrovos dydžiai ir jų pasiskirstymas pateikti 4.16 paveiksle.

Iš 4.16 paveikslo ir 4.15 lentelės matyti, kad F_5 priklauso nuo ρ_{F_5} , nes tankiui didėjant didėja visų bandinių ir atskirų jų sluoksnių sutelktosios apkrovos dydžiai. Išmatuotas didžiausias vidutinis MW-2.10 bandinio didesnio tankio sluoksnio $F_5 = 1786,0$ N, nes jo vidutinis tankis buvo didžiausias ($\rho_{hdl} = 219,8$ kg/m³), o atitinkamai mažiausias $F_5 = 117,1$ N – mažiausio tankio MW-2.8 bandinio sluoksnio (kurio $\rho_{ldl} = 63,0$ kg/m³).



4.16 pav. MW-2.8, MW-2.9 ir MW-2.10 bandinių išmatuotų sutelktosios apkrovos dydžių pasiskirstymas

Fig. 4.16. The spread of the measured values of point load of MW-2.8, MW-2.9, and MW-2.10 test specimens

Pažymėtina, kad nustatomam F_5 dydžiui itin didelę įtaką turi bandinio paviršiaus (su kuriuo tiesiogiai kontaktuoja matavimo prietaisas) kokybė ir vientisumas. Kadangi nedideliame plote (50 cm^2) veikiančios koncentruotos apkrovos dydis nuskaitomas esant 5 mm deformacijai, tai bet koks paviršiniame sluoksnyje esantis defektas (4.17 pav.) daro tiesioginę įtaką sutelktosios apkrovos dydžiui.



4.17 pav. Struktūros defektas gaminio paviršiuje

Fig. 4.17. A structure defect on the product surface

Tiriamųjų rodiklių (viso ir (arba) atskirų sluoksnių tankio, storio bei organinių medžiagų kiekio) įtaka viso gaminio F_5 dydžiui nustatyta atlikus statistinius skaičiavimus. Ryšiui tarp reikšminių rodiklių aprašyti apskaičiuota empirinė lygtis (4.10):

$$F_{5.wp} = -360,87 + 7,41 \cdot \rho_{wp} + 0,023 \cdot d_{wp} + 0,12 \cdot \rho_{hdl}. \quad (4.10)$$

O (4.10) lygties daugialypės koreliacijos ir determinacijos koeficientų, vidutinio standartinio nuokrypio ir Studento kriterijaus reikšmės pateiktos 4.16 lentelėje.

4.16 lentelė. Tiriamųjų rodiklių ρ_{wp} , d_{wp} , ρ_{hdl} įtakos $F_{5.wp}$ funkcinė priklausomybė ir reikšmingumai

Table 4.16. Functional dependency and significances of the impact of parameters ρ_{wp} , d_{wp} , and ρ_{hdl} being considered on $F_{5.wp}$

R	R^2	s_e	Studento kriterijaus reikšmės		
			ρ_{wp}	d_{wp}	ρ_{hdl}
0,9680	0,9371	53,28	22,89	2,14	3,22

Iš 4.16 lentelės matyti, kad viso gaminio sutelktosios apkrovos dydį labai stipriai veikia viso gaminio ir didesnio sluoksnio tankiai bei viso bandinio storis, nes daugialypės koreliacijos koeficientas $R = 0,9680$ artimas vienetui. Kadangi apskaičiuotas determinacijos koeficientas $R^2 > 0,7$, todėl matematinis modelis parinktas teisingai.

Iš 4.10 lygties regresijos koeficientų ir 4.16 lentelės duomenų matome, kad rodikliai skirtingai veikia F_5 dydį, nors yra reikšminiai (nes jų apskaičiuota Studento kriterijaus reikšmė yra didesnė už Studento kriterijaus kritinį (2,02) dydį).

Iš 4.16 lentelės matyti, kad $F_{5.wp}$ labiausiai priklauso nuo tankių: viso gaminio tankio (didžiausias Studento kriterijaus dydis 22,89) ir didesnio tankio sluoksnio (3,22). Tai galima paaiškinti tuo, kad sutelktoji apkrova matuojama bandinio paviršiuje išspaudžiant 50 cm^2 ploto cilindrą iki 5 mm deformacijos, ir kuo tankesnė medžiaga, tuo didesnis pasipriešinimas išsiskverbimui. Ypač teigiamą poveikį turi viršutinėje bandinių dalyje esantys didesnio tankio (kietesni) sluoksniai. Kadangi viso gaminio tankis glaudžiai susijęs (nes apskaičiuotas porinės koreliacijos koeficientas 0,9330 tarp viršutinio sluoksnio ir viso gaminio tankių) su viršutinės dalies (kietesnio sluoksnio) tankio dydžiu, tai nuo abiejų tankių dydžio ir priklauso sutelktoji apkrova. Storio įtakos reikšmingumas jau aprašytas 4.2.2 skirsnyje. Naudojant empirinę lygtį (4.10) galima 93,71 % tikslumu apskaičiuoti viso gaminio sutelktosios apkrovos dydį, žinant viso gaminio bei didesnio tankio (viršutinio) sluoksnio tankius ir storį neviršijant $\pm 53,3 \text{ N}$ paklaidos.

Šio skyriaus bandymų metu išmatuoti ir lyginti viso heterogeniškos struktūros bandinio ir atskirų jį sudarančių sluoksnių σ_{10} ir F_5 dydžiai. Tačiau svarbu nustatyti ir bandinių „vientisumo“ įtaką, t. y. ar skiriasi vientisos heterogeniškos struktūros bandinio gniuždymo įtempio ir sutelktosios apkrovos išmatuoti dydžiai ir tokio paties bandinio, tik sluoksnių susijungimo vietoje padarius horizontalų pjūvį (t. y. mechaniškai atskyrus abu sluoksnius) (4.18 pav.).



4.18 pav. Heterogeniškos struktūros bandinio sluoksnių prapjovimo vieta

Fig. 4.18. The point of cutting of layers in a test specimen with a heterogeneous structure

Tiems patiems bandymams buvo parinkti identiško tankio bandiniai, norint išvengti tankio skirtumų įtakos. Gauti vidutiniai tankio, gniuždymo įtempio, esant 10 % deformacijai, ir sutelktosios apkrovos dydžiai pateikti 4.17 lentelėje.

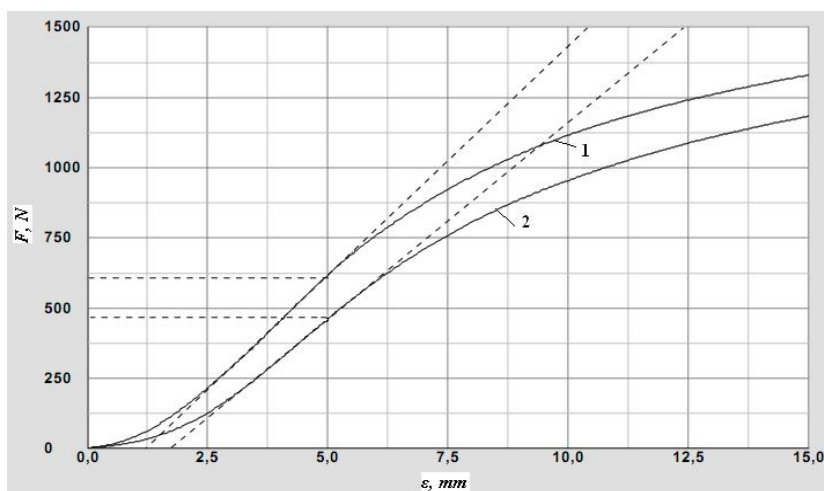
4.17 lentelė. Vidutiniai išmatuoti ρ , σ_{10} ir F_5 vientisos struktūros bandinių dydžiai ir su atskirtais sluoksniais

Table 4.17. The average measured values of ρ , σ_{10} and F_5 for evenly structured specimens and for test specimens with separated layers

Vientisos heterogeniškos struktūros			Sluoksniai prapjauti jų susijungimo vietoje		
ρ , kg/m ³	σ_{10} , kPa	F_5 , N	ρ , kg/m ³	σ_{10} , kPa	F_5 , N
143,8	66,7	–	143,4	66,1	–
113,2	–	480,0	113,5	–	404,5

Iš 4.17 lentelės matome, kad skiriasi išmatuoti vidutiniai σ_{10} ir F_5 dydžiai vientisų bandinių, kurių viršutinis ir apatinis sluoksniai buvo suklijuoti, ir bandinių su atskirtais ir laisvai sudėtais vienas ant kito sluoksniais. Gniuždymo įtempio, esant 10 % deformacijai, dydžiai abiem atvejais skiriasi mažiau kaip 1 %, todėl galima teigti, kad sluoksnių sujungimas ir vientisumas σ_{10} įtakos neturi. Tai paaiškinama tuo, kad apkrovai veikiant tolygiai pasiskirsčius viso gniuždomo bandinio plote susispaudimas vyksta silpniausioje bandinio vietoje ir todėl sluoksnių vientisumo pažeidimas nereikšmingas. Nors vientisos struktūros bandinių išmatuotas mažesnis ($N_0 = 0,4$ mm) pradinės deformacijos atskaitos taškas, lyginant su bendru sluoksniu iš laisvai vienas ant kito sudėtų didesnio ir mažesnio tankio sluoksnių (čia išmatuotas $N_0 = 0,7$ mm).

Tačiau sutelktajai apkrovai daroma gaminio vientisumo ir standaus kontakto tarp viršutinio ir apatinio sluoksnių įtaka, nes išmatuoti F_5 dydžiai vidutiniškai skiriasi 15 % (4.17 lentelė). Matuojant nubraižyta jėgos ir deformacijos diagrama (4.19 pav.) rodo, kad nors ir kreivių forma išliko toki pati, rezultatai skyrėsi. Tai galima būti aiškinti tuo, kad bandymų metu bandinio paviršiuje veikianti sutelktoji apkrova pasiskirsto nevienodai, kai yra vientisas ar iš atskirų sluoksnių sudarytas heterogeniškos struktūros gaminy. Pirmuoju atveju esant glaudžiam kontaktui (gaunamam gamybos metu) tarp sluoksnių apkrova tolygiai veikia per visą abiejų sluoksnių storį. Plačiau tokių gaminių gamyba aprašyta 1.3.3 skirsnyje.



4.19 pav. Heterogeniškos struktūros dvitankių bandinių jėgos ir deformacijų diagrama, kurių: 1 – sluoksniai suklijuoti standžiai (MW-2.3/10); 2 – sluoksniai, laisvai sudėti vienas ant kito (MW-2.3/10s)
Fig. 4.19. The force and deformation curves for dual density products with heterogeneous structure, in which: 1 – the layers are glued (MW-2.3/10); 2 – the layers are freely laid one onto another (MW-2.3/10s)

Kai yra atskiri ir laisvai vienas ant kito sudėti sluoksniai, sutelktoji apkrova per viršutinį veikia ir apatinį sluoksnį, tačiau nesant standaus sujungimo tarp jų, apkrova pasiskirsto gerokai mažesniame plote. Taigi esant sutelktajai apkrovai, kai koncentruota jėga veikia nedideliame plote, ypač didelę įtaką turi ne tik atskirų sluoksnių parametrai, bet ir standus sujungimas tarp jų, nes heterogeniškose konstrukcijose atskirų sluoksnių sujungimas į visumą yra svarbi standumo ir pastovumo sąlyga (Juknevičius *et al.* 2006).

4.4. Skirtingos struktūros mineralinės vatos gaminių gniuždymo stiprio ir sutelktosios apkrovos dydžių lyginamieji tyrimai

Kaip žinoma iš ankščiau atliktų tyrimų (Кудзявичюс, Гваздаускас 1987; Бобров 1987b), mineralinės vatos gaminiai pasižymi skirtingu deformacijos laipsniu, kuris priklauso nuo dominuojančios plaušų orientacijos struktūroje ir apkrovos pridėjimo krypties plaušo atžvilgiu.

Siekiant nustatyti mechaninių rodiklių priklausomybę nuo plaušų orientacijos gaminyje bandymams buvo parinkti $122 \text{ kg/m}^3 \pm 12 \%$ nominalaus tankio, bet skirtingos struktūros akmens vatos gaminiai: MW-1.17 bandiniai, išpjauti iš homogeniškos struktūros plokščių, kuriose dominuoja chaotiška plaušų orientacija; MW-2.11 iš heterogeniškos struktūros dviejų tankių plokščių, o bandiniai MW-1.18 – iš homogeniškos struktūros, bet vertikalios kryptingos plaušų orientacijos gaminio. Detalus bandinių aprašymas pateiktas 2.2 poskyrio 2.6 lentelėje.

Tankio (gniuždymo ir sutelktosios apkrovos bandymuose) bei organinių medžiagų kiekio eksperimentinių bandymų metu gauti rezultatai pateikti suvestinėje 4.18 lentelėje.

4.18 lentelė. Bandinių tankio (atliekant gniuždymo ir sutelktosios apkrovos bandymus) ir organinių medžiagų kiekio vidutiniai dydžiai

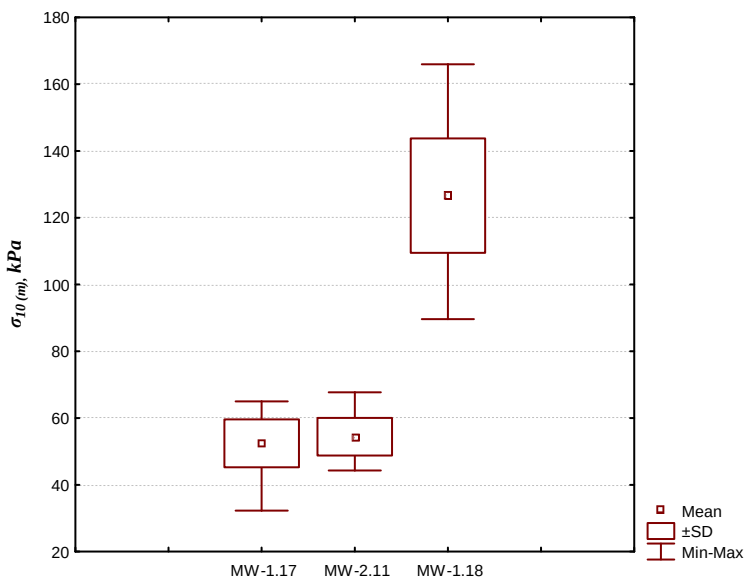
Table 4.18. The average values of density (in compression and point load tests) and organic material content of test specimens

Bandiniai	Tankis (atliekant gniuždymo bandymus) $\rho_s, \text{kg/m}^3$	Tankis (atliekant sutelktosios apkrovos bandymus) $\rho_{F5}, \text{kg/m}^3$	Organinių medžiagų kiekis $M, \%$
MW-1.17	122,4	122,5	2,90
MW-2.11	125,6	125,8	3,59
MW-1.18	116,3	121,3	4,11

Vidutiniai visų tipų bandinių išmatuoti ρ_s ir ρ_{F5} gauti panašūs (4.18 lentelė). Maksimalus ρ_s skirtumas tarp bandinių (atliekant gniuždymo bandymus) sudarė iki 8,9 %, o atliekant sutelktosios apkrovos bandymus ρ_{F5} skirtumas siekė 3,5 %. Apskaičiuoti tankių vidutiniai standartiniai nuokrypiai (s) taip pat skiriasi nedaug ir buvo atitinkamai 4,5–6,8 kg/m^3 (visiems tipams), todėl galima teigti, kad tankio sklaida nedidelė ir tankio nuokrypiai didelės įtakos neturėjo.

Tačiau gniuždymo bandymo metu išmatuotų vidutinių dydžių skirtumas siekė net 2,42 karto (4.20 pav.). Didžiausi stiprio gniuždant dydžiai gauti MW-1.18 bandinių (vidutiniškai 126,6 kPa). Tai gali būti aiškinama tuo, kad

gniuždymo apkrovos veikimo kryptis sutapo su plaušų išsidėstymu gaminyje, ir visi gniuždomojoje zonoje esantys plaušai priešinosi suspaudimui. Kai kurių autorių (Strazdas, Eidukevičius 1985; Заровнятных 2003) teigimu, MW-1.18 tipo bandiniuose vertikalčiai išsidėsčiusių plaušų kiekis siekia iki 85 %. Taip pat skyrėsi gniuždymo jėgos nuskaitymo momentas, nes bandiniai suiro nepasiekę santykinės 10 % deformacijos, todėl pagal standarto LST EN 826 (1998) 3.2 punktą buvo nustatytas jų stipris gniuždant (σ_m) įvertinus didžiausią apkrovimo jėgą pagal apkrovos ir deformacijos kreivę.



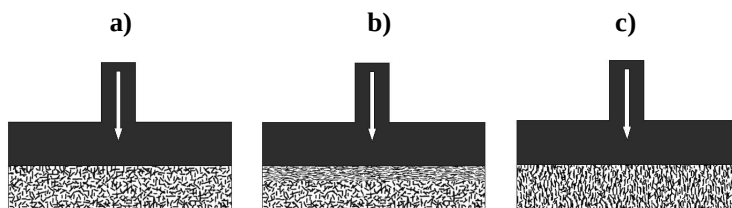
4.20 pav. Išmatuotų bandinių gniuždymo įtempio (stiprio gniuždant) dydžių pasiskirstymas

Fig. 4.20. The spread of the values of the measured compression stress (compression strength) of test specimens

MW-1.17 ir MW-2.11 bandiniai buvo deformuojami 10 % ir daugiau, todėl pagal standarto LST EN 826 (1998) 3.3 punktą nustatyta jėga, atitinkanti bandinio 10 % santykinę deformaciją, ir apskaičiuotas gniuždymo įtempis, esant 10 % deformacijai (σ_{10}). Bandinių MW-1.17 visoje struktūroje, o MW-2.11 bandinių apatiniame (mažesnio tankio) sluoksnyje dominuoja chaotiška plaušų orientacija, kurioje dalis plaušų yra pasiskirstę horizontalia kryptimi (kuri sutampa su pluošto klando judėjimo konvejeriu kryptimi). Todėl gniuždymo metu susispaudimas ir deformacija vyksta dėl laipsniško plaušų persigrupavimo chaotiškos plaušų orientacijos struktūroje. Taigi gniuždymo įtempis yra

palyginti nedidelis (Бобров 1987a), tai rodo ir išmatuoti σ_{10} dydžiai (vidutiniškai 52,4 kPa MW-1.17 ir 54,4 kPa MW-2.11 bandinių). Visų bandinių gniuždymo įtempio (stiprio gniuždant) dydžių apskaičiuoti vidutiniai standartiniai nuokrypiai svyruoja nuo 5,64 iki 7,16 kPa.

Palyginti nedidelis MW-1.17 bandinių σ_{10} išmatuotas dydis gali būti paaiškinamas tuo, kad gniuždymo metu apkrova veikia visame bandinio plote ir deformavimas vyksta per visą plotą ir bandinio storį (4.21 pav., a).



4.21 pav. Skirtingos struktūros bandinių gniuždymas: a – homogeniškos struktūros chaotiškos plaušų orientacijos; b – dviejų tankių heterogeniškos; c – homogeniškos struktūros vertikalios plaušų orientacijos

Fig. 4.21. Compression of test specimens with different structures: a – homogeneous structure with chaotic fibre orientation; b – heterogeneous dual density; c – homogeneous structure with vertical fibre orientation

Tačiau heterogeniškos struktūros (mūsų MW-2.11) bandiniai buvo sudaryti iš dviejų skirtingo (viršutinio tankesnio 200 kg/m³ ir apatinio mažesnio 115 kg/m³) tankio sluoksnių. Gniuždymo metu viršutinis sluoksnis beveik nesideformuoja, o tik perduoda apkrovą apatiniam sluoksniui.

Taigi susispaudimas ir irimas vyksta silpniausioje (mažiausio tankio) sluoksnyje ar jo dalyje (4.21 pav., b) ir tik šiam sluoksniui pasiekus tam tikrą sutankėjimo ribą, nedaug deformuojasi ir viršutinis (didesnio tankio) sluoksnis. Taigi realiai buvo gniuždoma tik apatinė (mažesnio tankio) bandinio dalis, o viršutinis sluoksnis tik padidino vidutinį bandinių tankį, bet jo įtaka gaminių gniuždymo įtempio, esant 10 % deformacijai, dydžiui buvo minimali. Vidutinis MW-2.11 bandinių σ_{10} dydis siekė 54,4 kPa.

Vertikalios plaušų orientacijos MW-1.18 bandinių atveju pridedama apkrova yra lygiagreti struktūroje dominuojančių plaušų atžvilgiu (4.21 pav., c). Todėl galima sakyti, kad bet beveik visi plaušai priešinasi deformacijai, tai rodo ir didžiausias išmatuotas (4.20 pav.) vidutinis stiprio gniuždant dydis – 126,6 kPa. Gniuždomi bandiniai deformavosi tik 1–2 % ir staigiai suiro (2.1 pav. iš 2.1.3 skirsnio).

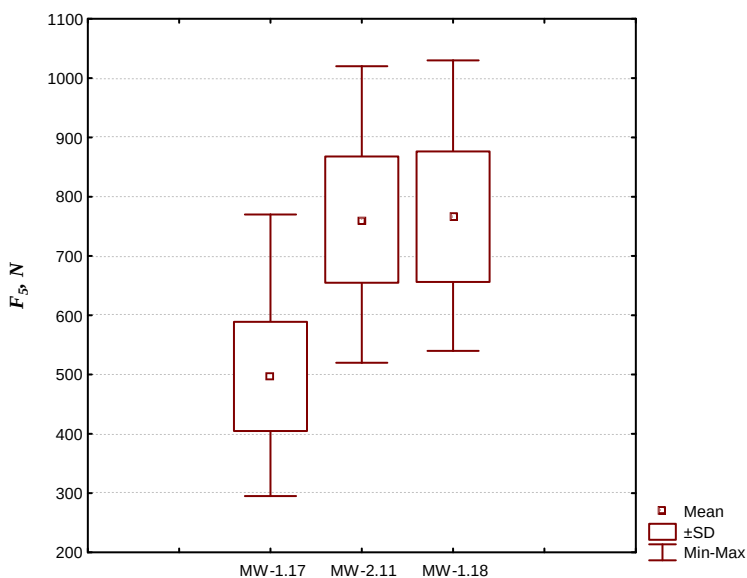
Pastebėta, kad MW-1.17 ir MW-2.11 bandiniai (kurių struktūroje ar jos dalyje dominuoja chaotiškos orientacijos plaušų išsidėstymas), apkrauti

gniuždymo apkrovomis, deformuojasi be didelių liekamųjų deformacijų ir po bandymų beveik atgauna pradinį aukštį (storį). Tačiau vertikalios plaušų orientacijos MW-1.18 bandinių aukštis (storis) neatsikuria, nes bandymų metu įvyksta negrįžtamų struktūros pokyčių. Publikacijoje (Гнип 1985) teigiama, kad likutines deformacijas lemia bandinių struktūra ir sugniuždymo laipsnis.

Kaip matome iš gautų (4.20 pav.) rezultatų, didžiausią įtaką gniuždymo įtempiui ar stipriui gniuždant turėjo bandinių struktūra, nes didžiausi dydžiai buvo išmatuoti vertikalios kryptingos plaušų orientacijos bandinių.

Iš kitų publikacijų (Strazdas 1998; Шойхет 2009) žinome, kad mineralinės vatos gaminių mechaniniai rodikliai priklauso nuo daugybės veiksnių: lydalo cheminės sudėties ir kokybės, plaušo formavimo sąlygų, rišamųjų medžiagų kiekio, jų lašelių dydžio ir pasiskirstymo tolygumo visame gaminio tūryje bei jo sukibties su plaušais stiprio.

Išmatuoti sutelktosios apkrovos dydžiai labai skiriasi (4.22 pav.) ypač tarp MW-1.17 ir kitų abiejų MW-2.11 ir MW-1.18 tipų bandinių, nes maksimalus skirtumas sudarė net 54 %.

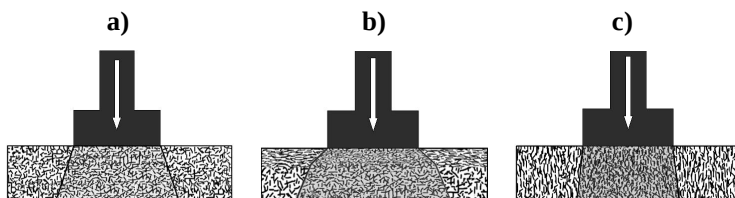


4.22 pav. Išmatuoti bandinių sutelktosios apkrovos (F_5) dydžiai ir jų pasiskirstymas

Fig. 4.22. The measured the point load (F_5) of the test specimens and the spread of the values

Pirmiausia toks didelis sutelktosios apkrovos (F_5) skirtumas gali būti aiškinamas skirtinga plaušų orientacija bandiniuose. Sutelktąją apkrovą bandant koncentruota gniuždymo apkrova, bandinys deformuojamas tik 5 mm (LST EN 13162:2009). Todėl homogeniškos struktūros (MW-1.17) gaminyje sutelktoji apkrova daugiausia veikia tik paviršiuje ir gniuždymo jėgos poveikiui priešinasi tik paviršiniame sluoksnyje esantys chaotiškos orientacijos (kurioje didžioji plaušų dalis išsidėsčiusi horizontalia kryptimi) plaušai (4.23 pav., a).

MW-2.11 bandiniuose nedideliame paviršiaus plote veikiančias gniuždymo jėgas pirmiausia perima heterogeniškos struktūros gaminio viršutinis (didesnio tankio) sluoksnis – atsparesnis gniuždymui ir tik paskui jas perduoda mažesnio tankio (apatiniam), taip tolygiau paskirstant poveikį per visą dviejų tankių (MW-2.11) gaminio storį (4.23 pav., b). MW-1.18 tipo bandiniuose išorinei jėgai priešinasi tik gniuždomame plote (tačiau per visą bandinio storį) išsidėstę plaušai (4.23 pav., c). Dėl kryptingos (vertikalios) plaušų orientacijos, kuri yra statmena veikiančios jėgos atžvilgiu, jie priešinasi iki suirimo.



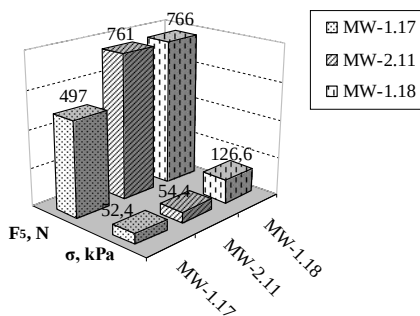
4.23 pav. Bandiniai sutelktosios apkrovos bandymo metu:

- a – homogeniškos struktūros chaotiškos plaušų orientacijos;
- b – heterogeniškos struktūros dviejų tankių; c – homogeniškos struktūros vertikalios plaušų orientacijos

Fig. 4.23. Test specimens during point load test: a – homogeneous structure with chaotic fibre orientation; b – heterogeneous dual density; c – homogeneous structure with vertical fibre orientation

Heterogeniškos struktūros (MW-2.11) bandinių sutelktosios apkrovos dydžiai gauti gana dideli (761,3 N) bei panašūs į vertikalios plaušų orientacijos (MW-1.18) bandinių dydžius (766,3 N). Mažiausi vidutiniai sutelktosios apkrovos dydžiai išmatuoti MW-1.17 bandinių ir siekia 497,1 N. Apskaičiuoti sutelktosios apkrovos vidutiniai standartiniai nuokrypiai (s) svyruoja 13,9–18,5 % (mažiausiai MW-2.11, daugiausiai MW-1.17 bandinių). Tokie dideli nuokrypiai gali būti aiškinami erdvinės pluoštinės struktūros netolygumais dėl nedideliame plote veikiančios koncentruotos apkrovos.

Rezultatai rodo (4.24 pav.), kad geriausius mechaninius rodiklius (pagal nustatytus vidutinius stiprio gniuždant (126,6 kPa) ir sutelktosios apkrovos (766,3 N) dydžius) turi homogeniškos struktūros kryptingos vertikalios plaušų orientacijos (MW-1.18) bandiniai.



4.24 pav. Vidutiniai skirtingos struktūros (MW-1.17, MW-2.11, MW-1.18) bandinių gniuždymo įtempio (stiprio gniuždant) ir sutelktosios apkrovos dydžiai

Fig. 4.24. Average values of compression stress (compression strength) and point load for test specimens with different structures (MW-1.17, MW-2.11, MW-1.18)

Tačiau reikėtų įvertinti ir tai, kad buvo išmatuotas skirtingos struktūros bandinių skirtingas vidutinis organinių medžiagų kiekis: MW-1.17 – 2,9 %, MW-2.11 – 3,59 % ir MW-1.18 – 4,11 %. Galima manyti, kad ir didesnis organinių medžiagų kiekis iš dalies lėmė didesnius gniuždymo įtempio (stiprio gniuždant) dydžius (4.18 lentelė). Kaip žinoma iš ankstesnių tyrimų (4.1–4.3 poskyriai), organinių medžiagų kiekis turi įtakos gniuždymo įtempiui, bet neveikia sutelktosios apkrovos dydžio, kuris priklauso nuo tankio, storio ir paviršinio sluoksnio parametrų.

Dėl sudėtingos gamybos ir nekonvejerinio technologinio proceso vertikalios plaušų orientacijos gaminiai nėra plačiai gaminami (Заровнятных *et al.* 2002). Taigi heterogeniškos struktūros gaminiai, sudaryti iš kelių skirtingo tankio sluoksnių, leidžia pagaminti tokio paties tankio, bet geresnių mechaninių savybių akmens vatos plokštės (lyginant su homogeniškos struktūros chaotiškos plaušų orientacijos gaminiais) įvairioms konstrukcijoms šiltinti.

Atlikti tyrimai patvirtino lemiamą atsitiktinai ar kryptingai suformuoto plaušo išsidėstymo gaminio struktūroje įtaką gniuždomų akmens vatos gaminių stiprumo parametrui. Kryptinga plaušo orientacija yra svarbi gaminio mechaninėms savybėms, nes „gniuždymo apkrovos poveikį daugiausiai perima plaušai, kurių standumas gerokai didesnis nei sintetinio rišiklio“ (Гнип 1987).

4.5. Ketvirtojo skyriaus išvados

1. Pluoštinės struktūros valdymas gamybos proceso metu, plaušų išsidėstymo kryptis ir skirtingo tankio sluoksniai gaminio struktūroje lemia mineralinės vatos plokščių stiprumo ir deformacinės savybės. Nustatyta, kad homogeniškos struktūros chaotiškos plaušų orientacijos plokščių gniuždymo įtempio (σ_{10}), esant 10 % deformacijai, dydis priklauso nuo tankio ir organinių medžiagų kiekio ($R = 0,8991$), o sutelktoji apkrova – nuo tankio ir storio (nes $R = 0,8529$). Heterogeniškos struktūros dvitankėse plokštėse, be tankio, yra skirtinga atskirų sluoksnių įtaka gniuždymo įtempiui, esant 10 % deformacijai, ir sutelktajai apkrovai (F_5).
2. Heterogeniškos struktūros plokštės (sudarytas iš kelių skirtingo tankio sluoksnių) veikiant gniuždymo apkrova, skirtingo tankio sluoksniai gaminio struktūroje deformuojasi laipsniškai: pirmiausia deformuojasi mažesnio tankio plokštės dalis (sluoksnis), o jai pasiekus tam tikrą sutankėjimo ribą, nedaug deformuojasi ir didesnio tankio sluoksnis, todėl σ_{10} priklauso ir nuo mažesnio tankio sluoksnio. Didesnio tankio sluoksnio paskirtis gaminio struktūroje – perimti ir paskirstyti paviršiuje veikiančią koncentruotą gniuždymo apkrovą palaipsniui mažesnio tankio sluoksniui daug didesniame plote (per visą gaminio storį). Todėl viršutinio sluoksnio buvimas ar nebuvimas ir jo tankis daro didžiausią įtaką viso gaminio F_5 dydžiui.
3. Gauti rezultatai rodo, kad heterogeniškos struktūros gaminių gniuždymo įtempis, esant 10 % deformacijai, priklauso nuo vidutinio tankio, organinių medžiagų kiekio ir plokštės mažesnio (minkštesnės dalies) sluoksnio tankio. Sutelktosios apkrovos dydį veikia vidutinis tankis, storis ir viršutinės plokštės dalies (sluoksnio) tankis. σ_{10} ir F_5 dydžiams apskaičiuoti sudarytų empirinių lygčių daugialypės koreliacijos koeficientai 0,9680–0,9847. Nustatyta, kad standus viršutinio ir apatinio sluoksnių sujungimas (suklijavimas) apytiksliai 15 % padidina viso gaminio sutelktosios apkrovos dydį.
4. Nustatyta, kad heterogeniškos struktūros plokščių gniuždymo įtempis, esant 10 % deformacijai, nepriklauso nuo viršutinio sluoksnio (5–15 mm) storio. Viršutinio sluoksnio storiui sumažėjus 66 %, išmatuoti σ_{10} vidutiniškai sumažėjo tik 7 %. Tačiau viršutiniam sluoksniui suplonėjus iki 5 mm, išmatuotas vidutinis 14 % sutelktosios apkrovos dydžių sumažėjimas. Todėl mažiausias viršutinio sluoksnio storis turėtų būti 10 mm, nes šiam storiui išmatuoti optimalūs σ_{10} ir F_5 dydžiai. Apatinio sluoksnio storis nedaro poveikio gniuždymo įtempiui, esant 10 %

deformacijai, tačiau sutelktoji apkrova priklauso nuo bandinių storio, nes storiui didėjant išmatuojama ir didesnė sutelktoji apkrova. Todėl to paties tipo, bet storesnių heterogeniškos struktūros gaminių gali būti deklaruojami didesni sutelktosios apkrovos dydžiai arba mažinamas (apie $7,5 \text{ kg/m}^3$) apatinio sluoksnio tankis.

5. Lyginamieji tyrimai rodo, kad mineralinės vatos gaminių mechaninės savybės (gniuždymo įtempis ir kt.) ir deformacijų pobūdis priklauso nuo plaušų orientacijos kryptingumo struktūroje. Kai tankis vienodas, vertikalios kryptingos plaušų orientacijos gaminių vidutinis stipris gniuždant apie 2,3–2,4 karto didesnis, lyginant su homogeniškos struktūros chaotiškos plaušų orientacijos ir heterogeniškos struktūros gaminiais. Tačiau heterogeniškos struktūros ir vertikalios kryptingos plaušų orientacijos gaminių vidutiniai sutelktosios apkrovos dydžiai (761,3–766,3 N) panašūs bei 1,53–1,54 karto didesni, palyginti su homogeniškos struktūros chaotiškos plaušų orientacijos plokštėmis.

Mineralinės vatos gaminių atsparumas klimatinių veiksnių ir dinaminių apkrovų poveikiui

Pastatų atitvarų termoizoliaciniam sluoksniui naudotos medžiagos yra veikiamos įvairių klimatinių (dažniausiai temperatūros ir drėgmės) veiksnių ir mechaninių apkrovų (dažniausiai vaikščiojimas montavimo ir eksploatacijos metu).

Dėl ilgalaikio šių veiksnių poveikio medžiagose vyksta įvairūs fizikiniai procesai (dažniausiai vadinami senėjimu). Šių procesų metu kinta medžiagų fizinės ir mechaninės savybės. Kaip rodo praktika, dažnai dėl informacijos ir (arba) tyrimų trūkumo mineralinės vatos gaminiai (ypač plokščiųjų stogų konstrukcijose) netinkamai įrengiami ir eksploatuojami. Todėl padidėja šilumos nuostoliai, o atitvaroms daromas neigiamas ardomas poveikis. Tačiau šiuo metu gaminamoms mineralinės vatos plokštėms, naudojamoms plokščiųjų stogų atitvaroms šiltinti, nėra reglamentuoti ilgaamžiškumo ar atsparumo klimatinių veiksnių ar dinaminės apkrovos poveikių tyrimai. Todėl svarbu nustatyti ir prognozuoti naudojamų mineralinės vatos gaminių savybių pokyčius eksploatacijos metu.

Skyriaus tematika paskelbti du Buskos su kitais autoriais straipsniai (Paukštys, Šeduikytė, Buska 2007; Buska, Lybye, Mačiulaitis 2008).

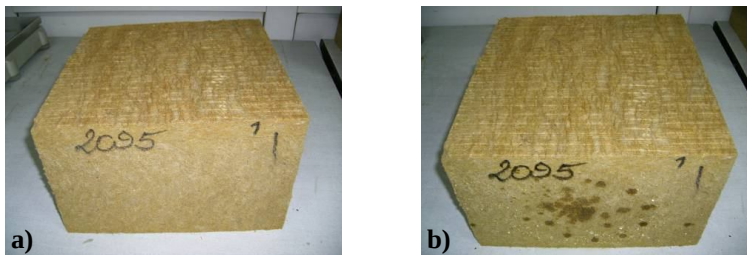
5.1. Temperatūros ir drėgmės poveikis mineralinės vatos plokščių gniuždymo įtempio dydžiams

5.1.1. Mineralinės vatos plokščių gniuždymo įtempio pokyčiai dėl temperatūros ir drėgmės poveikio laboratorinėmis sąlygomis

Siekiant įvertinti klimatinį (temperatūros ir drėgmės) veiksnių poveikio mineralinės vatos gaminių gniuždymo stiprio pokyčiams, atlikti klimatinio sendinimo bandymai laboratorinėmis sąlygomis. Šių bandymų metu sudaromos ekstremalios sąlygos, kai vienu metu veikia aukšta temperatūra (+70 °C) ir didelė drėgmė (95 %). Plačiau bandymo metodas ir naudota įranga aprašyti 2.1.5 skirsnyje.

Bandymams pasirinktos skirtingos struktūros akmens vatos plokštės, bet turinčios vienodą deklaruojamąjį (≥ 50 kPa) gniuždymo įtempio dydį. Bandinių aprašymai pateikti 2.2 poskyrio 2.7 lentelėje.

Po klimatinio veiksnių poveikio bandymų vizualiai neužfiksuota jokių plaušų struktūros, spalvos ar bandinių formos pokyčių (išskyrus tai, kad ką tik iš klimatinės kameros ištrauktų bandinių paviršius buvo šlapias (5.1 pav.)).



5.1 pav. MW-2.12 tipo bandiniai atliekant sendinimo bandymus:

- a – prieš patalpinant į klimatinę kamerą;
- b – ištraukus iš klimatinės kameros

Fig. 5.1. MW-2.12 type test specimens at ageing tests:

- a – before ageing test; b – after completed ageing at climatic chamber

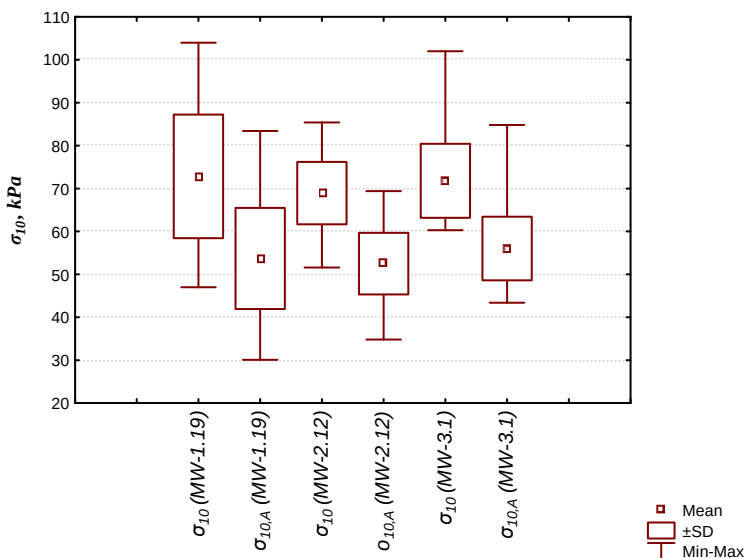
Eksperimentinių tyrimų metu gautų tankio prieš ir po sendinimo bandymų, gniuždymo įtempio, esant 10 % deformacijai, ir organinių medžiagų kiekio vidutiniai dydžiai pateikti 5.1 lentelėje, o gniuždymo įtempio prieš sendinimą ir po sendinimo eksperimentinių rezultatų pasiskirstymas pateikiamas 5.2 paveiksle.

5.1 lentelė. Bandinių prieš ir po sendinimo bandymų tankio, gniuždymo įtempio, esant 10 % deformacijai, ir organinių medžiagų kiekio vidutiniai dydžiai

Table 5.1. The average values of density, compression stress at 10% deformation and organic material content of test specimens before and after ageing test

Bandiniai	Be sendinimo			Po sendinimo bandymų	
	tankis ρ , kg/m ³	gniuždymo įtempis, esant 10 % deformacijai, σ_{10} , kPa	organinių medžiagų kiekis M , %	tankis ρ_A , kg/m ³	gniuždymo įtempis, esant 10 % deformacijai $\sigma_{10,A}$, kPa
MW-1.19	140,2	72,9	3,48	139,9	53,7
MW-2.12	144,7	68,9	3,63	144,6	52,5
MW-3.1	161,0	71,8	3,75	162,1	56,0

Iš 5.1 lentelės matyti, kad po sendinimo bandymų vidutinių tankių dydžiai nepakito (vidutinis skirtumas <0,8 %). Tik MW-1.19 tipo bandinių ribinių mažiausių ir didžiausių tankio dydžių sumažėjimas siekia apytiksliai 1,8 %. Vidutiniai standartiniai tankio nuokrypiai taip pat nepakito, o MW-3.1 bandinių 8 % padidėjo. Šie nedideli tankio pokyčiai galėjo atsirasti ir dėl dalinės mineralinių ir (arba) organinių medžiagų hidrolizės.



5.2 pav. Gniuždymo įtempio (prieš ir po sendinimo) dydžių pasiskirstymas

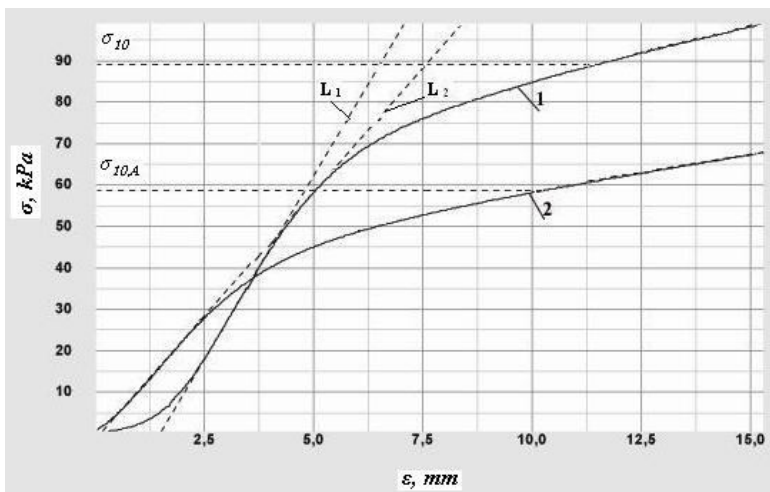
Fig. 5.2. The spread of the values of compression stress (before and after ageing tests)

Iš 5.2 paveikslo matome, kad visų bandinių gniuždymo įtempio, esant 10 % deformacijai ($\sigma_{10,A}$), dydžiai po sendinimo sumažėjo vidutiniškai beveik trečdaliu. Analizuojant visus bandymų rezultatus išmatuotas MW-1.19 bandinių didžiausias vidutinis gniuždymo įtempio dydžių sumažėjimas. Sumažėjimas vidutiniškai siekia apie 36 % (nuo 72,9 kPa iki 53,7 kPa), lyginant su išmatuotais nesendintų bandinių gniuždymo įtempio (σ_{10}) dydžiais.

MW-2.12 tipo bandinių $\sigma_{10,A}$ dydžiai vidutiniškai sumažėjo 31 % (nuo 68,9 kPa iki 52,5 kPa), ir MW-3.1 bandinių – atitinkamai apie 28 % (nuo 71,8 kPa iki 56,0 kPa). Tačiau gniuždymo įtempio vidutiniai standartiniai nuokrypiai (s) po sendinimo kito 3,2–7,9 %. Gniuždymo įtempio, esant 10 % deformacijai, variacija prieš bandymą buvo 10,6–19,5 %, tačiau po sendinimo dydžių pasiskirstymas padidėjo iki 13,3–21,95 % (daugiausiai MW-1.19 tipo bandinių). Po sendinimo mažiausias išmatuotas MW-1.19/41 bandinio gniuždymo įtempio ($\sigma_{10,A}$) dydis siekė vos 30,1 kPa, o didžiausias išmatuotas buvo 84,8 kPa bandinio MW-3.1/18.

Kadangi gniuždymo bandymų metu buvo užrašomos jėgos ir deformacijos kreivės, atlikta jų analizė, siekiant matyti bandinių (prieš sendinimą ir po to) elgseną ir deformavimosi mechanizmą veikiant gniuždymo apkrovoms.

Akivaizdus $\sigma_{10,A}$ dydžių sumažėjimas matomas kreivėse, todėl kaip pavyzdį pateikiame vieno MW-1.19 tipo bandinio apkrovos ir deformacijos kreives (5.3 pav.).



5.3 pav. Bandinių apkrovos ir deformacijos kreivės: 1 – prieš sendinimą (MW-1.19/4); 2 – po sendinimo bandymo (MW-1.19/4A)

Fig. 5.3. Load-deformation curves for test specimens: 1 – before test (MW-1.19/4); 2 – after ageing test (MW-1.19/4A)

Tarpusavyje palyginę abi kreives matome, kad bandiniai deformuojasi skirtingai (5.3 pav.). Skiriasi bandinių pradinių deformacijų atskaitos taškai (N_0), gaunami brėžiant liestines (L_1 , L_2) per stačiausią kreivės dalį iki deformacijų ašies. 1 kreivėje taškas $N_0 = 1,5$ mm, o 2 kreivėje $N_0 = 0,1$ mm. Tai rodo, kad deformacija prasidėjo iš karto pradėjus veikti jėgai. 1 kreivėje matomi didesni pradiniai įtempiai, palyginti su deformacija, todėl 1 kreivė yra statesnė. 2 kreivės forma rodo, kad bandymo pradžioje įtempiai lėčiau didėja deformacijos atžvilgiu (ji labiau palinkusi). 5.3 paveiksle analizuojamo bandinio po sendinimo struktūrinio tamprumo praradimas fiksuojamas greičiausiai dėl susilpnėjusių tarpplaušinių ryšių, todėl ir išmatuota $\sigma_{10,A} = 58,5$ kPa. Taigi likutinis gniuždymo įtempis siekia 65,6 %, nes išmatuota bandinio be sendinimo σ_{10} siekia 89,6 kPa.

Siekiant nustatyti prieš ir po sendinimo bandymų išmatuotų gniuždymo įtempio dydžių sąryšio dėsningumus su pradiniais (buvusiais prieš sendinimą) tankio, storio, gniuždymo įtempio, esant 10 % deformacijai, bei organinių medžiagų kiekio rodiklių dydžiais, buvo atlikta rezultatų statistinė ir regresinė analizė bei sudarytos empirinės lygtys (5.2 lentelė). Kadangi visų tipų bandinių gniuždymo įtempio vidutiniai dydžiai prieš ir po sendinimo gauti panašūs (5.1 lentelė), skaičiuodami naudosime visus eksperimentų metu gautus rezultatus nepriklausomai nuo bandinio tipo.

5.2 lentelė. ρ , M , d įtakos tiriamiesiems rodikliams σ_{10} ir $\sigma_{10,A}$ priklausomybės empirinės lygtys

Table 5.2. The empirical dependency equations of the impact of parameters ρ , M , and d on σ_{10} and $\sigma_{10,A}$

Lygtis	Tiriamas rodiklis	Empirinė lygtis
5.1	σ_{10}	$\sigma_{10} = 14,98 + 0,41 \cdot \rho - 0,11 \cdot d + 1,98 \cdot M$
5.2	$\sigma_{10,A}$	$\sigma_{10,A} = -12,98 + 0,72 \cdot \sigma_{10} + 0,019 \cdot \rho + 0,031 \cdot d + 2,65 \cdot M$

Lygčių (5.1 ir 5.2) adekvatumas buvo patikrintas pagal Fišerio kriterijų. Kadangi sudarytų empirinių lygčių apskaičiuoti Fišerio kriterijai (95,29; 159,2) didesni už statistinėje lentelėje pateiktą reikšmę (3,48), tai lygtys laikomos tinkamomis eksperimentiniams duomenims aprašyti. Sudarytų regresinių lygčių kintamųjų reikšmingumas nustatytas pagal Stjudento kriterijų. Jei apskaičiuotos reikšmės didesnės už lentelės (1,93), tai regresijos koeficientas laikomas reikšmingu. Tiesinės priklausomybės ryšio stiprumas buvo įvertintas pagal koreliacijos koeficiento skaitines reikšmes, o parinkto modelio tinkamumas įvertintas pagal apskaičiuotą determinacijos koeficientą.

Empirinių lygčių (5.1 ir 5.2) daugialypės koreliacijos ir determinacijos koeficientų, vidutinio standartinio nuokrypio ir Stjudento kriterijaus reikšmės pateiktos 5.3 lentelėje.

5.3 lentelė. 5.1, 5.2 empirinių lygčių daugialypiai koreliacijos R ir determinacijos R^2 koeficientai, vidutinio standartinio nuokrypio s_e bei Stjudento kriterijaus reikšmės

Table 5.3. The multiple correlation (R) and determination (R^2) coefficients, average standard deviation (s_e), and Student's criterion values for the empirical equations 5.1 and 5.2

Lygtis	Tiriama savybė	R	R^2	s_e	Stjudento kriterijaus reikšmės			
					σ_{10}	ρ	d	M
5.1	σ_{10}	0,7359	0,5415	7,28	–	10,96	1,63	2,34
5.2	$\sigma_{10,A}$	0,8517	0,7255	4,85	16,91	0,63	2,42	2,70

Iš 5.3 lentelės matyti, kad tarp tiriamų rodiklių yra stiprus tiesinis ryšys, nes gautų empirinių lygčių daugialypiai koreliacijos koeficientai $R = 0,7359\text{--}0,8517$ artėja prie vieneto. Apskaičiuoti abiejų lygčių determinacijos koeficientai $R^2 = 0,5415\text{--}0,7255$ (5.3 lentelė) didesni už 0,5, todėl galima teigti, kad parinktas matematinis modelis gerai atspindi eksperimentinių duomenų pasiskirstymo pobūdį.

Empirinės (5.1) lygties Stjudento kriterijaus reikšmės (5.3 lentelė) rodo, kad nesendintų bandinių gniuždymo įtempio dydis tiesiogiai priklauso nuo tankio (ρ) ir gerokai mažiau nuo organinių medžiagų kiekio (M) (nes Stjudento kriterijaus reikšmė – 2,34). Didesnio tankio gaminyje yra palyginti daugiau plaušų ir didesnis jų persikirtimo taškų skaičius tūrio vienetė, todėl didesnis ir stiprumas.

Organinės medžiagos kiekio įtaka gali būti aiškinama tuo, kad esant didesniai M kiekiui gaunamas didesnis tarpplaušinių susiklijavusių ryšių kiekis ir, veikama išorinių spaudimo jėgų, suklajuota pluoštinė matrica yra vienalytiškesnė bei standesnė. Storio (d) įtaka nėra didelė, nes gniuždymas vyksta visu bandinio plotu ir per visą storį nepriklausomai nuo jo dydžio.

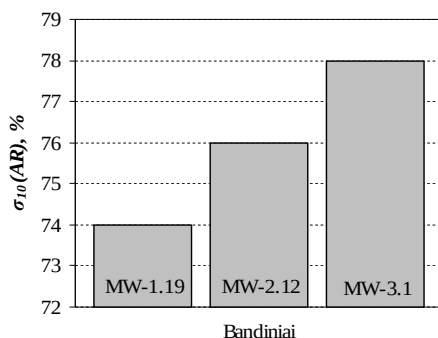
Iš empirinės (5.2) lygties Stjudento kriterijaus reikšmių (5.3 lentelė) matyti, kad gniuždymo įtempio (σ_{10}) dydžiai po sendinimo labiausiai priklauso nuo gniuždymo įtempio dydžio buvusio prieš bandymą. Tankio įtaka (5.2 lygtyje) nėra reikšminga, nes būtent nuo tankio daugiausiai priklauso nesendinto bandinio gniuždymo įtempis (5.1 lygtis).

Tačiau (5.2) lygtyje stebima gaminių storio ir organinių medžiagų kiekio juose įtaka gniuždymo įtempiui po sendinimo. Kadangi klimatiniai veiksniai (temperatūra ir drėgmė) neigiamai veikia rišamąją mineralinės vatos kompozito fazę (šiuo atveju organinės kilmės vandenyje brinkstančius rišiklius), tai didesnę rišamosios medžiagos kiekį turėjusiuose bandiniuose jo buvo kiekybiškai daugiau, o tai lėmė didesnę tarpplaušinių ryšių skaičių. Esant didesniai rišamosios medžiagos kiekiui bandinyje, vyko lėtesnis brinkimas, todėl po sendinimo susilpnėjusių tarpplaušinių ryšių buvo mažiau. Tai sukėlė didesnę struktūros tamprumą ir atsparumą gniuždymo apkrovų poveikiui. Storio atveju pasireiškė vadinamasis tūrio efektas, kai greičiausias ir didžiausias klimatinių veiksnių poveikis tenka paviršiniams sluoksniams visu

perimetru, o gilesniuose sluoksniuose poveikis palaipsniui silpnėja. Todėl plonesnius (ar mažesnių matmenų) bandinius veikia daugiau neigiamų klimatinį veiksnių.

Atlikę papildomus priklausomybės tarp σ_{10} ir $\sigma_{10,A}$ skaičiavimus, matome, kad tarp jų yra stiprus ryšys ($R = 0,8439$, $R^2 = 0,7122$), todėl $\sigma_{10,A}$ dydis vidutiniškai 71,22 % priklauso nuo pradinio gaminio gniuždymo įtempio, esant 10 % deformacijai, dydžio ir 28,78 % – nuo kitų veiksnių (organinių medžiagų kiekio, storio, tankio ir kt.). Taigi norint turėti atsparius klimatiniais poveikiams akmens vatos gaminius, reikia gaminti plokštes, kurių gniuždymo stipris yra didelis.

Bandymų rezultatams išreikšti naudotas gniuždymo įtempio atsparumo senėjimui $\sigma_{10}(AR)$ rodiklis, rodanti procentinį gniuždymo įtempio, esant 10 % deformacijai (σ_{10}), dydžio pokytį po sendinimo, lyginant su tuo dydžiu be sendinimo. Apskaičiuoti rezultatai visų tipų bandiniams pavaizduoti grafiškai (5.4 pav.).



5.4 pav. Gniuždymo įtempio atsparumo senėjimui $\sigma_{10}(AR)$ rodiklio vidutiniai dydžiai

Fig. 5.4. Average values of compression stress ageing resistance $\sigma_{10}(AR)$

Mažiausias $\sigma_{10}(AR)$ rodiklis apskaičiuotas MW-1.19 tipo bandinių ir siekia vidutiniškai 74 % prieš bandymą buvusio gniuždymo įtempio dydžio. Apskaičiuoti kitų išbandytų tipų bandinių gniuždymo įtempio atsparumo senėjimui $\sigma_{10}(AR)$ rodiklio vidutiniai dydžiai: 76 % – MW-2.12 bandinių, 78 % – MW-3.1 bandinių.

Visų tipų bandinių rodiklio $\sigma_{10}(AR)$ standartiniai nuokrypiai (s) svyruoja mažiau kaip 10 % (pažymėtina, kad apskaičiuoti MW-1.19 bandinių didžiausi nuokrypių dydžiai). Pats mažiausias $\sigma_{10}(AR)$ dydis išmatuotas MW-1.19 tipo bandinio ir siekė 58 % pradinio gniuždymo įtempio, esant 10 % deformacijai.

Analizuojant rezultatus nustatyta, kad pradinis šio bandinio $\sigma_{10} = 75,8$ kPa, o po sendinimo tik $\sigma_{10,A} = 44,1$ kPa. Taip pat buvo išmatuotas šio bandinio vienas mažiausių organinių medžiagų kiekio (2,75 %) dydžių, t. y. 21 % mažesnis nei vidurkis. Tai rodo, kad organinių medžiagų kiekis yra svarbus norint padidinti medžiagos atsparumą klimatinių veiksnių poveikiui.

Iš 5.4 paveiksle pateiktų vidutinių gniuždymo įtempio atsparumo senėjimui $\sigma_{10}(AR)$ rodiklio dydžių galime matyti, kad heterogeniškos struktūros bandinių, sudarytų iš dviejų ar daugiau sluoksnių, $\sigma_{10}(AR)$ rodiklis šiek tiek didesnis (76–78 %). Nepaisant to, kad heterogeniškos struktūros bandinių apatinių sluoksnių vidutiniai tankiai (2.7 lentelė) buvo tokie patys ar net mažesni (134 kg/m^3 – bandinių MW-2.12, 140 kg/m^3 – bandinių MW-3.1) lyginant su homogeniškos struktūros (MW-1.19) bandinių vidutiniu tankiu ($150,5 \text{ kg/m}^3$).

Teigiamą viršutinio sluoksnio įtaką heterogeniškos struktūros bandiniams galima paaiškinti tuo, kad dėl klimatinių veiksnių mažėjant vienalyčiam pluoštinės struktūros tamprumui, kai mažėja susiklijavusių plaušų kiekis, būtent viršutinis sluoksnis tolygiau paskirsto gniuždymo apkrovas apatiniame sluoksnyje, taip padidindamas trinties jėgas tarp greta išsidėsčiusių ir susipynusių plaušų. Be to, kaip rodo aprašyti rezultatai, dėl viršutinio sluoksnio didesnio tankio (o todėl ir didesnio gniuždymo įtempio bei procentinės organinių medžiagų kiekio dalies) klimatinių poveikių įtaka mažiau pasireiškia heterogeniškos struktūros gaminiuose.

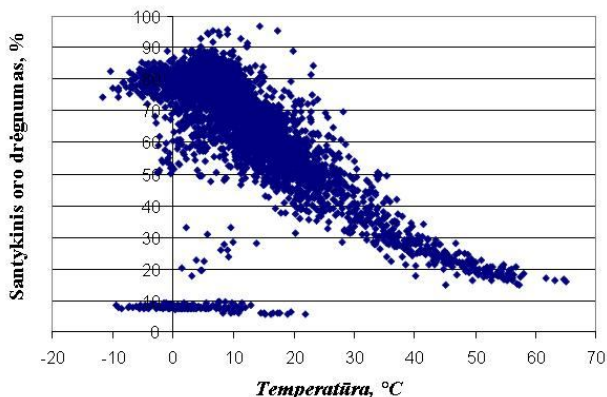
Kitų autorių nuomone (Бофров 1987a; Dimovski *et al.* 2004; Gnip *et al.* 2009), ir kiti veiksniai (be anksčiau minėtų), tokie kaip struktūros netolygumai ir defektai (sritys su mažesniu ar didesniu rišiklio kiekiu, plaušų susikirtimų skaičius, neplaušinių intarpų kiekis ir kt.) bei jų pasiskirstymo tolygumas, daro įtaką gniuždymo įtempiui. Taigi tiesiogiai ir atsparumo senėjimui $\sigma_{10}(AR)$ rodiklį lemia būtent silpniausiose vietose prasidėję senėjimo procesai, kuriuos lemia aukšta temperatūra ir drėgmės poveikis per tam tikrą laiko tarpą.

5.1.2. Klimatinių veiksnių nustatymas realiomis eksploatacijos sąlygomis

Iš ankstesnio skyriaus matome, kad aukštos temperatūros ir drėgmės poveikis neigiamai veikia mineralinės vatos gniuždymo stiprio savybes. Tačiau laboratorinėmis sąlygomis atliekamų bandymų metu tiriamoms medžiagoms sudaromos ypač nepalankios (ekstremalios) sąlygos, kurios realiai naudojant atitvarinėse konstrukcijose gali būti kitokios.

Norint objektyviai įvertinti medžiagų savybių pokyčius, vykstančius dėl klimatinių veiksnių poveikio, pirmiausia reikia žinoti, kokio dydžio tie veiksniai yra realiomis eksploatacijos sąlygomis atitinkamoje konstrukcijoje natūralioje aplinkoje.

Atlikus temperatūros ir santykinės oro drėgmės matavimus akmens vatos plokštėse, suklotose plokščiojo stogo atitvaroje, gauti rezultatai (5.5 pav.) pateikti sudarius išmatuotų temperatūros ir santykinio oro drėgnumo sklaidos diagramą, nes abu klimatiniai veiksniai (temperatūra ir drėgmė) veikia tuo pat metu.



5.5 pav. Temperatūros ir santykinio oro drėgnumo matavimų realiomis sąlygomis duomenys

Fig. 5.5. Data for measurement of temperature and relative humidity in real conditions

Iš 5.5 paveikslo matome, kad aukščiausia išmatuota temperatūra siekė +66 °C, esant santykiniam oro drėgnumui 18 %, o žemiausia temperatūra buvo –12 °C, esant 74 % dydžio santykinio oro drėgnumui. Maksimalus užfiksuotas santykinio oro drėgnumo dydis siekia beveik 100 %. Iš taškų pasiskirstymo diagramoje matome aiškią priklausomybę tarp temperatūros ir santykinio oro drėgnumo dydžių. Didėjant santykiniam oro drėgnumui, mažėja išmatuojama temperatūra, ir atvirkščiai.

Apdorojant matavimo duomenis pastebėtą ir kai kurių matavimų (ar duomenų fiksavimo) netikslumų. Pavyzdžiui, 5.5 paveikslo matyti, kad, esant santykiniam oro drėgnumui apie 10 %, užfiksuota nemažai matavimų nuo –10 iki +10 °C temperatūroje. Šie įrašai buvo traktuoti kaip klaidos, todėl atmesti bei į analizę neįtraukti.

Matavimų rezultatai rodo, kad nenustatytas klimatinių veiksnių derinys, kai vienu metu veikia aukšta temperatūra ir didelis santykinis oro drėgnumas. Paprastai esant didesniai drėgnumui temperatūra yra taip pat kur kas žemesnė. Dauguma matavimo metu išmatuotų dydžių svyruoja apie +25 °C temperatūrą, esant 50 % santykiniam oro drėgnumui. Tai praktiškai atitinka normalias (laboratorines) bandymo sąlygas (LST EN 13162:2009).

5.4 lentelėje pateikiama matavimų laikų trukmės suvestinė, kai abiejų veiksnių poveikis viršijo normalias ($T = +23\text{ }^{\circ}\text{C}$ ir $RH = 50\%$) bandymo sąlygas.

5.4 lentelė. Matavimo laikų trukmės suma, kai temperatūra ir santykinis oro drėgnumas viršijo normalias ($T = +23\text{ }^{\circ}\text{C}$ ir $RH = 50\%$) bandymo sąlygas

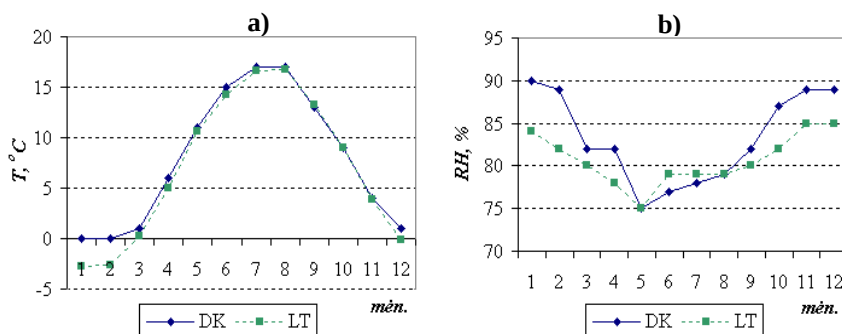
Table 5.4. Total duration of measurements time when temperature and humidity exceeded normal ($T = +23\text{ }^{\circ}\text{C}$ ir $RH = 50\%$) testing conditions

Temperatūra daugiau nei, $^{\circ}\text{C}$	Santykinis oro drėgnumas daugiau nei, %	Matavimo laikų trukmės suma (h), kai T ir RH poveikis viršijo normalias bandymo sąlygas	
		viršutinėje plokštės dalyje	apatinėje plokštės dalyje
25	50	37	180
25	60	8	25
25	70	1	1
25	80	0	0
25	90	0	0
30	50	2	65
30	60	0	1
30	70	0	0
30	80	0	0
35	50	0	8
35	60	0	0
35	70	0	0
40	50	0	0

Iš 5.4 lentelėje pateiktų rezultatų matyti, kad ilgiausias (180 valandų) klimatinio veiksnio poveikis termoizoliaciniame sluoksnyje buvo išmatuotas apatinėje plokštės dalyje, kai temperatūra $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$, o santykinis oro drėgnumas – 50% . Kitas pagal trukmę reikšmingas poveikių derinys (kai viršyta $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūra ir santykinis oro drėgnumas 50%) buvo gerokai trumpesnis (65 valandos).

Siekiant susieti temperatūros ir santykinio oro drėgnumo matavimų duomenis, gautus Danijoje, su Lietuvos klimatinėmis sąlygomis, buvo palyginti vidutinių metinių temperatūrų ir santykinio oro drėgnumo dydžiai (5.6 pav.).

Kadangi natūrinių matavimų vietovėje (55° šiaurės platumą) vyrauja jūrinis klimato tipas, tai palyginimui imame Vakarų Lietuvos (pajūrio) klimatinis duomenis Klaipėdos miestui iš RSN 156-94 (1995). Tuo labiau kad Klaipėdos miestas taip pat yra išsidėstęs 55° šiaurės platumos lygiagretyje.



5.6 pav. Vidutiniai metiniai klimatiniai veiksniai Danijoje (DK) (Euroweather 2010) ir Lietuvoje (LT) (RSN 156-94:1995):
a – temperatūros; b – santykinio oro drėgnumo

Fig. 5.6. Average annual values of climatic factors in Denmark (DK) (Euroweather 2010) and Lithuania (LT) (RSN 156-94 1995):
a – temperature; b – relative humidity

Palyginus 5.6 paveiksle pateiktus išmatuotų ilgamečių vidutinių metinių temperatūros ir santykinio oro drėgnumo dydžius matome, kad Vakarų Lietuvos pajūrio zonos vidutinės temperatūros praktiškai sutampa su vietovei (kurioje buvo atliekami natūriniai bandymai) išmatuotomis vidutinėmis temperatūromis (išskyrus tai, kad žiemos mėnesiais Klaipėdoje būna kiek žemesnė temperatūra). Metiniai santykinio oro drėgnumo dydžiai Danijos klimatinėmis sąlygomis šiek tiek didesni nei Klaipėdoje (išskyrus vasaros mėnesius).

Todėl galima manyti, kad visoje Lietuvos teritorijoje (jūrinio ir žemyninio klimato zonose) realiomis sąlygomis plokščiojo stogo konstrukcijose klimatiniai veiksniai derinys (temperatūra ir drėgmė) neturėtų būti aukštesnis, kaip pavaizduota 5.5 paveiksle. Bendra trukmė, kai temperatūra ir drėgmė viršija normalias bandymo sąlygas (5.4 lentelė), ko gero, bus dar trumpesnė.

5.1.3. Mineralinės vatos plokščių, naudotų natūrinuose eksperimentuose, gniuždymo įtempio nustatymas

Mineralinės vatos plokštės jau seniai naudojamos kaip termoizoliacinis sluoksnis plokščiojo stogo atitvarinėse konstrukcijose. Todėl, siekiant nustatyti galimus gniuždymo įtempio dydžių pokyčius dėl klimatiniai veiksniai poveikio, atlikti natūriniai bandymai, kurių metu tirti bandiniai išimti iš apie 100 m² ploto eksploatuojamo stogo konstrukcijos (5.7 pav.).

Tirtos dviejų tipų skirtingos struktūros akmens vatos plokštės (detaliau bandiniai ir jų charakteristikos aprašytos 2.2 poskyrio 2.7 lentelėje), eksploatuotos apie 15 metų. Bandiniai MW-1.20 buvo pagaminti ir sukloti prieš 179 mėnesius, o bandiniai MW-2.13 – prieš 162 mėnesius iki šių bandymų.



5.7 pav. Akmens vatos plokštės eksploatuojamo plokščiojo stogo konstrukcijoje: a – plokštės bandinių išėmimo metu; b – bandymo poligonas

Fig. 5.7. Stone wool slabs in the low-slope roof structure currently in use: a – at the time of taking the test specimens; b – the testing site

Tyrimų metu pagal standartizuotą metodiką (2.1 poskyris) nustatytas: bandinių tankis, organinių medžiagų kiekis, pradinės deformacijos atskaitos taškas, gniuždymo įtempis, esant 10 % deformacijai, bei gniuždymo įtempio atsparumo senėjimui rodiklis (5.5 lentelė). Šiuo atveju šis rodiklis parodo bandinių gniuždymo įtempio dydžių pokyčius, nulemtus klimatinį veiksnių realaus naudojimo metu lyginant su naujai pagaminto gaminio atitinkamu dydžiu. Šioje lentelėje pateikti anksčiau atliktų tarpinių bandymų rezultatai.

Kaip matyti iš rezultatų, pateiktų 5.5 lentelėje, bandinių tankiai ir organinių medžiagų kiekiai skiriasi nedaug ir tie pokyčiai greičiausiai paaiškinami natūralia dydžių sklaida dėl gamybos ypatumų (Širop *et al.* 2008). Tačiau aiškiai matome, kad eksploatacijos metu nedaug, bet kinta (didėja) pradinės deformacijos atskaitos taško (N_0) dydis. Tai rodo pradinės deformacijos didėjimą, kurią lemia silpnėjantys tarpplaušiniai yšiai struktūroje dėl organinės rišamosios medžiagos brinkimo ir (arba) neorganinių (mineralinių medžiagų) hidrolizės per ilgą eksploatacijos laiko tarpą.

Abiejų bandinių tipų gniuždymo įtempio, esant 10 % deformacijai, vidurkiai ir jų vidutinių standartinių nuokrypių dydžiai pateikiami 5.8 paveiksle.

5.5 lentelė. Bandinių tankio, pradinės deformacijos atskaitos taško, gniuždymo įtempio, esant 10 % deformacijai, ir organinių medžiagų kiekio vidutiniai dydžiai

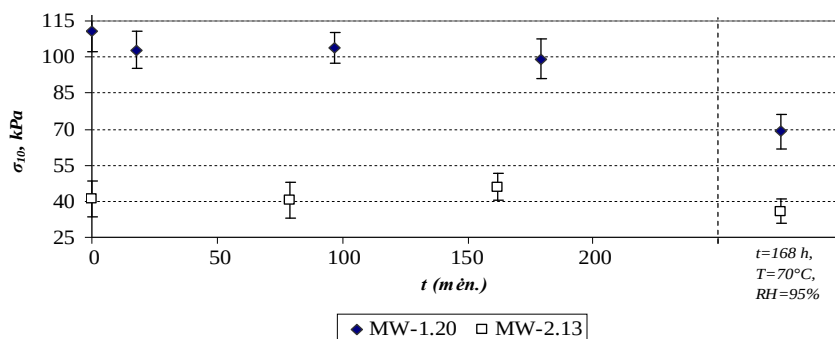
Table 5.5. The average values of density, initial deformation reference point, compression stress at 10% deformation and organic material content

Bandymai ir jų trukmė	Tankis ρ , kg/m ³	Pradinės deforma- cijos atskaitos taškas N_0 , mm	Gniuždymo įtempis, esant 10 % deforma- cijai, σ_{10} , kPa	Organinių medžiagų kiekis M , %	Gniuždymo įtempio atsparumo senėjimui rodiklis $\sigma_{10}(AR)$, %
MW-1.20 tipo bandiniai					
Natūriniai bandymai po 18 mėn. eksploatacijos	$\frac{171}{168}$	$\frac{1,0}{0,9}$	$\frac{103}{111}$	$\frac{3,87}{3,98}$	93
Tas pats po 97 mėn.	$\frac{168}{168}$	$\frac{1,1}{0,9}$	$\frac{104}{111}$	$\frac{3,87}{3,98}$	94
Tas pats po 179 mėn.	$\frac{168}{168}$	$\frac{1,3}{0,9}$	$\frac{99,2}{111}$	$\frac{4,14}{3,98}$	89
Atlikus klimatinį sendinimą laboratorijoje ¹⁾	$\frac{168}{168}$	–	$\frac{69,0}{111}$	–	62
MW-2.13 tipo bandiniai					
Natūriniai bandymai po 79 mėn. eksploatacijos	$\frac{131}{137}$	$\frac{1,2}{1,0}$	$\frac{40,5}{40,9}$	$\frac{4,76}{4,69}$	99
Tas pats po 162 mėn.	$\frac{139}{137}$	$\frac{1,3}{1,0}$	$\frac{46,0}{40,9}$	$\frac{4,63}{4,69}$	113
Atlikus klimatinį sendinimą laboratorijoje ¹⁾	$\frac{137}{137}$	–	$\frac{35,9}{40,9}$	–	88

Pastaba. Skaitiklyje pateikiami rezultatai gauti išbandžius bandinius po tam tikro laiko eksploatacijos realiomis sąlygomis, o vardiklyje išmatuoti nesendinto bandinio dydžiai

¹⁾ Bandymai po 168 valandų išlaikymo +70 °C temperatūroje ir 95 % drėgmėje (detaliau metodas aprašytas 2.1.5 skirsnyje).

Iš 5.8 paveikslo matome palyginti nedidelį buvusių gaminių gniuždymo įtempio dydžių sumažėjimą per 15 metų laikotarpį realiomis eksploataavimo sąlygomis, lyginant su pradiniu (naujai pagamintam gaminiui) išmatuotu dydžiu. Po 18–97 mėnesių eksploatacijos nustatyti vidutiniškai 6–7 % mažesni MW-1.20 tipo (homogeniškos struktūros) bandinių σ_{10} dydžiai (išmatuotas sumažėjimas nuo 111 kPa iki 103 kPa dydžio). Po 179 mėnesių σ_{10} sumažėjimas siekė 10,6 % (nuo 111 kPa iki 99,2 kPa).



5.8 pav. Gniuždymo įtempio, esant 10 % deformacijai, vidurkiai ir jų vidutinių standartinių nuokrypių pokyčiai priklausomai nuo natūrinių eksperimentų trukmės ir laboratorinėmis sąlygomis

Fig. 5.8. Changes in the values of compression stress at 10% deformation and in their average standard deviations depending on the duration of natural experiments and in laboratory conditions

Kito tipo MW-2.13 (heterogeniškos struktūros) bandinių po 79 mėnesių naudojimo σ_{10} praktiškai nepakito (vidutinių dydžių sumažėjimas $<1\%$). MW-2.13 bandinius išbandžius po 162 mėnesių eksploatacijos, išmatuoti netgi 11 % didesni vidutiniai σ_{10} dydžiai, palyginti su pradiniu bandinių gniuždymo įtempio (46 kPa, o buvo 40,9 kPa). Tokį rezultatą galėjo lemti pluoštinės struktūros netolygumai ir tankio nuokrypiai gamybos technologinio proceso metu. Tuo labiau kad bandymams buvo paimitos plokštės atsitiktinės atrankos būdu (prieš tai neatrenkant ar rūšiuojant). Tai iš dalies patvirtina ir išmatuota didesnė bandinių tankio variacija (10,4 %).

Palyginus abiejų tipų bandinių laboratorinius klimatinio sendinimo bandymų rezultatus matoma, kad homogeniškos struktūros plokščių (bandiniai MW-1.20) gniuždymo įtempis, esant 10 % deformacijai, vidutiniškai sumažėjo 37,8 % (nuo 111 kPa iki 69 kPa), o heterogeniškos struktūros dvitankių plokščių (bandiniai MW-2.13) – tik 12,2 % (atitinkamai vietoj 40,9 kPa buvo 35,9 kPa). Dar, be struktūros įtakos, nereikia pamiršti ir organinių medžiagų kiekių (šiuo atveju MW-2.13 tipo bandiniuose išmatuotas beveik 18 % didesnis jų kiekis).

Apskaičiuoti gniuždymo įtempio atsparumo senėjimui rodikliai (5.6 lentelė) rodo, kad akmens vatos bandinių po 15 metų eksploatacijos (natūrinėmis sąlygomis) vidutinis gniuždymo įtempio, esant 10 % deformacijai, atsparumo senėjimui rodiklis $\sigma_{10}(AR)$ siekė 93–99 %, palyginti su prieš bandymus buvusiais vidutiniais dydžiais. Heterogeniškos struktūros MW-2.13 bandinių $\sigma_{10}(AR)$ rodiklio dydis didesnis lyginant su homogeniškos struktūros MW-1.20 bandiniais (o tai patvirtina ir ankstesniame 5.1.1 skirsnyje gautus rezultatus).

Apibendrinus tyrimų rezultatus matoma, kad realiomis eksploatacijos sąlygomis apie 15 metų naudotų akmens vatos plokščių gniuždymo įtempio, esant 10 % deformacijai, dydžiai sumažėjo nedaug (apie 10 %). Rezultatai rodo, kad heterogeniškos struktūros (nors ir mažesnio vidutinio tankio) plokštės pasižymi šiek tiek geresnėmis gniuždymo įtempio, esant 10 % deformacijai savybėmis (lyginant likutinius σ_{10} dydžius su pradiniais) nei homogeniškos struktūros plokštės.

5.2. Dinaminių apkrovų poveikis mineralinės vatos plokščių sutelktosios apkrovos dydžiams

Termoizoliacinių medžiagų sutelktoji apkrova nustatoma imituojant tiesioginės apkrovos (veikiančios nedideliame paviršiaus plote) poveikį, susidarantį gaminį montuojant ar eksploatuojant. Tačiau paprastai bandymai atliekami su neeksploatuotais (naujais) gaminiais.



5.9 pav. Termoizoliacinė medžiaga po vaikščiojimo ant jos klojimo metu
Fig. 5.9. Thermal insulation material after the impact of pedestrian traffic during installation

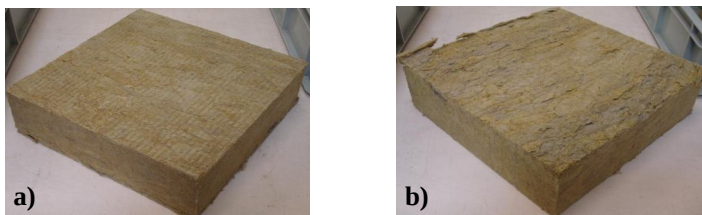
5.9 paveiksle matoma, kaip atrodo termoizoliacinė medžiaga po daugkartinio vaikščiojimo ant jos įrengimo metu, todėl svarbu nustatyti sutelktosios apkrovos pokyčius veikiant kartotinėms apkrovoms ir apskaičiuoti medžiagos atsparumą dinaminei apkrovai.

5.2.1. Mineralinės vatos plokščių sutelktosios apkrovos pokyčiai dėl dinaminės apkrovos poveikio

Eksperimentiniuose tyrimuose buvo naudotos plokštės, turinčios skirtingus gniuždymo įtempio, esant 10 % deformacijai (σ_{10}), ir sutelktosios apkrovos (F_5) deklaruojamus dydžius (detaliai bandiniai aprašyti 2.7 lentelėje).

Bandymo metu kiekvieno bandinio paviršius 16 metalinių puansonų (kurių kiekvieno skersmuo – 79,8 mm) buvo veikiamas 73,6 kg kartotine jėga kas 2 sekundes 60 kartų. Naudota bandymų įranga, jos veikimas ir bandymo eiga aprašyta 2.1.6 skirsnyje.

Vizualiai palyginus bandinius prieš (5.10 pav., a) ir po (5.10 pav., b) dinaminės apkrovos poveikio (dinaminio varginimo) bandymų aiškiai matyti pluoštinės struktūros pokyčiai gaminio paviršiuje, atsiradę dėl cikliškų apkrovų. Ryškiausi struktūros pažeidimai užfiksuoti MW-1.21 bandiniuose. Pažeidimus lėmė gaminių tankis, sutelktosios apkrovos dydis ir organinių medžiagų kiekis, nes būtent MW-1.21 bandinių šie dydžiai buvo mažiausi (2.7 lentelė), palyginti su kitų (MW-1.22 ir MW-3.2) tipų bandiniais.

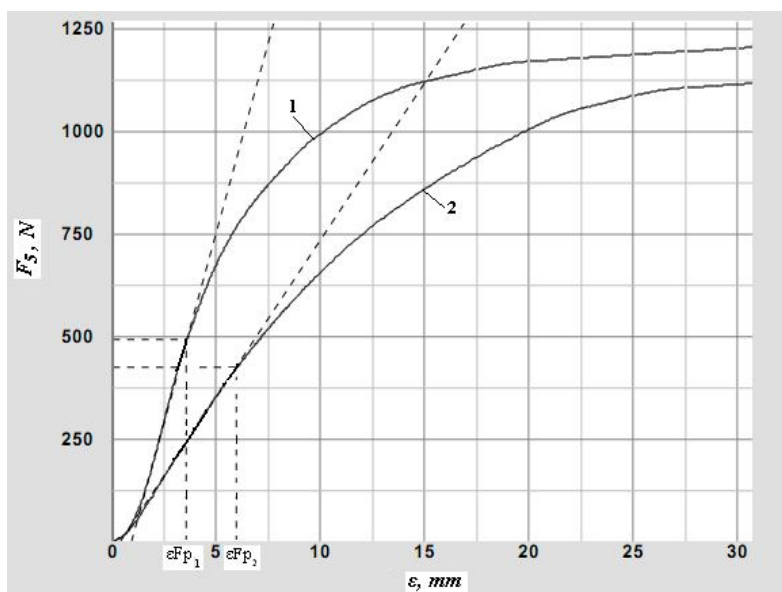


5.10 pav. MW-1.21/25 bandinio paviršius: a – prieš bandymą;
b – po dinaminės apkrovos bandymo

Fig. 5.10. Surface of MW-1.21/25 test specimen: a – before test;
b – after dynamic load test

Bandinio paviršiaus struktūros suirimą aiškiai parodo ir jėgos bei deformacijos kreivės (5.11 pav.), užrašytos sutelktosios apkrovos bandymų metu MW-1.21 tipo bandiniams Nr. 25 ir 25A. Iš 5.11 paveikslo matyti, kad labai skiriasi kreivių forma: 1 kreivė užrašyta bandiniui, kurio dinaminis varginimas nebuvo atliekamas, o 2 kreivė – bandiniui po dinaminio varginimo. Kreivės formos pobūdis rodo, kad bandiniai, veikiant sutelktajai, apkrovai deformuojasi skirtingai. Bandymų metu 1 kreivė pradiniam gniuždymo etape statesnė (jėga labai didėja apkrovimo pradžioje), o nuo pat apkrovimo pradžios mechanškai nepažeisto bandinio paviršius tankėja palaipsniui, perimdamas veikiančias pradines gniuždymo apkrovas. Tik bandiniui pasiekus kritinę deformaciją taške (ϵF_{p1}) užfiksuotas didesnis kreivės palinkimas ir matomas mažesnis jėgos didėjimas, lyginant su deformacija. 2 kreivė rodo, kad jėga nuo pat pradžių didėjo lėtai, esant gana didelei deformacijai visą gniuždymo laiką. Dėl cikliškų apkrovų suardyto bandinio paviršiaus deformacijos augo sparčiau. Skiriasi bandinių deformacija ir kritiniame taške (ϵF_p), kuriame baigiasi proporcingas stiprumo ir deformacijos didėjimas bei matomas deformacijų augimas. Pirmiau aprašytam bandiniui išmatuota, kad 1 kreivei taškas

$\varepsilon F_{p1} = 3,6$ mm, o 2 krevei $\varepsilon F_{p2} = 6,0$ mm, o sutelktosios apkrovos (F_5) dydžiai sumažėjo nuo 677 N iki 356 N (t. y. sumažėjimas beveik 47 %, palyginti su pradiniu dydžiu). Taip pat dėl paviršiaus struktūros pažeidimų 1,4 % mažėjo bandinio storis, todėl ir apskaičiuotas padidėjęs tankis (132–134 kg/m³).



5.11 pav. Apkrovos ir deformacijos kreivės: 1 – MW-1.21/25 bandinio prieš bandymą; 2 – MW-1.21/25A bandinio po dinaminės apkrovos bandymo

Fig. 5.11. Load-deformation curves: 1 – before test for test specimen MW-1.21/25; 2 – after dynamic load test for test specimen MW-1.21/25A

Po dinaminės apkrovos bandymo mažiau paviršiaus struktūros pažeidimų matyti ir MW-3.2 ir MW-1.22 tipų bandiniuose. Skirtingas pažeidimų laipsnis gali būtų aiškinamas tuo, kad heterogeniškos struktūros (MW-3.2) bandinį sudarytą iš dviejų ar daugiau skirtingo tankio sluoksnių, veikiant dinamine apkrova, didžiausios jėgos veikia paviršinį – tankesnį (turintį didesnę sutelktąją apkrovą) sluoksnį, kuris sugeba perimti ir paskirstyti paviršiuje veikiančią gniuždymo apkrovą palaipsniui – mažesnio tankio sluoksniui gerokai didesniame plote (per visą gaminio storį). MW-1.22 bandiniai buvo homogeniškos struktūros, didesnio tankio (vidutiniškai 177 kg/m³) bei turintys didelius pradinius (2.7 lentelė) gniuždymo rodiklius: sutelktoji apkrova, esant 5 mm deformacijos, ≥ 1000 N ir gniuždymo įtempis, esant 10 % deformacijai, ≥ 90 kPa, todėl šie bandiniai buvo atsparesni dinaminiam varginimui nei MW-1.21.

Ekspperimentų metu gautų rezultatų vidutiniai dydžiai pateikti 5.6 lentelėje, o sutelktosios apkrovos dydžių pasiskirstymas – 5.12 paveiksle.

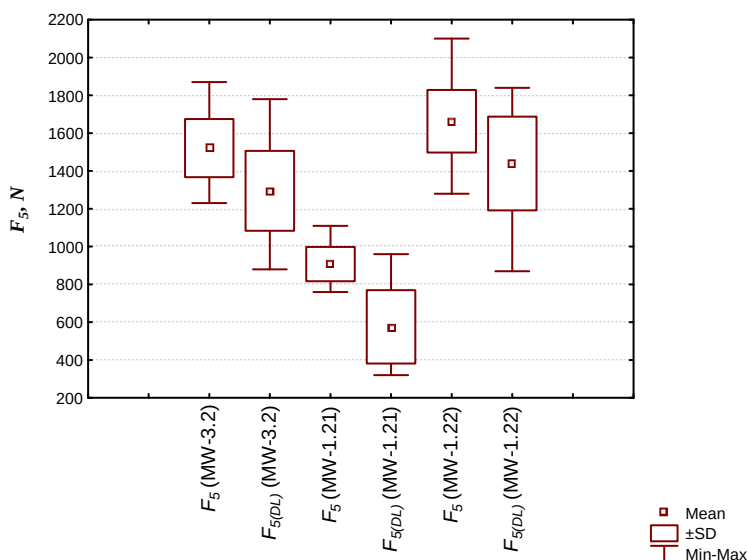
5.6 lentelė. Bandinių (prieš ir po dinaminio varginimo bandymų) tankio, sutelktosios apkrovos ir organinių medžiagų kiekio išmatuoti vidutiniai dydžiai
Table 5.6. The average values of density, point load and organic material content of test specimens (before and after dynamic fatigue tests)

Bandiniai	Prieš dinaminį varginimą			Po dinaminio varginimo bandymų	
	tankis ρ , kg/m ³	sutelktoji apkrova, esant 5 mm deformacijai, F_5 , N	organinių medžiagų kiekis M , %	tankis $\rho_{(DL)}$, kg/m ³	sutelktoji apkrova, esant 5 mm deformacijai, $F_{5(DL)}$, N
MW-1.21	154,6	911,6	3,42	159,5	580,0
MW-1.22	180,2	1660,0	3,96	177,4	1440,6
MW-3.2	163,3	1520,9	3,76	163,5	1300,2

Po dinaminio apkrovos poveikio bandymų matomi nedideli tankio pokyčiai (5.6 lentelė), iš kurių daugiausia 3,8 % padidėjo MW-1.21 bandinių vidutinis tankis, o kitų dviejų tipų bandinių ρ pokyčiai buvo 0,12–1,5 %. Vidutiniai standartiniai tankio nuokrypiai kito skirtingai. MW-3.2 ir MW-1.22 bandinių jie beveik nepakito (nedideli pokyčiai 0,3–1,99 %), bet MW-1.21 bandinių padidėjo 42,8 % (nuo $\pm 11,0$ iki $\pm 15,8$ kg/m³). Šie tankio pokyčiai po dinaminio varginimo bandymų atsirado dėl paviršiaus vientisumo ir struktūros stiprumo praradimo, dėl to išmatuotas mažesnis bandinių storis.

Kaip ir buvo tikėtasi bei tai aiškiai matyti iš 5.12 paveiksle pateikiamų rezultatų, cikliška apkrova neigiamai veikia bandinių stiprumo savybes, nes po dinaminio varginimo bandinių sutelktosios apkrovos dydžiai sumažėjo visų tipų bandiniams. Daugiausiai sutelktoji apkrova pakito MW-1.21 bandinių, turėjusių mažiausią tankį ir mažiausią deklaruojamąjį sutelktosios apkrovos dydį. Šių bandinių sutelktosios apkrovos ($F_{5(DL)}$) dydis po dinaminio varginimo vidutiniškai sumažėjo beveik du kartus (nuo 911,6 N iki 580,0 N), lyginant su sutelktosios apkrovos (F_5) dydžiu, išmatuotu bandiniams, kurių dinaminis varginimas nebuvo atliktas. Be to, šio tipo bandiniams išmatuota ir plačiausia $F_{5(DL)}$ dydžių sklaida (mažiausias rezultatas – 320,4 N, didžiausias – 960,1 N). MW-1.22 ir MW-3.2 tipo bandinių $F_{5(DL)}$ vidutiniškai sumažėjo apie 15–16 %, atitinkamai MW-1.21 bandinių – nuo 1660,0 N iki 1440,6 N, o MW-3.2 – nuo 1520,9 N iki 1300,2 N. Didelis rezultatų pokytis po cikliška veikiančių apkrovų poveikio parodo akmens vatos pluošto struktūrinį nevienalytiškumą.

Tiriamųjų rodiklių tarpusavio ryšio stiprumas buvo įvertintas pagal daugialypės koreliacijos koeficiento skaitinius dydžius, kuo šis koeficientas artimesnis vienetui, tuo ryšys tarp rodiklių yra stipresnis.



5.12 pav. Sutelktosios apkrovos (prieš ir po dinaminio varginimo) eksperimentinių rezultatų pasiskirstymas

Fig. 5.12. Spread of experimental results of point load (before and after dynamic fatigue tests)

Eksperimentiniams duomenims aprašyti buvo pasirinktas tiesinis matematinis modelis, nes jis atitiko duomenų pasiskirstymo pobūdį ir jo koreliacijos bei determinacijos koeficientai buvo artimi vienetui. Pirmiausia buvo sudarytos empirinės lygtys, rodančios, kas nulemia bandinių sutelktosios apkrovos dydžius prieš dinaminį varginimą ir po to (5.7 lentelė).

5.7 lentelė. ρ , M , d įtakos tiriamiesiems rodikliams F_5 ir $F_{5(DL)}$ priklausomybės empirinės lygtys

Table 5.7. The empirical dependency equations of the impact of parameters ρ , M , and d on F_5 and $F_{5(DL)}$

Lygtis	Tiriamas rodiklis	Empirinė lygtis
5.3	F_5	$F_5 = -2530,21 + 14,91 \cdot \rho + 6,56 \cdot d + 210,63 \cdot M$
5.4	$F_{5(DL)}$	$F_{5(DL)} = -242,99 + 1,15 \cdot F_5 + 0,99 \cdot \rho - 0,94 \cdot d - 78,98 \cdot M$

Empirinių lygčių 5.3 ir 5.4 daugialypės koreliacijos ir determinacijos koeficientai, vidutinis standartinis nuokrypis bei Stjudento kriterijaus reikšmės

pateikiamos 5.8 lentelėje. Sudarytų (5.3, 5.4) lygčių daugialypės koreliacijos koeficientai (5.8 lentelė) rodo, kad ryšys tarp nagrinėjamų rodiklių yra stiprus, o determinacijos koeficientai didesni už 0,7, todėl matematinis modelis yra parinktas teisingai.

5.8 lentelė. 5.3, 5.4 empirinių lygčių daugialypiai koreliacijos R ir determinacijos R^2 koeficientai, vidutinio standartinio nuokrypio s_e bei Stjudento kriterijaus reikšmės

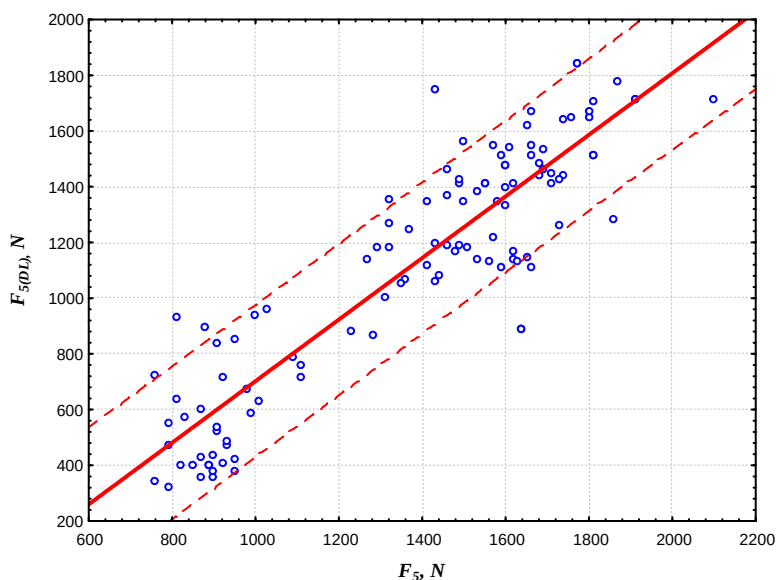
Table 5.8. The multiple correlation (R) and determination (R^2) coefficients, average standard deviation (s_e), and Student's criterion values for the empirical equations 5.3 and 5.4

Lygtis	Tiriama savybė	R	R^2	s_e	Stjudento kriterijaus reikšmės			
					F_5	ρ	d	M
5.3	F_5	0,8633	0,7452	181	–	12,98	9,73	1,63
5.4	$F_{5(DL)}$	0,9089	0,8262	184	11,88	0,54	1,01	1,45

Empirinėje lygtyje (5.3) pavaizduota, kaip bandinių sutelktosios apkrovos dydį veikia tankis (ρ), storis (d) ir organinių medžiagų kiekis (M). Iš empirinės (5.3) lygties ženklų matyti, kad kuo didesni kintamųjų rodiklių dydžiai, tuo didesnis bus išmatuojamas ir tiriamosios savybės dydis. F_5 labiausiai veikia tankis, nes jo Stjudento kriterijus didžiausias (12,98), todėl bandinių, turėjusių didžiausią tankį, išmatuotas ir didžiausias sutelktosios apkrovos dydis (5.6 lentelė). Taip atsitinka todėl, kad kuo medžiaga tankesnė, tuo didesnis bandinio stiprumas ir pasipriešinimas išoriniam gniuždymui. Bandinio storis teigiamai veikia sutelktosios apkrovos dydžiui (t. y. Stjudento kriterijaus reikšmė yra reikšminė (9,73) ir daug didesnė už statistinėje lentelėje pateikiamą (1,96) jo dydį (5.8 lentelė). Tai paaiškinama tuo, kad gniuždymo bandymas atliekamas iki 5 mm deformacijos (nepriklausomai nuo bandinio storio), todėl plonuose bandiniuose ši deformacija bus palyginti didesnė nei storesniuose bandiniuose. Organinių medžiagų kiekis reikšminės lemiamos įtakos neturi, bet iš lygties ženklo matome, kad teigiamai veikia sutelktąją apkrovą. Nes didesnis rišamosios medžiagos kiekis padidina susiklijavusių plaušų skaičių plote. Šiuo atveju nuo paviršiuje esančių plaušų kiekio ir bandinio storio priklauso F_5 dydis.

Empirinės (5.4) lygties kintamųjų Stjudento kriterijaus reikšmės rodo, kad sutelktosios apkrovos po dinaminio varginimo dydį lemia tik pradinė sutelktoji apkrova (F_5) (Stjudento kriterijaus reikšmė 11,88), buvusi prieš bandymą (5.8 lentelė). Tai galima paaiškinti itin stipriu ir reikšminiu (Stjudento kriterijaus dydis 11,88) ryšiu tarp sutelktosios apkrovos dydžių prieš ir po dinaminio varginimo bandymų. Taigi kuo didesnė pradinė sutelktoji apkrova, tuo didesnė išmatuojama ir $F_{5(DL)}$. Taip pat pažymėtina (5.4 lygtis iš 5.7 lentelės), kad pradinius F_5 dydžius lemia ρ , d , o po dinaminio varginimo bandymų jie atskirai tampa nereikšmingi (Stjudento kriterijaus reikšmės 0,54–1,45 (5.8 lentelė)) dėl bandinių struktūros vientisumo pažeidimo.

Nustačius, kad sutelktosios apkrovos (po dinaminio bandymo) dydis tiesiogiai priklauso nuo sutelktosios apkrovos (prieš dinaminį varginimą), šių savybių tarpusavio priklausomybė pavaizduota grafiškai (5.13 pav.), o gautai regresinei tiesei buvo apskaičiuota: supaprastinta empirinė lygtis (5.5), koreliacijos ir determinacijos koeficientai bei vidutinis standartinis nuokrypis. Šie rodikliai apibūdina tiriamų verčių tiesiškumo laipsnį ir ryšio stiprumą.



5.13 pav. Sutelktosios apkrovos (prieš ir po dinaminio varginimo) tarpusavio priklausomybės regresinė tiesė

Fig. 5.13. Linear regression curve of functional relation between point load before and after dynamic fatigue test

Empirinė lygtis (5.5) leidžia apskaičiuoti sutelktąją apkrovą po dinaminio varginimo $F_{5(DL)}$ žinant pradinę sutelktosios apkrovos dydį F_5 .

$$F_{5(DL)} = -403,09 + F_5 \cdot 1,11. \quad (5.5)$$

Lygties (5.5) koreliacijos $R = 0,9033$ ir determinacijos $R^2 = 0,8159$ koeficientai artimi vienetui, todėl galima teigti, kad parinktas matematinis modelis yra adekvatus ir tarp nagrinėjamų rodiklių yra stiprus bei reikšminis ryšys (nes Stjudento kriterijus 22,28), o vidutinis standartinis nuokrypis $s_e = 186$ N.

Palyginus empirinių 5.4 ir 5.5 lygčių koreliacijos ir determinacijos koeficientus, vidutinius standartinius nuokrypius matyti, kad dydžiai skiriasi nedaug, todėl rezultatai, apskaičiuoti pagal sudarytą supaprastintą (5.5) empirinę lygtį, mažai skirsis (5.8 lentelė). Kadangi determinacijos koeficientas $R^2 = 0,8159$, tai $F_{5(DL)}$ vidutiniškai 81,59 % priklauso nuo gaminio sutelktosios apkrovos dydžio ir 18,41 % – nuo kitų veiksnių (struktūros, nevienalytiškumo laipsnio ir kt.).

Sutelktosios apkrovos dydžių pokyčiai po dinaminio varginimo gali būti paaiškinami tuo, kad dėl intensyvių cikliškai veikiančių dinaminų apkrovų visų tipų akmens vatos plokščių paviršius suiro. Buvo pažeistas akmens vatos (kaip kompozito, sudaryto iš plaušų ir rišamosios medžiagos, jungiančios tuos plaušus jų susikirtimo vietose) erdvinės matricos tamprumas ir pastovumas.

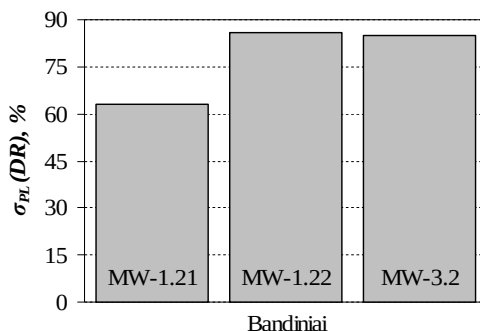
Dėl daugkartinės kartotinės koncentruotos apkrovos poveikio bandinio paviršiuje išsidėstę kompozito elementai (t. y. greta esantys ar chaotiškai išsidėstę susikertantys plaušai, rišikliu suklijuoti jų kontaktų vietose) netenka pirminio struktūrinio vientisumo. Vientisumo ir tamprumo praradimas pasireiškia standžių ir (arba) lanksčių tarpplaušinių ryšių (jų suklijavimo vietose) nutrūkimu, plaušų lūžimu bei erdviniu susigrupavimu dėl ciklinio gniuždymo.

Pašalinus apkrovą, tamprieji plaušai iš dalies grįžta į pradinę būseną, bet dėl negrįžtamų struktūros pokyčių bandinys (ypač jo paviršius, kuris buvo tiesiogiai veikiamas dinaminų apkrovų) pažeidžiamas. Dėl įtempių koncentracijos ir plastinių deformacijų paviršiuje atsirado liekamųjų deformacijų, nes struktūra neatgauna pradinių matmenų ir stiprumo. Tai matyti ir iš tankio pokyčio (jo padidėjimo) mažiausią tankį ir mažiausius deklaruojamus dydžius turinčių bandinių (MW-1.21) rezultatų (5.6 lentelė). Šių bandinių tankis padidėjo dėl to, kad jų paviršius buvo visiškai suardytas, todėl ir buvo išmatuotas mažesnis bandinių storis (po dinaminio varginimo). Tai mažiau pasireiškė su didesnio tankio ir didesnę deklaruojamąją sutelktąją apkrovą turinčiais bandiniais (MW-3.2 ir MW-1.22).

Skirtingo tipo bandinių atsparumas dinaminiam varginimui išreikštas naudojantis sutelktosios apkrovos dinaminio atsparumo $\sigma_{PL}(DR)$ rodikliu, kuris rodo procentinę sutelktosios apkrovos ($F_{5(DL)}$) dydžio pokytį po dinaminio varginimo, lyginant su sutelktosios apkrovos dydžiu be dinaminio varginimo (F_5). Apskaičiuotas sutelktosios apkrovos dinaminio atsparumo $\sigma_{PL}(DR)$ rodiklis skiriasi priklausomai nuo bandymuose naudotų bandinių tankio ir jų deklaruojamų gniuždymo rodiklių.

Mažiausias $\sigma_{PL}(DR)$ rodiklis apskaičiuotas MW-1.21 tipo bandinių ir vidutiniškai sudaro tik 63 % prieš bandymą buvusios sutelktosios apkrovos, o apskaičiuotas vidutinis standartinis nuokrypis (s) taip pat gana didelis, nes siekia apie 32,15 %.

Kitų dviejų bandinių tipų MW-1.22 ir MW-3.2 apskaičiuoti sutelktosios apkrovos dinaminio atsparumo $\sigma_{PL}(DR)$ rodikliai buvo panašūs: 86 % ir 85 % (5.14 pav.), o abiejų bandinių tipų vidutiniai standartiniai nuokrypiai (s) svyruoja 13,57–13,76 %. Tokie dideli skirtumai gali būti aiškinami erdvinės pluoštinės struktūros netolygumų ar defektų įtaka dėl nedideliame plote veikiančios koncentruotos apkrovos.



5.14 pav. Skirtingų tipų bandinių sutelktosios apkrovos dinaminio atsparumo $\sigma_{PL}(DR)$ rodikliai

Fig. 5.14. Values of point load dynamic resistance $\sigma_{PL}(DR)$ for different types of test specimens

Atliktų tyrimų rezultatai patvirtina, kad mažesnio vidutinio tankio, bet heterogeniškos struktūros akmens vatos plokštės (sudarytos iš skirtingo tankio dviejų ir daugiau sluoksnių) pasižymi tokiu pačiu atsparumu dinaminės apkrovos poveikiui, kaip ir homogeniškos struktūros, bet didesnio tankio plokštės. Heterogeniškos struktūros gaminių viršutinis tankesnis sluoksnis perima paviršiuje veikiančią ciklinę koncentruotą jėgą ir paverčia ją didesniame plote veikiančia apkrova (Радченко, Радченко 2005).

Sutelktosios apkrovos pokyčiai (sumažėjimas 1,4–2,1 karto) po dinaminio varginimo bandymų laboratorinėmis sąlygomis rodo, kad dinaminės apkrovos daro poveikį medžiagų savybėms.

5.2.2. Mineralinės vatos plokščių, naudotų natūriniuose eksperimentuose, sutelktosios apkrovos nustatymas

Įrengiant ir (arba) naudojant plokščiuosius stogus termoizoliacijos sluoksnis yra veikiamas gniuždymo apkrovų dėl vaikščiojimo. Priimta (LST EN 12430:2000), kad šios apkrovos atitinka sutelktąją apkrovą, esant 5 mm deformacijai.

Paprastai sutelktosios apkrovos bandymai atliekami laboratorijose gniuždant naujai pagamintus gaminius. Siekiant nustatyti realiai naudojamų akmens vatos plokščių sutelktosios apkrovos pokyčius, tirti bandiniai išimti iš eksploatuojamo stogo konstrukcijos (2.8 pav., 5.7 pav.).

Bandymų metu buvo išmatuotas bandinių tankis, organinių medžiagų kiekis, sutelktoji apkrova ir apskaičiuotas sutelktosios apkrovos dinaminio atsparumo rodiklis (rezultatai 5.9 lentelėje). Šis rodiklis apskaičiuotas bandinių, suklotų plokščiojo stogo konstrukcijoje, ir ant jų buvo vaikštoma 1 kartą per savaitę.

Taigi plokštės buvo veikiamos ne tik klimatinių veiksnių (plačiau aprašytų 2.1.5 skirsnyje), bet ir vaikščiojimo apkrovų. Visu bandymo laikotarpiu vieną kartą per savaitę buvo vaikštoma ant stoge suklotų plokščių, imituojant mindymo apkrovas, atsirandančias dėl stogo montavimo darbų ir priežiūros eksploatacijos metu.

5.9 lentelė. Bandinių tankio, sutelktosios apkrovos ir organinių medžiagų kiekio vidutiniai dydžiai

Table 5.9. The average values of density, point load and organic material content of test specimens

Bandymų trukmė	Tankis ρ , kg/m^3	Sutelktoji apkrova, esant 5 mm deformacijai, F_5 , N	Organinių medžiagų kiekis M , %	Sutelktosios apkrovos dinaminio atsparumo rodiklis σ_{PL} (DR), %
MW-1.20 tipo bandiniai				
Natūriniai bandymai po 18 mėn. eksploatacijos	$\frac{164}{166}$	$\frac{1230}{995}$	$\frac{3,89}{3,98}$	123 ¹⁾
Tas pats po 97 mėn.	$\frac{170}{166}$	$\frac{990}{995}$	$\frac{3,92}{3,98}$	99,5 ¹⁾
Tas pats po 179 mėn.	$\frac{169}{166}$	$\frac{985}{995}$	$\frac{4,14}{3,98}$	98,9 ¹⁾
MW-2.13 tipo bandiniai²⁾				
Tas pats po 79 mėn.	136	$\frac{855}{980^{3)}$	4,74	87
Tas pats po 162 mėn.	137	$\frac{875}{980^{3)}$	4,63	89

Pastabos. Skaitiklyje pateikiami rezultatai gauti išbandžius bandinius po tam tikro laiko eksploatacijos realiomis sąlygomis, o vardiklyje išmatuoti nesendinto bandinio dydžiai

¹⁾ Realus eksploatavimo (o ne laboratorinėmis) sąlygomis.

²⁾ Nėra nesendinto bandinio pirminių bandymų rezultatų (prarasti duomenys).

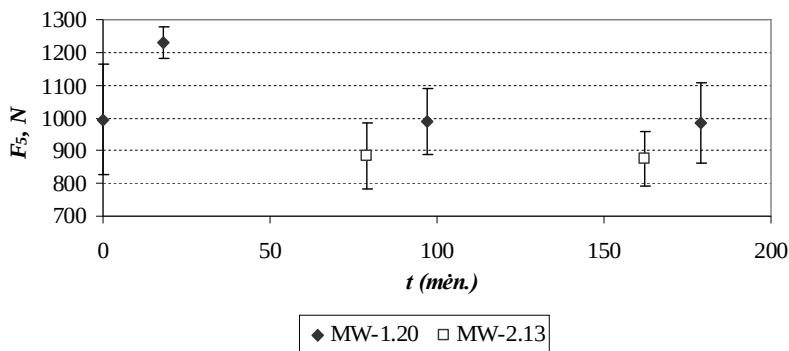
³⁾ Sutelktosios apkrovos dydis apskaičiuotas pagal 5.3 empirinę lygtį, įvertinant vidutinį standartinį nuokrypį pagal 5.8 lentelę.

Tirtos dviejų tipų skirtingos struktūros (homogeniškos ir heterogeniškos) akmens vatos plokštės (detaliau bandiniai aprašyti 2.7 lentelėje), eksploatuotos apie 15 metų. MW-1.20 bandiniai į stogo konstrukciją buvo sukloti prieš 179 mėnesius, o bandiniai MW-2.13 – prieš 162 mėnesius iki šių bandymų.

Kadangi neišliko pirminių MW-2.13 bandinių bandymų įrašų, tai pasinaudojus (5.3) empirine lygtimi pridėjus ir vidutinio standartinio nuokrypio dydį (181 N), buvo empiriškai apskaičiuotas plokščių sutelktosios apkrovos dydis MW-2.13 pagal tankį, storį ir organinių medžiagų kiekį (duomenys paimti iš 2.7 lentelės).

Iš 5.9 lentelėje pateiktų vidutinių dydžių, gautų išbandžius bandinius MW-1.20, išimtus iš plokščiojo stogo atitvaros, galime matyti, kad tankis ir organinių medžiagų kiekiai, apskaičiuoti skirtingais laikotarpiais (po 18, 97 ir 179 mėnesių natūrinių bandymų), kinta skirtingai: tankis – 1,2–2,4 %, o organinių medžiagų kiekis – 1,5–3,9 %.

Išmatuoti sutelktosios apkrovos vidutiniai dydžiai, atsižvelgiant į bandymų trukmę, beveik nesiskiria, tačiau dydžių pasiskirstymas didėja (5.15 pav.). Jei vertintume tik mažiausius bandymų metu išmatuotus F_5 dydžius, jie turėtų aiškią tendenciją mažėti. Po 18 mėnesių nuo bandymų pradžios MW-1.20 tipo bandinių išmatuota sutelktoji apkrova buvo apie 23 % didesnė, palyginti su pradine (naujai pagaminto gaminio).



5.15 pav. Sutelktosios apkrovos vidurkių ir jų vidutinių standartinių nuokrypių pokyčiai priklausomai nuo natūrinių eksperimentų trukmės

Fig. 5.15. Changes in the average values of point load and in their average standard deviations depending on the duration of natural experiments

Tai gali būti paaiškinama tuo, kad didesnius dydžius lėmė natūrali matuojamų rodiklių sklaida bei struktūros nevienalytiškumas mineralinės vatos gamybos proceso metu dėl plaušų, tankio ir organinių medžiagų kiekio netolygaus pasiskirstymo technologinėje linijoje (Širok *et al.* 2008), kai nustatomas skirtingas iš tos pačios plokštės išpjautų kelių greta vienas kito esančių medžiagos fragmentų tankis ir išmatuojami skirtingi savybių dydžiai.

Iš 5.9 lentelės ir 5.15 paveikslą matome, kad MW-1.20 tipo bandinių vidutinių sutelktosios apkrovos dydžių pokyčių nėra (sumažėjimas apie 1–2 %) net ir po 179 mėnesių naudojimo, kai ant plokščių kiekvieną savaitę buvo vaikštomą. Panaši tendencija būdinga ir MW-2.13 tipo bandiniams.

Apskaičiuotas MW-1.20 bandinių sutelktosios apkrovos dinaminio atsparumo rodiklis $\sigma_{PL} (DR) = 99,5\text{--}98,9 \%$ po 179 mėnesių eksploatavimo. O MW-2.13 bandinių $\sigma_{PL} (DR)$ siekia 87–89 %, panaudojus apskaičiuotą empirinį F_5 dydį su realiai išmatuotais po 79 ir 162 mėnesių eksploatacijos. Sumažėjimas akivaizdus, tačiau tai labiau teorinis rezultatas, todėl šie duomenys išvadose nepateikiami.

Visuose bandymuose matomas sutelktosios apkrovos mažiausių ir didžiausių dydžių pasiskirstymas (ypač bandinių MW-1.20) platesniu intervalu. Ko gero, tai lemia medžiagos ypatumai, matavimo rezultatų sklaida bei iš dalies eksploatacijos metu veikiančios apkrovos dėl vaikščiojimo.

Normalios eksploatacijos (atliekant kassavaitinę apžiūrą) sąlygomis vidutiniai sutelktosios apkrovos dydžiai pakito, bet gerokai mažiau nei laboratorinėmis sąlygomis išbandytiems bandiniams imitavus vaikščiojimo apkrovų poveikį.

Natūrinių bandymų (klimatinio sendinimo ir dinaminių apkrovų dėl vaikščiojimo) rezultatai rodo, kad beveik 15 metų eksploatacijos laikotarpiu akmens vatos plokščių, kurios naudojamos plokščių stogų termoizoliaciniam sluoksniui, gniuždymo ėtempio, esant 10 % deformacijai, ir sutelktosios apkrovos, esant 5 mm deformacijai, vidutiniškai sumažėjo 1–7 %.

Laboratorinėmis sąlygomis atliekant sendinimą pagal atitinkamas metodikas nustatytas 14–37 % dydžių sumažėjimas, lyginant su pradiniais dydžiais. Akivaizdu, kad laboratorijose bandiniai veikiami daug didesnio dydžio ir intensyvumo poveikiais nei gaminiai realiomis eksploatavimo sąlygomis.

Siekiant nustatyti ir susieti priklausomybę tarp laboratorijose išmatuojamų dydžių su dydžiais realaus eksploatavimo metu būtina atlikti plataus masto ir ilgalaikius eksperimentinius tyrimus, kompleksiškai vertinant įvairių statybos produktų fizinių, šiluminių ir stiprumo savybių pokyčius, vykstančius medžiagose dėl klimatinės ir (arba) mechaninių apkrovų poveikio.

5.3. Penktojo skyriaus išvados

1. Plokščiųjų stogų atitvarinėse konstrukcijose termoizoliacinės medžiagos yra veikiamos įvairių klimatinių veiksnių (dažniausiai temperatūros ir drėgmės) ir dinaminių apkrovų, atsirandančių dėl vaikščiojimo (galinčių siekti 130–150 kPa), todėl svarbu nustatyti naudojamų medžiagų atsparumą šių veiksnių poveikiui. Termoizoliacinių medžiagų atsparumas klimatinių veiksnių poveikiui gali būti nusakomas gniuždymo įtempio atsparumo senėjimui $\sigma_{10}(AR)$, o dinaminių apkrovų – sutelktosios apkrovos dinaminio atsparumo $\sigma_{PL}(DR)$ rodikliais.
2. Eksperimentinių bandymų metu tirtos skirtingos struktūros, tankio ir stiprumo savybių mineralinės vatos plokštės. Klimatinių veiksnių ir dinaminių apkrovų poveikiai bandiniams buvo imituojami pasitelkus sukurta įrangą laboratorinėmis sąlygomis ir atliekant natūrinius eksperimentus (realios eksploatacijos metu). Palyginus gautus rezultatus nustatyta, kad skiriasi veiksnių intensyvumas laboratorinių bandymų metu nuo jų dydžio eksploatacijos metu. Išmatuota, kad plokščiojo stogo konstrukcijoje termoizoliacinis sluoksnis daugiausiai veikiamas nedaug viršijant vidutinę +25 °C temperatūrą ir santykinį oro drėgnumą 50 %. Todėl laboratorinės senėjimo procesų imitavimo sąlygos: klimatiniai veiksniai (kai veikia +70 °C temperatūra ir 95 % drėgmė) ar mechaninės cikliškos (60 kartų) ir 147 kPa dydžio apkrovos yra ekstremalios. Realiomis eksploatacijos sąlygomis tokių veiksnių poveikis yra gerokai mažesnis.
3. Apskaičiuota, kad laboratorinėmis sąlygomis nustatytas mineralinės vatos bandinių vidutinis gniuždymo įtempio, esant 10 % deformacijai, atsparumo senėjimui rodiklis $\sigma_{10}(AR)$ siekė 74–78 %, o sutelktosios apkrovos dinaminio atsparumo $\sigma_{PL}(DR)$ rodiklis 63–86 %, lyginant su prieš bandymus buvusiais vidutiniais dydžiais. Natūrinių bandymų metu nustatyta, kad išbandžius bandinius po 15 metų eksploatacijos (natūrinėmis sąlygomis) vidutinis gniuždymo įtempio, esant 10 % deformacijai, atsparumo senėjimui rodiklis $\sigma_{10}(AR)$ buvo 93–99 %, o sutelktosios apkrovos dinaminio atsparumo $\sigma_{PL}(DR)$ rodiklio vidutinis dydis siekė 98,9–99,5 %, lyginant su naujai pagaminto ir neekspluatuotų bandinių vidutiniais dydžiais.
4. Mineralinės vatos plokščių atsparumas klimatiniam senėjimui ir dinaminės apkrovos poveikiui labiausiai priklauso nuo gaminio stiprumo savybių ir struktūros (ypač paviršinių sluoksnių mechaninių ir deformacinių savybių). Gauti rezultatai rodo, kad bandiniams, turėjusiems pradinį didesnę gniuždymo įtempio (σ_{10}) ir (arba) sutelktosios

apkrovos (F_5) dydį ir po klimatinio sendinimo ar dinaminio varginimo bandymų buvo išmatuotas didesnis atitinkamo ($\sigma_{10,A}$, $F_{5(DL)}$) rodiklio dydis. Stiprų tarpusavio ryšį patvirtina apskaičiuoti daugialypės koreliacijos koeficientai $R = 0,8517-0,9033$.

5. Apibendrinus bandymų metu gautus rezultatus matoma, kad vidutiniai bandinių dydžiai net ir po klimatinio sendinimo ar dinaminės apkrovos poveikių atitiko gamintojo deklaruojamus gniuždymo įtempio ir sutelktosios apkrovos mažiausius dydžius visų tipų tirtoms mineralinės vatos plokštėms.

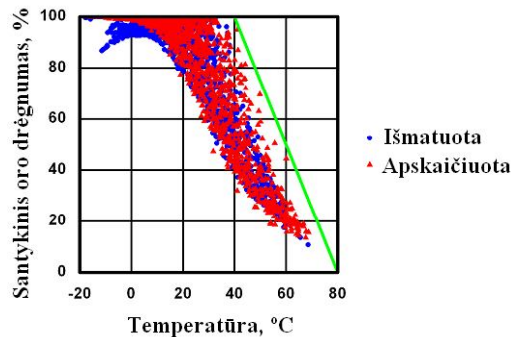
Rezultatų aptarimas

Rengiant šį mokslinį darbą plokščiųjų stogų atitvarinėse konstrukcijose vykstančius hidroterminius procesus realaus naudojimo metu ir šiuolaikinių mineralinės vatos plokščių fizines ir mechanines bei deformacines savybes nagrinėjo ir kiti mokslininkai.

Temperatūros ir drėgmės natūriniai matavimai. Vokietijos mokslininkai Zirkelbach ir kiti nuo 2006 m. rugpjūčio iki 2007 m. sausio mėn. atliko plokščiojo stogo termoizoliacinių sluoksnių iš stiklo vatos plokščių natūrinius temperatūros ir santykinio oro drėgnumo matavimus (storis buvo 90 ir 175 mm). Eksperimentiniai pastatai pastatyti Holzkirchen mieste (Miuncheno apylinkės, Vokietija). Be natūrinių matavimų, buvo atliktas ir hidroterminių procesų kompiuterinis modeliavimas, pasitelkus programą WUFI® ir įvertinus meteorologinių stebėjimų duomenis.

Natūrinių tyrimų metu išmatuota maksimali temperatūra paviršiniame (prie stogo dangos) termoizoliacijos sluoksnyje siekė $+(60-70)^\circ\text{C}$, o tuo metu santykinis oro drėgnumas buvo 10–30 %. Didžiausias išmatuotas santykinio oro drėgnumo dydis siekė 100 % apie $+20^\circ\text{C}$ temperatūroje. Palyginus natūrinių bandymų metu gautus dydžius su modeliuojant apskaičiuotais teoriniais dydžiais, nustatytas didelis rezultatų sutapimo laipsnis (nes tik retkarčiais fiksuojamas 2–3 $^\circ\text{C}$ temperatūros skirtumas).

Publikacijoje (Zirkelbach *et al.* 2008) pateikti rezultatai panašūs į šiame darbe (5.1.2 skirsnyje) pateiktų natūrinių bandymų metu gautus dydžius. Palyginę 6.1 paveikslą, paimtą iš minėtos publikacijos, matome, kad temperatūros ir santykinio oro drėgnumo sklaidos diagrama sutampa su 5.7 paveikslu.



6.1 pav. Išoriniame stogo paviršiuje išmatuotų temperatūros ir santykinio oro drėgnumo duomenys

Fig. 6.1. Measured data of temperature and relative humidity in outside surface of the roof

Tai patvirtina, kad atitvarinėje konstrukcijoje vienu metu nesusidaro aukšta temperatūra ir didelis santykinis oro drėgnumas (o jei išskirtinėmis sąlygomis ir susidaro, tai poveikis būna trumpalaikis). Nedidelius gautų rezultatų skirtumus greičiausiai lėmė vietovės klimatinės sąlygos ir matavimų trukmė.

Abiem atvejais nustatyta, kad realiomis eksploatacijos sąlygomis plokščiojo stogo konstrukcijose mineralinės vatos plokštės yra veikiamos žemesnės temperatūros, nei tai atliekama laboratorinėmis sąlygomis imituojuojant hidroterminius procesus.

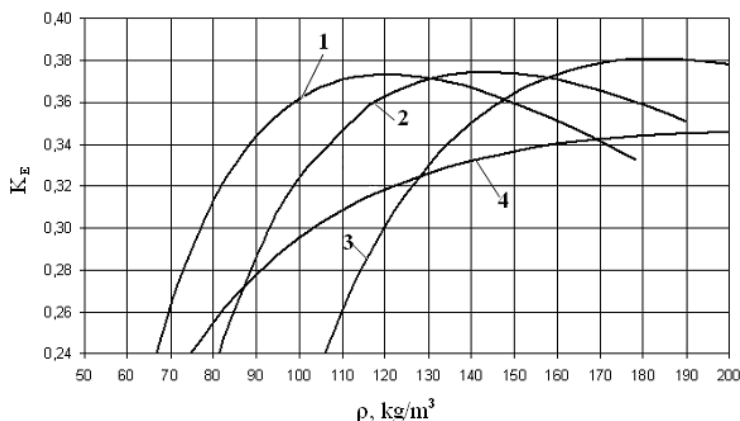
Pirmiau minėtų autorių nuomone, Europos klimato zonoje išskirtinės klimatinės sąlygos, kai vienu metu veikia $+(40\text{--}50)^\circ\text{C}$ temperatūra, o santykinis oro drėgnumas siekia 80–100 %, per metus nebus ilgesnis kaip 100 valandų (tai atitinka apie 1 % stogo eksploatacijos laiko).

Todėl siūloma, kad, nustatant termoizoliacinių medžiagų atsparumą klimatiniams poveikiams, hidroterminiai bandymai turėtų būti atliekami $+50^\circ\text{C}$ temperatūroje esant 90 % santykiniam oro drėgnumui.

Šiuo metu vyraujanti praktika, kai laboratorinių bandymų metu nustatomos tuo pat metu veikiančios ekstremaliai aukštos temperatūros ir drėgmės sąlygos neatitinka realaus naudojimo sąlygų ir iškreipia bandymų rezultatus.

Dvisluoksnės struktūros mineralinės vatos plokščių tyrimai. Rusijos mokslininkas S. Kutjevas savo disertacijoje (Кутяев 2007a) tyrė dvisluoksnių mineralinės vatos plokščių šilumines, fizines ir mechanines savybes. Buvo sukurtos ir ištirtos efektyvios dvisluoksnės mineralinės vatos plokštės, kurių šilumos laidumo koeficientas $\leq 0,04 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, gniuždymo įtempis, esant 10 % deformacijai, $\leq 70 \text{ kPa}$, o sutelktoji apkrova siekia iki 800 N.

Dvisluoksnės struktūros gaminių palyginimui su viensluoksnėmis mineralinės vatos plokštėmis autorius pasiūlė naudoti konstrukcinio efektingumo koeficientą (K_E). Jis parodo sąlyginio stiprumo santykį su tankiu ir šilumos laidumu. 6.2 paveiksle pavaizduota, kad tirtų dvisluoksnių plokščių apskaičiuotas K_E dydis siekė 0,388 ir 0,453, kurie yra gerokai didesni nei bet kurios šiuolaikinės homogeniškos struktūros mineralinės vatos plokštės dydžiai (Кутяев 2007b).



6.2 pav. Homogeniškos ir dviejų tankių heterogeniškos struktūros plokščių konstrukcinio efektingumo koeficiento priklausomybė nuo tankio:

1 – didesnio tankio sluoksnio dalis 10 %; 2 – tas pats, tik 25 %;

3 – tas pats, tik 50 %; 4 – viensluoksnė plokštė

Fig. 6.2. The dependence of structural efficiency coefficient on density for homogeneous and dual density heterogeneous slabs: 1 – higher density layer part 10%; 2 – the same, but 25%; 3 – the same, but 50%; 4 – monodensity slab

Disertacijoje plačiai tirtos šiluminės dvisluoksnių plokščių savybės ir atliktas palyginimas su vieno tankio plokštėmis. Nustatyta, kad dvisluoksnių plokščių šiluminė varža daugiau kaip 30 % didesnė, lyginant su tradicinėmis homogeniškos struktūros plokštėmis, turinčiomis vienodą stiprumą. Gaminant dvisluoksnės plokštes galima 10–20 % sumažinti jų tankį, palyginti su

viensluoksnėmis plokštėmis. Ištirta, kad efektingiausios dvitankės plokštės gaunamos, kai viršutinio sluoksnio storis sudaro 10–25 % viso gaminio storio esant 90–160 kg/m³ vidutiniam plokštės tankiui.

Palyginus abiejose darbuose atliktus eksperimentinius tyrimus galima išskirti šiuos pagrindinius skirtumus:

- šiame darbe buvo parinkti gerokai platesnio tankių (68–210 kg/m³) intervalo bandiniai lyginant su (Кутъев 2007a) darbe aprašyta (90–160 kg/m³ tankio) bandiniais;
- autoriaus S. Kutjevo pasirinktuose bandiniuose viršutinio sluoksnio dalis sudarė 25–75 %, o mūsų bandiniuose – 2,63–30 %;
- S. Kutjevo darbe (Кутъев 2007a) nepateikta informacijos apie bandinių storio ir organinių medžiagų kiekio tyrimus ir jų įtaką gaminių mechaninėms ir deformacinėms savybėms.

Tame pat darbe (Кутъев 2007a) pateikiamos apskaičiuotos empirinės lygtys, rodančios dvisluoksnių plokščių šiluminių, fizinių ir mechaninių savybių priklausomybę nuo pagrindinių veiksnių. Atlikus lyginamuosius skaičiavimus (naudojant tuos pačius pradinius duomenis pagal 2.2 lentelę) gauti stiprumo parametrų σ_{10} ir F_5 dydžiai (6.1 lentelė).

6.1 lentelė. Gniuždymo įtempio, esant 10 % deformacijai, ir sutelktosios apkrovos lyginamieji skaičiavimai, naudojant skirtingų autorių (Кутъев 2007a) empirines lygtis

Table 6.1. Comparative calculations of the values of compression stress at 10% deformation and point load by using empirical equations from different authors (Кутъев 2007a)

Rodiklis	1 skaičiavimas (bandiniai MW-2.5)	2 skaičiavimas (bandiniai MW-2.4)	3 skaičiavimas (bandiniai MW-2.2)
Viršutinio sluoksnio tankis, kg/m ³	210	200	160
Apatinio sluoksnio tankis, kg/m ³	130	115	90
Viso gaminio tankis, kg/m ³	136	122	101
Viso gaminio storis, mm	200	200	100
Viršutinio sluoksnio storis, mm	15	15	15
Viršutinio sluoksnio dalis gaminyje, %	7,5	7,5	15
Organinių medžiagų kiekis, %	3,5	3,5	3,5
Apskaičiuoti dydžiai:			
σ_{10} pagal 2 lygtį (Кутъев 2007a), kPa	58,1	51,7	34,8
σ_{10} pagal 4.9 lygtį (4.3.1 skirsnis), kPa	59,9	49,8	34,4
F_5 pagal 3 lygtį (Кутъев 2007a), N	667	581	418
F_5 pagal 4.10 lygtį (4.3.2 skirsnis), N	676	572	410

Kaip matome iš 6.1 lentelėje pateiktų skaičiavimo rezultatų, gautų naudojantis šiame darbe pateiktomis empirinėmis lygtimis, apskaičiuotų parametrų σ_{10} ir F_5 dydžiai labai panašūs į S. Kutjevo pateiktas lygtis, o gauti skirtumai neviršija vidutinio standartinio nuokrypio ribų. Todėl galime teigti, kad rezultatų atkartojamumas yra pakankamas.

S. Kutjevo darbe (Кутьев 2007a) prieita prie išvadų, kad didinant bet kurio iš sluoksnių tankį, taip pat ir viršutinio sluoksnio dalį didėja ir vidutinis gaminio tankis. Nustatyta, kad viršutinio sluoksnio didėjimas (kai šio sluoksnio dalis gaminyje mažesnė kaip 50 %) nedaro įtakos gniuždymo įtempio, esant 10 % deformacijai, dydžiui. Taip pat nustatyta, kad dvisluoksniai gaminiai turi apie 20 % didesnę sutelktąją apkrovą, lyginant su tradicinėmis homogeniškos struktūros plokštėmis (šių tyrimų metu gautas apie 34,7 % skirtumas). Susidaręs skirtumas gali būti paaiškinamas naudotais skirtingo tipo bandiniais, kurie buvo skirtingo storio, tankio, plaušų išsidėstymo struktūroje ir atskiruose sluoksniuose bei kt. parametrais.

S. Kutjevas tvirtina, kad dvisluoksnės struktūros mineralinės vatos plokščių diegimas statybos praktikoje leidžia 17–22 % sumažinti medžiagų ir darbo sąnaudas įrengimo metu (Кутьев 2007a). Nepaisant aprašytų skirtumų, pagrindinės išvados ir rezultatai panašūs.

Kadangi analogiškų tyrimų ir beveik tuo pačiu metu analizuotos panašios medžiagos ir jų savybės, galime tvirtinti, kad trūksta duomenų apie heterogeniškos struktūros medžiagų tyrimus ir atliktas darbas yra aktualus.

Apibūdinant atliktus tyrimus galima teigti, kad atitvarinių konstrukcijų ir jose naudojamų termoizoliacinių medžiagų efektyvumo klausimai yra svarbūs.

Norint užtikrinti plokščiųjų stogų atitvarinių konstrukcijų ilgą naudojimo laiką ir jose naudotų medžiagų savybių nekintamumą, būtina ne tik naudoti kuo efektyvesnes ir patikimas medžiagas, bet ir nustatyti realius poveikių dydžius, veikiančius eksploatacijos metu. Tam, siekiant spręsti trūkstamų duomenų apie tiriamas konstrukcijas problemas, reikia tobulinti bandymų metodus ir procedūras, ir ypač dabar, kai atsiranda vis naujų konstrukcinių sprendimų.

Bendrosios išvados

1. Sukurtas tikslesnis optinio nuskaitymo ir duomenų diskretizavimo principu pagrįstas neardomasis pluoštinių termoizoliacinių medžiagų struktūros tyrimo metodas. Jis leidžia nustatyti ir įvertinti mineralinės vatos plaušų kryptingumą termoizoliacinių gaminių struktūroje. Mineralinės vatos struktūrai apibūdinti pasiūlyti makrostruktūros rodikliai S_L , S_C ir S_{L-C} , susiję su dominuojančių plaušų ar jų grupių orientacijos kampų santykiu.

2. Įrodyta makrostruktūros rodiklio (suskaičiuotų diskretinių dydžių) sąsaja su plaušų orientacija: kai $S_{L-C} \leq 0,75$, gaminiuose dominuoja horizontalios orientacijos plaušai; jei S_{L-C} kinta nuo 0,76 iki 1,09, nėra aiškiai apibrėžtos plaušų orientacijos, todėl struktūra chaotiška, o kai S_{L-C} rodiklis yra $\geq 1,10$, gaminių struktūroje dominuoja vertikalios orientacijos plaušai.

3. Remiantis eksperimentiniais duomenimis, nustatytas glaudus ryšys (koreliacijos koeficientas – 0,9492) tarp mineralinės vatos bandinių gniuždymo ribinio įtempio σ_e , makrostruktūros rodiklio S_{L-C} , organinių medžiagų kiekio (M) ir tankio (ρ_s) (70–200 kg/m³). Šiam ryšiui įvertinti sudaryta empirinė lygtis, kuria naudojantis galima prognozuoti σ_e dydį $\pm 7,2$ kPa tikslumu.

4. Įvertinta, kaip pluoštinės struktūros valdymas (plaušų krypties keitimas ir (arba) skirtingo tankio sluoksnių formavimas) gamybos procese

lemia pagrindinius mineralinės vatos plokščių gniuždymo rodiklius. Nustatyta, kad skirtingos struktūros gaminiuose pasireiškia skirtingų fizinių parametrų poveikis:

- homogeniškos struktūros, chaotiškos plaušų orientacijos mineralinės vatos plokščių gniuždymo įtempis, esant 10 % deformacijai (σ_{10}), ir sutelktoji apkrova, esant 5 mm deformacijai (F_5), labiausiai priklauso nuo gaminio tankio (jam kintant nuo 80 iki 180 kg/m³). Tačiau ir organinių medžiagų kiekis daro įtaką σ_{10} , o F_5 dydžiui daro įtaką storis. Abu gniuždymo rodiklius (σ_{10} ir F_5) sieja tiesinė priklausomybė (porinės koreliacijos koeficientas – 0,8151);
- heterogeniškos struktūros, dviejų tankių (sluoksnių) mineralinės vatos plokščių gniuždymo įtempis, esant 10 % deformacijai, priklauso nuo vidutinio viso gaminio tankio, organinių medžiagų kiekio ir gaminio apatinio sluoksnio tankio (nes determinacijos koeficientas – 0,9690). Šių plokščių sutelktoji apkrova, esant 5 mm deformacijai, labiausiai priklauso nuo gaminio storio, jo viršutinio sluoksnio tankio ir vidutinio tankio (80–160 kg/m³). Įvardytų savybių priklausomybės išreikštos regresinėmis lygtimis;
- panašaus tankio homogeniškos struktūros chaotiškos plaušų orientacijos ir heterogeniškos struktūros dviejų tankių bandinių gniuždymo įtempio, esant 10 % deformacijai, dydžiai skiriasi nereikšmingai. Iš dviejų skirtingo tankio sluoksnių sudarytos mineralinės vatos plokštės būdinga 34,7 % didesnė sutelktoji apkrova, esant 5 mm deformacijai, nes nedideliame paviršiaus plote veikiančią koncentruotą apkrovą pirmiausia perima heterogeniškos struktūros gaminio viršutinis (didesnio tankio) sluoksnis ir tik paskui jas perduoda mažesnio tankio (apatiniam), taip tolygiau paskirstant poveikį gerokai didesniame plote.

5. Nustatyta, kad heterogeniškos struktūros, dviejų tankių (sluoksnių) mineralinės vatos plokščių viršutinio, didesniojo tankio sluoksnio storio sumažinimas iki 30 % neturi įtakos gniuždymo įtempiui, esant 10 % deformacijai, ir sutelktajai apkrovai, esant 5 mm deformacijai. Gaminant dvisluoksnes plokštes su 10 mm storio viršutiniu sluoksniu, galima gauti optimalių stiprumo rodiklių gaminį, sumažinti (1,7–6,6 kg/m³) sunaudojamų žaliavų kiekį, padidinti gamybos linijos našumą bei palengvinti atitvarines konstrukcijas. Nustatyta, kad heterogeniškos struktūros mineralinės vatos gaminiuose standi skirtingo tankio jų sluoksnių jungtis apie 15 % padidina tokio gaminio sutelktąją apkrovą, esant 5 mm deformacijai.

6. Pasitvirtino, kad plokščiųjų stogų termoizoliacinio sluoksnio atsparumas klimatinių veiksnių poveikiui gali būti nusakomas gniuždymo įtempio atsparumo senėjimui $\sigma_{10}(AR)$, o veikiant dinaminėms apkrovoms – sutelktosios apkrovos dinaminio atsparumo $\sigma_{PL}(DR)$ rodikliais. Laboratorinių ir natūrinių tyrimų metu nustatyti skirtingi gniuždymo rodiklių dydžiai:

- po laboratorijoje sumodeliuotų klimatinių ir dinaminių poveikių suskaičiuotas mineralinės vatos plokščių vidutinis $\sigma_{10}(AR)$ siekė 74–78 %, o $\sigma_{PL}(DR)$ sudarė 63–86 % pradinių, prieš bandymus buvusių vidutinių dydžių;
- natūrinių eksperimentų metu 162–172 mėn. eksploatuotų mineralinės vatos gaminių vidutinis $\sigma_{10}(AR)$ dydis buvo 93–99 %, o sutelktosios apkrovos dinaminio atsparumo $\sigma_{PL}(DR)$ rodiklis vidutiniškai siekė 98–99 % pradinių neeksploatuotų gaminių vidutinių dydžių.

Literatūra ir šaltiniai

Badel, E.; Delisee, C.; Lux, J. 2008. 3D structural characterisation, deformation measurements and assessment of low-density wood fibreboard under compression - The use of X-ray microtomography, *Composites Science and Technology* 68: 1654–1663.

Bak, P. 2003. *The History of the Rockwool Group*. Hedehusene: Hedehusene bogtrykkeri. 23 p.

Balandis, A.; Jasiukevičius, V.; Martinaitis, M.; Strazdas, K. 1995. *Silikatų technologijos pagrindai*. Vilnius: Mokslo ir enciklopedijų leidykla. 438 p.

Baltijos šalių termoizoliacinių medžiagų rinka [interaktyvus]. 2009. Cobold Exports. [žiūrėta 2009 m. spalio 8 d.]. Prieiga per internetą: <<http://www.cobold.lv/docs/tirgus-petijums-lt.pdf>>.

Barkauskas, V.; Stankevičius, V. 2000. *Pastatų atitvarų šiluminė fizika*. Kaunas: Technologija. 286 p.

Bastarache, E. 2005. Man-made vitreous fibers (MMVF), in *Ceramic Materials.Info* [interaktyvus] [žiūrėta 2005 10 27]. Prieiga per internetą: <<http://ceramic-materials.com/education/166.html>>.

Bergonnier, S.; Hild, F.; Rieunier, J. B.; Roux, S. 2005a. Strain heterogeneities and local anisotropy in crimped glass wool, *Journal of Materials Science* 40(22): 5949–5954.

Bergonnier, S.; Hild, F.; Roux, S. 2005b. Digital image correlation used for mechanical tests on crimped glass wool samples, *Journal of Strain Analysis for Engineering Design* 40(2): 185–197.

Bergonnier, S.; Hild, F.; Roux, S. 2007. Local anisotropy analysis for non-smooth images, *Pattern Recognition* 40(2): 544–556.

Besnard, G.; Hild, F.; Roux, S. 2006. “Finite-element” displacement fields analysis from digital images: Application to Portevin-Le Châtelier bands, *Experimental Mechanics* 46(6): 789–804.

Blagojević, B.; Širok, B.; Štremfelj, B. 2004. Simulation of the effect of melt composition on mineral wool fibre thickness, *Ceramics-Silikáty* 48(3): 128–134.

Bliūdžius, R.; Samajauskas, R. 2001. Peculiarities of determining thermal conductivity coefficient of low density fibrous materials, *Materials Science (Medžiagotyra)* 7(4): 280–284.

Bliūdžius, R.; Stankevičius, V. 2001. *Statybinės šiluminės fizikos žinynas*. Kaunas: Technologija. 90 p.

Bludau, Ch.; Zirkelbach, D.; Künzel, H. M. 2008. Surface temperatures on flat roofs and hydrothermal consequences, in *Proc. of 8th Symposium on Building Physics in the Nordic Countries* [online]. June 16–18, 2008, Copenhagen, Denmark [cited 12 January 2009]. Available from Internet: <<http://web.byv.kth.se/bphys/copenhagen>>.

Bomberg, M.; Brown, W. 1993. Building envelope: heat, air and moisture interactions, *Journal of Building Physics* 16: 306–311.

Booth, R. J.; DeRushie, C.; Liu, K. 2002. Protection of foam plastic thermal insulation in low sloped roofing systems, *Journal of Thermal Envelope and Building Science* 30(3): 1–20.

Boström, L. 2002. *Ageing Effects on the Fire Resistance of Building Structures*. Borås: SP Swedish National Testing and Research Institute. 47 p.

Brandt, K.; Holtze, E. 1994 07 21a. *A Method of Producing a Mineral Fiber-Insulating Web, a Plant for Producing a Mineral Fiber-Insulating Web, and a Mineral Fiber-Insulated Plate*. Int. Cl.⁵: E04B 1/78. The World Intellectual Property Organization, WO 94/016162.

Brandt, K.; Holtze, E. 1994 07 21b. *A Method of Producing a Mineral Fiber-Insulating Web, a Plant for Producing A Mineral Fiber Web, and a Mineral Fiber-Insulated Plate*. Int. Cl.⁵: E04B 1/78. The World Intellectual Property Organization, WO 94/016163.

Brotherson, D. 1979. Performance characteristics of roof insulation, in *Proc. of the 5th Conference on Roofing Technology* [online]. April 19–20, 1979, Gaithersburg, USA. National Roofing Contractors Association [cited 15 November 2009]. Available from Internet: <<http://docserver.nrca.net/pdfs/technical/420.pdf>>.

BS 3533:1981 Glossary of thermal insulation terms. 1981. London. 16 p.

Chadiarakou, S.; Papadopoulos, A. M.; Karamanos, A.; Aravantinos, D. 2007. The impact of moisture on the thermal conductivity value of stone wool based insulating materials, in *Proc. of 2nd PALENC Conference and 28th AIVC Conference on Building Low Energy Cooling and Advanced Ventilation Technologies in the 21st Century*. September 27–29, Crete island, Greece. 190–194.

Clausen, A. U.; Jacobsen, B. 2003 07 03. *Mineral Fibre Batts*. Int. Cl.: D04H 1/00. The World Intellectual Property Organization, WO 03/054270.

Crenshaw, V.; Koontz, J. D. 2000. Simulated hail damage and impact resistance test procedures for roof coverings and membranes, in *Roofing Industry Committee on Weather Issues Meeting (RICOWI)* [online]. October 27, 2000, Dallas, Texas, USA RI-COWI [cited 1 December 2009]. Available from Internet: <<http://www.jdkoontz.com/articles/simulated.pdf>>.

Cridland, I., Larsø, P. V. 1988 01 14. *Method for Continuous Production of Mineral Wool Slabs*. Int. Cl.⁴: E04B 1/78. The World Intellectual Property Organization, WO 88/00265.

Cridland, I.; Nørgaard, L.; Kirkebæk, J. 1999 09 23a. *Process and Apparatus for the Preparation of a Mineral Fibre Product, uses of It and Such Product*. Int. Cl.⁶: E04B 1/78. The World Intellectual Property Organization, WO/1999/047766.

Cridland, I.; Nørgaard, L.; Rasmussen, J. 1999 09 23b. *Process and apparatus for preparation of a mineral fibre product, a such product and uses of it*. Int. Cl.⁷: E04B 1/78. The World Intellectual Property Organization, WO 99/047765.

Čekanavičius, V.; Murauskas, G. 2002. *Statistika ir jos taikymas II*. Vilnius: TEV. 268 p.

Černý, M.; Glogar, P.; Goliáš, V.; Hruška, J.; Jakeš, P.; Sucharda, Z.; Vávrová, I. 2007. Comparison of mechanical properties and structural changes of continuous basalt and glass fibres at elevated temperatures, *Ceramics–Silikáty* 51(2): 82–88.

Čivaitė, J.; Samajauskas, R. 2004. Racionalūs sprendimai apšiltinant pastatų plokščiuosius stogus ir jų kompleksinis įvertinimas, iš *Konferencijos „Pažangioji statyba“, įvykusios Kaune 2004 m. balandžio 22–23 d., pranešimų medžiaga*. Kaunas: Technologija, 235–240.

Debouzie, A.; Bouquet, F.; Meringo, A. 1986 12 30. *Apparatus for Forming of Felts Which Have an Isotropic Structure*. Int. Cl.⁴: C03B 37/10. United States Patent, US4632685.

Dimovski, D.; Blagojević, B.; Širok, B.; Kariž, Z. 2004. Mineral wool primary layer structure influence on the fibre distribution in the final product, *Glass Technology* 45(4): 175–181.

Directive 2002/91/EC of the European Parliament and of the Council of 16 December 2002 on the Energy Performance of Buildings, 2003, *Official Journal L 001*: 65–71.

Dyrbøl, S. 1998. *Heat Transfer in Rockwool modelling and Method of Measurement (Part II) – Modelling Radiative Heat Transfer in Fibrous Materials*: Ph. D. – thesis. Technical University of Denmark. Copenhagen: DTU. 67 p.

Drobina, R.; Machnio, M. S. 2006. Application of the image analysis technique for textile identification, *AUTEX Research Journal* 6(1): 40–48.

Ducman, V.; Apih, V.; Kovačević, M.; Sever-Škapin, A. 1998. The influence of accelerated ageing on the mechanical properties of mineral-wool boards, *Kovine zlitine Tehnologije* 32(3–4): 205–207.

Dupuis, R. M. 1999. Field and laboratory assessment of SPF roof systems, in *Proc. of the 4th International Symposium on Roofing Technology*. September 17–19, 1999, Gaithersburg, USA. 265–271.

Ehrler, P.; Guse, R.; Schuon, G. 1974. The television camera - an instrument for the quantitative measurement of surface irregularities, *Textil Prax.* 29: 446–447.

Endriukaitytė, A. 2004. *The Investigation of the Parameters of the Heat and Mass transfer Process in the Stone Wool Layers of the Walls*: summary of doctor dissertation. Vilnius: Technika. 28 p.

Erchiqui, F.; Bendada, A.; Gakwaya, A. 2005. Analysis of long fibers direction of transversely hyperelastic material for thermoforming application isotropic, *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 24(9): 961–975.

ETAG 004:2000 *Guideline for European technical approval of external thermal insulation composite systems with rendering*. The European Organisation for Technical Approvals. Brussels, 2000. 87 p.

ETAG 006:2000 *Guideline for European technical approval of systems of mechanically fastened flexible roof waterproofing membranes*. The European Organisation for Technical Approvals. Brussels, 2000. 80 p.

EURIMA – *European Insulation Manufacturers Association* [online] 2009. [cited 12 November 2009] Available from Internet: <<http://www.eurima.org/production-process/>>.

Euroweather – *weather information service* [online] 2010. [cited 2 February 2010]. Available from Internet: <http://www.euroweather.net/english/climate/city_EKRR/clima_select/meteo_Copenhagen-Roskilde>.

Francis, K. I.; Cody, L. W.; Osmund, Ch. 1998 07 23. *Composite Roof system*. Int. Cl.⁶: E04D 11/02. The World Intellectual Property Organization, WO 98/31895.

Frederick, E. R. 1953. Corrugated Fibrous Webs as Insulation Fillers, *Textile Research Journal* 23: 45–53.

Freedonia Group [online] 2009. World Insulation to 2012 - Demand and Sales Forecasts, Market Share, Market Size, Market Leaders [cited 8 October 2009]. Available from Internet: <<http://www.freedoniagroup.com/World-Insulation.html>>.

Geary, J. 2001. Solutions to insulation facer delamination issues, *RCI Interface: Journal of the Roof Consultants Institute* 19(6): 7–8.

Germain, C.; Da Costa, J.P.; Lavialle, O.; Baylou, P. 2003. Multiscale estimation of vector field anisotropy. Application to texture characterization, *Signal Processing* 83: 1487–1503.

Gessner, D.; Steckert, R. 1984 01 27. *Mechanical procedure for orienting mineral fibres of woolly appearance into a vertical position*. Int. Cl.: C04B26/02. Institut National de la Propriété Industrielle, FR2530537.

Gnip, I.; Vaitkus, S.; Keršulis, V.; Vėjelis, S. 2009. Predicting the deformability of mineral wool slabs under constant compressive stress, *Construction and Building Materials* 23(5): 1928–1934.

Griffin, C. W.; Fricklas R. L. 2006. *Manual of Low-Slope Roof Systems*. New York: McGraw-Hill. 598 p.

Guldborg, M.; Jensen, S. L.; Knudsen, T.; Steenberg, T.; Kamstrup, O. 2002. High-alumina low-silica HT stone wool fibers: a chemical composition range with high-biosolubility, *Regulatory Toxicology and Pharmacology* 35: 217–226.

Hendriks, N. A. 2002. New Test method to assess the walkability of roof insulation boards, in *Proc. of 12th International Roofing and Waterproofing Conference*. September 25–27, 2002, Orlando, USA [online]. National Roofing Contractors Association [cited 24 April 2008]. Available from Internet: <<http://www.nrca.net/rp/technical/techconf/7872.pdf>>.

Hild, F.; Maire, E.; Baudequin, M.; Roux, S.; Witz, J.F. 2009. Three dimensional analysis of a compression test on stone wool, *Acta Materialia* 57(11): 3310–3320.

Hild, F.; Raka, B.; Baudequin, M.; Roux, S.; Cantelaube, F. 2002. Multi-scale displacement field measurements of compressed mineral wool samples by digital image correlation, *Applied Optics* 41(32): 6815–6828.

Hojholt, S. 2003 03 19. *Method for the manufacturing of a mineral wool product and mineral wool product*. Int. Cl.⁷: E04B 1/74. European Patent Office, EP1293616.

Holm, A.; Künzel, H. M. 1999. Combined effect of of temperature and humidity on the deterioration process of insulation materials in ETICS, in *Proc. of the 5th Symposium Building Physics in the Nordic Countries*: vol. 2. August 24–26, 1999, Goteborg, Sweden, 677–684.

Holme, J.; Noreng, K.; Kvande, T. 2008. Moisture and mould growth in compact roofs - Results of a three-stage field survey, in *Proc. of 8th Symposium on Building Physics in the Nordic Countries* [online]. June 16–18, 2008, Copenhagen, Denmark [cited 12 January 2009]. Available from Internet: <<http://web.byv.kth.se/bphys/copenhagen>>.

Horres, J. 2000 07 06. *Method for the production of binder-bound mineral wool products, apparatus for carrying it out, mineral wool product thereby produced, composite mineral product thereby produced and use of these products*. Int. Cl.⁷: D04H 1/70. The World Intellectual Property Organization, WO 00/39381.

Horres, J.; Mellem, J. 2006 08 17. *Process for manufacturing products of mineral wool, in particular monolayer and multilayer products*. Int. Cl.: D04H 1/56. United States Patent US7514027.

Huet, B.; Godet, N. 2008. After a record year in 2007, the European insulation industry will face challenges in 2008, *Global insulation magazine* May 2008: 15–20.

Hutchinson, T. W.; Roberts, K. 2003. *Towards sustainable Roofing*. Bagneux: RILEM Publications SARL. 23 p.

Ilginis, K. 1985. *Sutapdintieji stogai*. Vilnius: Mokslas. 121 p.

Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC). Reference Document on Best Available Techniques in the Glass Manufacturing Industry (Draft 1 2008), 2008 [online]. European Commission [cited 7 October 2009]. Available from Internet: <<http://www.jrc.es/pub/english.cgi/0/733169>>.

Yang, H.; Lindquist, W. B. 2000. Three-dimensional image analysis of fibrous materials, in *Proc. of Applications of Digital Image Processing XXIII*: Ed. By A. G. Tescher. 31 July–3 August, 2000, San Diego, USA. 275–282.

Jacoby, M. E. 1966. Insulation: Ally or enemy for built up roofing, in *Proc. of Roofing Symposium, Sponsored by Chapters of the Construction Specifications Institute*, Pub. No. 12-RW-3756.

Jacobsen, B. 2008 12 24. *Mineral Fibre Product*. Int. Cl.: D04H 1/42. The World Intellectual Property Organization, WO 2008/155401.

Jacobsen, B.; Nørgaard, L. 1992 06 25. *Method of manufacturing Insulating Boards Composed of interconnected Rod-Shaped Mineral Fibre Elements*. Int. Cl.⁵: D04H 1/70. The World Intellectual Property Organization, WO 92/010602.

Järlevä, P.; Laitinen, K. W.; Purola, J. J.; Törmälä, P. 1984. Studies on lightweight glass fibre-resin composites by destructive and nondestructive methods, *Journal of Composite materials* 18(6): 557–573.

Jose, D. J.; Hollies, N. R. S.; Spivak, S. M. 1986. Instrumental Techniques to quantify textural change in carpet. Part I: Image Analysis, *Textile Research Journal* 56: 591–597.

Juknevičius, L.; Marčiukaitis, G.; Valivonis, J. 2006. Influence of technological factors on the state of stress and strain in three-layer reinforced concrete structures, *Journal of Civil Engineering and Management* 12(3): 195–204.

Karamanos, A. K.; Giama, E.; Papadopoulos, A. M. 2007. Environmental impact of fibrous insulating materials operating in harsh temperature conditions, in *Proceedings of the 1st Conference on Environmental Management, Engineering, Planning and Economics (CEMEPE 07)*: June 24–28, 2007, Skiathos island, Greece. 1889–1894.

Karamanos, A.; Papadopoulos, A. M.; Anastasellos, D. 2004. Heat transfer phenomena in fibrous insulating materials, in *Proc. of WSEAS/IASME International Conference on heat and Mass transfer*. August 17–19, 2004, Corfu, Greece, 1–12.

Karjalainen, E.; Soikkeli, O. 2003 07 10. *Method and Apparatus for producing Mineral Fibre Mat*. Int. Cl.⁷: D04H 1/74. The World Intellectual Property Organization, WO 03/056087.

Kasiulevičius, V.; Denapienė, G. 2008. Statistikos taikymas mokslinių tyrimų analizėje, *Gerontologija* 9(3): 176–180.

Kawamura, M.; Ikeda, S.; Morita, S.; Sanomura, Y. 2005. Unambiguous Determination of 3D Fiber Orientation Distribution in Thermoplastic Composites Using SAM Image of Elliptical Mark and Interference Fringe, *Journal of Composite Materials* 39(4): 287–299.

Kerienė, J. 2002. Mineral Wool Fibre Corrosion in Alkaline Solution, *Materials Science (Medžiagotyra)* 8(4): 434–438.

Kerienė, J. 2005. Influence of the mineral wool production technological parameters and humidity attack on its fibre fragility, in *Proc. of 11th International Conference of Fracture*: March 20–25, 2005, Turin, Italy, 1–6.

Kerienė, J.; Valužienė, B. 1994. Mineralinės vatos plaušų irimo skystoje šarminėje terpėje produktų tyrimas, iš *Priedų ir antrinių žaliavų panaudojimas statybinėse medžiagose: darbų rinkinys*. Vilnius: Termoizoliacijos institutas, 86–101.

Keršulis, V.; Gnip, I.; Vaitkus, S.; Vėjelis, S. 2009. The Anglysis of interlaboratory testing results of rock wool products, *Materials Science (Medžiagotyra)* 15(4): 377–382.

Kyriakides, S.; Ruff, A. E. 1997. Aspects of the failure and postfailure of fiber composites in compression, *Journal of Composite Materials* 31(20): 2000–2037.

Klose, G. R. 2005 06 04. *Process and device for manufacturing a fibrous insulation web. Method of manufacturing glass fiber core thermal insulation panels involves drawing mineral fibers as primary web, sub-dividing*. Int. Cl.⁷: E04B 1/78. European patent Office, EP1106743.

Klose, G. R. 2006 01 18. *Manufacture of a mineral Fibre Web with Substantially Upright Fibres*. Int. Cl.: D04H1/74. European Patent Office, EP1616985.

Kochetkova, N. V.; Dergacheva, N. P.; Fomichev, S. V.; Krenev, V. A. 2009. Interaction of basalt with hydrochloric acid, *Russian Journal of Inorganic Chemistry* 54(6): 842–847.

Koontz, J. D. 1987, A Comparative study of dynamic impact and static loading of foneply roofing assemblies, in *Proc. of the Roofing Research and Standards Development: a Symposium*, West Conshohocken, USA. 1987. West Conshohocken: ASTM, 23–51.

Koontz, J. D.; Crenshaw, V. 2002. The effects of mechanical damage to roof insulation, in *Proc. of 12th International Roofing and Waterproofing Conference* [online]. September 25–27, 2002, Orlando, USA National Roofing Contractors Association [cited 24 April 2008]. Available from Internet: <<http://www.nrca.net/rp/technical/techconf/7875.pdf>>.

Künzel, H. M. 2005. Adapted vapour control for durable building enclosures, in *Proc. of 10th International Conference on Durability of Building Materials and Components*. April 17–20, 2005, Lyon, France, TT2–86.

Kurbatskij, M. N.; Radionov, B. I.; Kudryashov, S. Yu.; Kryukov, M. Yu.; Kulpin, A. V.; Samojlov, Yu. A. 2002. Manufacturing of mineral wool products on basis of slags, *Metallurg* 1: 49 p.

Lapienis, B.; Keblikas, V.; Morgenshte, Y. 1991 03 23. *Unit for Prodn. of partially Oriented fibres – in which Fibre Carpet is passed Through Crimping Device Comprising Rotating Drum with Vertical Needles*. Int. C.: B28B-001/52. USSR Patent Office, SU1636213.

Larsen, R.; Hansen, J. D. 1997. *Orientation Analysis of Insulation Materials, A feasibility Study for Rockwool International A/S*. Copenhagen: Department of Mathematical Modelling, Technical University of Denmark. 48 p.

Lecron, J. 1979 01 24. *Process and Device for the Manufacture of Mineral-Fibre Structures in the form of Bands, Plates or Mats, the Fibres Being Positioned Practically Upright with Respect to the Large Surfaces*. Int. Cl.²: D04H 1/74. European Patent Office, EP0000378.

Lemineur, G.; Harba1, R.; Jennane, R. 2006. Anisotropy characterization of non stationary grey level textures, in *Proc. of 14th European Signal Processing Conference (EUSIPCO 2006)*: September 4–8, 2006, Florence, Italy.

Leth-Miller, R. 2002. *A Mathematical Model for a Mineral Producing Cupola Furnace*: Ph. D. Dissertation. Technical University of Denmark. Copenhagen: DTU. 156 p.

Lihe, W. 2007. On the Chinese insulation industry, *Global Insulation Magazine* October: 25–28.

Lindsley, C. H. 1951. Measurement of Fiber Orientation, *Textile Research Journal* 21: 39–46.

Liu, K.; Booth, R. J. 1999. Damage to Thermal Insulation Foams in Low-Slope Roof Systems Caused by Simulated Foot Traffic, *Journal of Thermal Envelope and Building Science* 22: 303–314.

Liukaitis, J.; Kleveckas, T. 2006. *Medžiagų tyrimo pagrindai*. Kaunas: Technologija. 73 p.

Low, N. M. P. 1984. The Degradation of thermal insulating mineral fibers, *Journal of Thermal insulation* 8: 116–126.

Low, N. M. P. 1986. Observation of chemical hydration in inorganic mineral fibres, *Journal of Materials Science* 21(3): 998–1004.

LST 1433:1996 Šilumos izoliacija. Statybinės šilumos izoliacinės medžiagos. Klasifikacija. Bendrieji techniniai terminai. Vilnius, 1996. 3 p.

LST EN 12085:2002 Statybiniai termoizoliaciniai gaminiai. Bandinių tiesinių matmenų nustatymas. Vilnius, 2002. 8 p.

LST EN 12430:2000 Statybiniai termoizoliaciniai gaminiai. Elgsenos veikiant sutelktajai apkrovai nustatymas. Vilnius, 2000. 10 p.

LST EN 13162:2009 *Termoizoliaciniai statybiniai gaminiai. Gamykliniai mineralinės vatos (MW) gaminiai. Techniniai reikalavimai*. Vilnius, 2009. 40 p.

LST EN 13820:2003 *Mineralinės vatos gaminyje esančių organinių medžiagų kiekio nustatymas*. Vilnius, 2003. 11 p.

LST EN 1602:1998 *Statybinės termoizoliacinės medžiagos. Tankio nustatymas*. Vilnius, 1998. 5 p.

LST EN 823:1997 *Statybinės šilumos izoliacinės medžiagos. Storio nustatymas*. Vilnius, 1997. 10 p.

LST EN 826:1998 *Statybinės termoizoliacinės medžiagos. Stiprio gniuždant nustatymas*. Vilnius, 1998. 12 p.

Lund, M. D.; Yue, Y. Z. 2008. Influences of chemical ageing on the surface morphology and crystallization behavior of basaltic glass fibers, *Journal of non-crystalline solids* 354(12–13): 1151–1154.

Malmberg, F.; Lindblad, J.; Östlund, C.; Almgren, K. M.; Gamstedt, E. K. 2008. An automated image analysis method for measuring fibre contact in fibrous and composite materials, in *Proc. of 13th European Conference on Composite Materials*: June 2–5, 2008, Stockholm, Sweden.

Malpezzi, J. 1991. Test methods for evaluating insulation for use with single-ply roofing systems, in *Proc. of the 3rd International Symposium on Roofing Technology*. April 17–19, 1991, Gaithersburg, USA, 124–132.

Mancino, N. 2008a. 3rd Global insulation conference, Barcelona 2008 – review, *Global Insulation Magazine* December: 18–20.

Mancino, N. 2008b. Global insulation conference 2007 Review, *Global Insulation Magazine* February: 21–24.

Martinėnas, B. 2004. *Eksperimento duomenų statistinė analizė*. Vilnius: Technika. 101 p.

Mennerich, F. A. 1936. A rapid microscopical measurement of diameter in cross-section, *Textile Research Journal* 6: 217–220.

Meres, O. 2000 12 07. *Mineral fibre insulating Board Comprising a rigid Surface Layer, a Process for the Preparation Thereof and a Use of the Insulating Product for Roofing and Facade Covering*. Int. Cl.⁷: E04B 1/80. The World Intellectual Property Organization, WO 00/73600.

Miniotaitė, R.; Stankevičius, V. 2001. *Pastatų sienų dažytų paviršių ilgaamžiškumas*. Kaunas: Technologija. 175 p.

Mohr, G. J.; Rowe, W. P. 1978. *Fiber Glass*. New York: Van Nostrand Reinhold company. 329 p.

Naujokaitis, A. 2007. *Medžiagų mokslas*. Vilnius: Technika. 270 p.

Nieminen, J.; Le Bell, J.; Westerlund, U.; Naerhi, E. 1995 10 17. *Flexible base web for a construction covering*. Int. Cl.6: B32B 5/26. United States Patent US5458960.

Noreng, K.; Time, B.; Kvande, T.; Uvsløkk, S. 2005. Moisture in compact roofs - results of a two-stage field survey, in *Proc. of 7th Symposium on Building Physics in the Nordic Countries* [online]. June 13–15, 2005, Reykjavík, Iceland [cited 25 September 2007]. Available from Internet: <<http://web.byv.kth.se/bphys/reykjavik>>.

Nørgaard, L.; Brandt, K.; Cridland, I. 1995 08 03. *Insulating Element and Method and Plant for Producing and Packaging*. Int. Cl.⁶: E04B 1/78. The World Intellectual Property Organization, WO 95/020708.

Novitskii, A. G.; Efrenov, M. V. 2006. A study of the fiber blowing process in the production of mineral wool, *Refractories and Industrial Ceramics* 47(2): 121–124.

NT Build 434 Roofing membrane Underlay (Insulation Material): Ageing Due to Increased Humidity and Heat. Espoo, 1995. 2 p.

Ohberg, I. 1987. Technological development of the mineral wool industry in Europe, *The Annals of Occupational Hygiene* 31(4B): 529–545.

Ohe, R. 2003. *Simulation of Glass Fiber Forming Process*: Ph. D. Thesis. Aalborg University. Aalborg. 190 p.

Ohmura, T.; Tsuboi, M.; Tomimura, T. 2002. Estimation of the Mean Thermal Conductivity of Anisotropic Materials, *International Journal of Thermophysics* 23(3): 843–853.

Palmer, J. 2003. *Low Slope Roof Systems*. Hertfordshire: Faber Maunsell Ltd. 30 p.

Papadopoulos, A. M.; Avgelis, A.; Karamanos, A.; Hadiarakou, S.; Nikolopoulos, Ch.; Pematzoglu, H. 2005. Composite insulating materials as a tool for the reduction of cooling loads, in *Proc. of the 1st International Conference "Passive and Low Energy Cooling for the Built Environment"*: vol. I. Ed. By M. Santamouris. May 19–21, 2005, Santorini Island, Greece, 803–808.

Papadopoulos, A. M.; Karamanos, A.; Avgelis, A. 2002. Environmental impact of insulating materials at the end of their useful lifetime", in *Proc. of Int. Conf. „Protection and Restoration of the Environment VI“*: July 1–5, 2002, Skiathos, Greece, 1625–1632.

Paukštys, V.; Stankevičius, V. 2001. Vėjo slėgio ir jo greičio kitimo lyjant analizė, *Statyba* [Civil Engineering] 7(1): 68–72.

Perelkin, K. E.; Savitskii, A. V. 1976. Heterogeneity of the macrostructure as a factor in achieving limiting physicomechanical indices in the orientation process of fibres and films, *Fibre Chemistry* 8(4): 422–425.

Pourdeyhimi, B.; Kim, H. S. 2002. Measuring Fiber Orientation in Nonwovens: The Hough Transform, *Textile Research Journal* 72(9): 803–809.

Pourdeyhimi, B.; Mazé, B.; Tafreshi, H. V. 2006. Simulation and Analysis of Unbonded Nonwoven Fibrous Structures, *Journal of Engineered Fibers and Fabrics* 1(2): 48–65.

Purnell, P. 2004. Interpretation of climatic temperature variations for accelerated ageing models, *Journal of Materials Science* 39: 113–118.

Ramanauskas, J.; Stankevičius, V. 2000. *Pastatų sienų šiltinimo sistemų atsparumas klimato poveikiams*. Kaunas: Technologija. 142 p.

Rao, B. N.; Akbar, S.; Altan, M. C. 1991. A Comparative Study on the Solution Techniques for Fiber Orientation in Two-Dimensional Converging and Diverging Flows, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, (4): 311–348.

Rockwool AB. 1975 07 09. *Method of Manufacturing a substantially Porous Block of Mineral Wool Fibres*. Int. Cl.²: B32B 5/12. The Patent Office London, GB1400692.

RSN 156-94 *Statybinė klimatologija*. Vilnius, 1995. 136 p.

Sadūnas, A. 1997. *Aliumosilikatinių dirbinių ilgaamžiškumas*. Vilnius: VPU leidykla. 252 p.

Sakalauskas, V. 2003. *Duomenų analizė su Statistica*. Vilnius: Margi raštai. 235 p.

Schneider, K.; Lauke, B. 2007. Determination of compressive properties of fibre-reinforced polymers in the in-plane direction according to ISO 14126. Part 2: a critical investigation of failure behaviour, *Applied Composite Materials* 14: 177–191.

Sezemanas, G.; Kerienė, J.; Sinica, M.; Laukaitis, M.; Mikulskis, D. 2005. The alkali and temperature resistance of some fibres, *Materials Science (Medžiagotyra)* 11(1): 29–35.

Skripkiūnas, G. 2007. *Statybinių konglomeratų struktūra ir savybės*. Kaunas: Vitae Litera, 334 p.

Skripnikova, N. K.; Nikiforov, A. A.; Volokitin, O. G. 2008. Electroplasma facility for obtaining mineral fiber from refractory silicate-containing materials, *Glass and Ceramics* 65(11–12): 393–395.

Spon, E.; Haldane, R.; George, C.; Lock, W. 1889. *Workshop Receipts*. London: E. & F. N. Spon, Item notes: v. 3

STR 2.05.02:2008 *Statinių konstrukcijos. Stogai*. Vilnius, 2009. 37 p.

STR 2.05.04:2003 *Poveikiai ir apkrovos: statybos techninis reglamentas*. Vilnius, 2003. 105 p.

Strazdas, K. 1998. *Stiklo ir jo gaminių cheminė technologija*. Kaunas: Technologija. 503 p.

Strazdas, K.; Eidukevičius, J. 1985. *Mineralinis ir stiklo pluoštas*. Vilnius: Mokslas. 224 p.

Structure of materials (anisotropy and isotropy) [online]. 2007. NTD Resource centre. [cited 1 August 2007]. Available from Internet: <<http://www.ndted.org/EducationResources/CommunityCollege/Materials/Structure/anisotropy.html>>.

Šiaučiūnas, R.; Štuopys, A. 1998. *Ugniai atsparios medžiagos*. Kaunas: Technologija. 278 p.

Širop, B.; Blagojević, B.; Bullen, P. 2008. *Mineral wool: Production and Properties*. Cambridge: Woodhead publishing limited. 192 p.

Talbot, H.; Lee, T.; Jeulin, D.; Hanton, D.; Hobbs, L. W. 2000. Image analysis of insulation mineral fibres, *Journal of Microscopy* 2000(3): 251–268.

Tamulevičius, S.; Jucius, D. 2007. *Medžiagų mokslas*. Kaunas: Vitae Litera. 198 p.

Tarnow, V. 2002. Measurement anisotropic air flow resistivity and sound attenuation of glass wool, *Journal of Acoustical Society of America* 111(6): 2735–2739.

Tien-Sheng, C.; Jung-Fu, C.; Paul, C. C.; Hsiu-Lan, L. 1996 09 24. *A Method for Producing a Corrugated Resin-Bonded or Thermo-Bonded Fiberfill and the Structure Produced Thereby*. Int. Cl.⁶: D04H 1/70. United States Patent, US5558924.

Tomadakis, M.; Robertson, T. 2005. Viscous permeability of random fiber structures: comparison of electrical and diffusional estimates with experimental and analytical results, *Journal of Composite materials* 39(2): 163–188.

Veisheh, S.; Mirmohamadi, M. M.; Khodabandeh, N.; Hakkaki-Fard, A. 2007. Assessment of parameters affecting compressive behavior of mineral wool insulations, *Asian Journal of Civil Engineering (Building and Housing)* 8(4): 359–373.

Vilys, J. S. 2007. *Paviršinio sluoksnio įtaka metalo mechaninėms savybėms: habilitacijos procedūrai teikiamų mokslo darbų apžvalga*. Kaunas: Technologija. 47 p.

Vrána, T. 2005. Impact of moisture on long term performance of insulating products, in *Proc. of 7th Symposium on Building Physics in the Nordic Countries* [online]. June 13–15, 2005, Reykjavík, Iceland [cited 2 February 2007]. Available from Internet: <<http://web.byv.kth.se/bphys/reykjavik>>.

Vrána, T. 2007. *Impact of Moisture on long Term Performance of insulating Products Based on Stone Wool*: Licentiate Thesis. The Royal Institute of Technology. Stockholm: KTH. 74 p.

Vrána, T.; Björk, F. 2009. Frost formation and condensation in stone-wool insulations, *Construction and Building Materials* 23: 1775–1787.

Vrček, J. B.; Rebec, M.; Marjanović, Ž. 2009. *Optimal Selection of Roof Layers* [online]. University of Zagreb The Faculty of Architecture [cited 25 September 2009]. Available from Internet: <http://houg.hr/sesta/Bertol_Vrcek.pdf>.

Wakili, K. G.; Frank, Th. 2004. A humidity dependent vapour retarder in non-ventilated flat roofs. In situ measurements and numerical analysis, *Indoor and Built Environment* 13(6): 433–441.

Wallace, R. J. 1982. Insulation board in roofing systems: More than thermal barrier, *Journal of thermal insulation* 5: 198–208.

Witz, J. F.; Roux, S.; Hild, F.; Rieunier, J. B. 2008. Mechanical properties of crimped mineral wools: Identification from digital image correlation, *Journal of Engineering Materials and Technology* 130(2): 1–7.

Wyss, P.; Zimmermann, F. 1997 10 02. *Process and Apparatus for the Production of Mineral Fibreboard*. Int. Cl.: D04H 1/70. The World Intellectual Property Organization, WO 97/036034.

Wood, E. J.; Hodgson, R. M. 1989. Carpet texture measurement using image analysis, *Textile Research Journal* 59: 1–12.

World Health Organization [online] 1998. [cited 4 November 2008]. Available from Internet: <<http://www.inchem.org/documents/ehc/ehc/ehc77.htm>>

Zak, G.; Park, C. B.; Benhabib, B. 2001. Estimation of three-dimensional fibre-orientation distribution in short-fibre composites by a two-section method, *Journal of Composite Materials* 35(04): 316–339.

Zeleniakienė, D.; Kleveckas, T.; Liukaitis, J. 2005. The effect of loading direction and pores distribution mode on porous polymer material stress concentration, *Materials Science (Medžiagotyra)* 11(2): 123–128.

Zhu, Y. T.; Blumenthal, W. R.; Lowe, T. C. 1997. Determination of non-symmetric 3-D fiber-orientation distribution and average fiber length in short-fiber composites, *Journal of Composite Materials* 31(13): 1287–1301.

Zirkelbach, D.; Holm, A.; Künzel, H. M. 2005. Influence of temperature and relative humidity on the durability of mineral wool in ETICS, in *Proc. of 10th International Conference on Durability of Building Materials and Components*. April 17–20, 2005, Lyon, France, TT2–87.

Zirkelbach, D.; Künzel, H. M.; Bludau, Ch. 2008. Results of measured and simulated hydrothermal loads acting on mineral fiber insulation suggest a revision of durability test, in *Proc. of 8th Symposium on Building Physics in the Nordic Countries* [online]. June 16–18, 2008, Copenhagen, Denmark [cited 12 January 2009]. Available from Internet: <<http://web.byv.kth.se/bphys/copenhagen>>.

Žiliukas, A. 2008. *Tamprumo ir platiškumo teorija*. Vilnius: Vilniaus pedagoginio universiteto leidykla. 432 p.

Артемьев, В. М. 2005. Оборудование для модернизации минеральноватной технологии, *АО Теплопроект* [interaktyvus]. [žiūrėta 2005 11 24]. Prieiga per internetą: <<http://www.cnt.ru/users/thermo-tp/teploproekt/links/artemyev.htm>>.

Берестова, С. А. 2006. *Деформационная анизотропия объемно-изотропных структурно неоднородных сред*: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. Уральский государственный технический университет. Екатеринбург: УМЦ УПИ. 30 с.

Бобров, Ю. Л. 1987а. *Долговечность теплоизоляционных минераловатных материалов*. Москва: Стройиздат. 168 с.

Бобров, Ю. Л. 1987б. *Минераловатные изделия с повышенными эксплуатационными свойствами*: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. Москва: МИСИ. 35 с.

Бобров, Ю. Л.; Петухова, Е. Ю. 2006. О современных проблемах долговечности волокнистых теплоизоляционных материалов в стр. констр., в кн. *Эффективные тепло- и звукоизоляционные материалы в современном строительстве и ЖКХ* [interaktyvus]. [žiūrėta 2009 11 11]. Prieiga per internetą: <<http://www.expo.mgsu.ru/index.php?option=content&task=view&id=795>>.

Бунятуев, С. Л.; Баянсайхан, Н. 2007. Получение теплоизоляционных материалов из базальта с применением электродуговой плазмы, *Материалы и технологии*, Сентябрь: 32–33.

Вайчюнас, Г. Ю.; Паулёнис, К. Я.; Шакманас, А. Т. 1987. Энергетические расходы при тепловой обработке минераловатных изделий, в кн. *Технология теплоизоляционных и акустических материалов на основе минеральной ваты: сборник научных трудов*. Вильнюс: ВНИИтеплоизоляция, 3–19.

Воронин, А. М.; Шитов, А. А.; Пешкова, А. В. 2007. Срок службы битуминозных и полимерных материалов в кровельном ковре (Часть I), *Строительные материалы* 1: 5–8.

Гликин, С. М. 2006. Эффективные теплоизоляционные материалы и их долговечность, в кн. *Эффективные тепло- и звукоизоляционные материалы в современном строительстве и ЖКХ* [interaktyvus]. [žiūrėta 2009 11 11]. Prieiga per internetą: <<http://www.expo.mgsu.ru/index.php?option=content&task=view&id=806>>.

Гнип, И. Я. 1983. Исследование прочности и деформативности минераловатных плит повышенной жесткости при местном сжатии, в кн. *Технология теплоизоляционных и акустических материалов на основе минеральной ваты: сборник научных трудов*. Вильнюс: ВНИИтеплоизоляция, 62–69.

Гнип, И. Я. 1985. Исследование остаточных деформаций при сжатии минераловатных плит повышенной жесткости, в кн. *Сборник трудов ВНИИтеплоизоляция*. Вильнюс: ВНИИтеплоизоляция, 127–131.

Гнип, И. Я. 1987. Длительная прочность минераловатных плит повышенной жесткости при сжатии, в кн. *Технология теплоизоляционных и акустических материалов на основе минеральной ваты: сборник научных трудов*. Вильнюс: ВНИИтеплоизоляция, 84–90.

Гнип, И. Я. 1988. Методика ускоренного определения влагостойкости минераловатных плит, в кн. *Технология теплоизоляционных и акустических материалов на основе минеральной ваты: сборник научных трудов*. Вильнюс: ВНИИтеплоизоляция, 93–103.

Гнип, И. Я.; Кершулис, В. И. 1999. Исследование влагостойкости минераловатных плит на лигносульфонатном связующем, *Строительные материалы* 11: 28–31.

Гнип, И. Я.; Кишонас, А. П.; Бирюк, А. И. 1988. Деформативность самонесущих минераловатных плит при изгибе, в кн. *Технология теплоизоляционных и акустических материалов на основе минеральной ваты: сборник трудов*. Вильнюс: ВНИИтеплоизоляция, 104–109.

Гончанюк, Ю. 2003. Теоретическое обоснование и проверка эффективности моделей перемещений и прыжков спортсменов в пляжном волейболе, в кн. *Физическое воспитание студентов творческих специальностей: сб. научн. тр.* Харьков: ХГАДИ (ХХПИ) 6: 72–87.

Горлов, Ю. П.; Меркин, А. П.; Устенко, А. А. 1980. *Технология теплоизоляционных материалов.* Москва: Стройиздат. 399 с.

Горяйнов, К. Э.; Горяйнова, С. К. 1982. *Технология производства материалов и изделий.* Москва: Стройиздат. 376 с.

Горяйнов; К. Э.; Коровникова, В. В. 1975. *Технология производства полимерных и теплоизоляционных изделий.* Москва: Высшая школа. 296 с.

ГОСТ 17177-94 *Материалы и изделия строительные теплоизоляционные. Методы испытаний.* Москва, 1994. 60 с.

ГОСТ 4640-93 *Вата минеральная. Технические условия.* Москва, 1993. 8 с.

Гурьев, В. В.; Непрошин, Е. И. 2007. Структура базальтовых газонаполненных изделий, в *Завод изоляции* [interaktyvus]. [žiūrėta 2007 09 30]. Prieiga per internetą: <www.basaltfibre.com/library/articles/svoystva.htm>.

Гусев, Б. В.; Езерский, В. А.; Монастырев, П. В. 2005. Теплопроводность минераловатных плит в условиях эксплуатационных воздействий, *Промышленное и гражданское строительство* 1: 48–49.

Дубровский, В. А.; Махова, М. Ф.; Рычко, В. А.; Дубровская, Т. С.; Бачило, Т. М.; Лыскж, А. Г.; Космина, Н. Е. 2005. Свойства расплавов основных магматических горных пород Украины и волокон на их основе, в *Завод изоляции* [interaktyvus]. [žiūrėta 2005 12 02]. Prieiga per internetą: <<http://basaltfibre.com/library/articles/rasplavi.htm>>.

Езерский, В. А.; Монастырев, П. В.; Серегин, С. И. 2008. Деформация минераловатных плит в условиях эксплуатационных воздействий, в кн. *Тамбовский государственный технический университет: ТРУДЫ ТГТУ (Выпуск 21).* Тамбов: Издательство ТГТУ, 191–195.

Заровнятных, В. А. 2003. Работы ОАО «УралНИИСтромпроект» по технологии производства минераловатных изделий, в кн. *Сообщение на научно-производственном совещании «Проблемы технического регулирования и сертификации продукции в производстве минеральной ваты»* [interaktyvus]. [žiūrėta 2007 02 23]. Prieiga per internetą: <<http://www.basalttech.org/news/160503/zarovnatnyh>>.

Заровнятных, В. А.; Пономарев, В. А.; Бирючев, В. И.; Деменев, Н. В. 2002. Опыт производства прошивных минераловатных матов с вертикальной ориентацией волокон, *Строительные материалы* 11: 17–19.

Зимин, Д. Е.; Фирсов, В. В. 2006. Экспериментальные и теоретические исследования по созданию эффективных утеплителей предназначенных для работы в условиях пониженных температур, в кн. *Сборник трудов всероссийского конкурса инновационных проектов студентов и аспирантов по приоритетному направлению «энергетика и энергосбережение»*: Сентябрь 26-27, 2006, Томск, Россия, 301–310.

Кишонас, А. П.; Гнип, И. Я. 1971. Минераловатный утеплитель для покрытий зданий без выравнивающего слоя, в кн. *Сборник трудов ВНИИтеплоизоляция*, выпуск 5. Вильнюс: ВНИИтеплоизоляция, 86–91.

Кишонас, А. П.; Живатова, Д. М. 1983. Влияние переменных температур на прочность минераловатных плит, в кн. *Технология теплоизоляционных и акустических материалов на основе минеральной ваты: сборник научных трудов*. Вильнюс: ВНИИтеплоизоляция, 70–73.

Кудзявичюс, Г. Б.; Гваздаускас, П. Ю. 1987. Технология производства минераловатных плит с вертикально ориентированным волокном, в кн. *Технология теплоизоляционных и акустических материалов на основе минеральной ваты: сборник научных трудов*. Вильнюс: ВНИИтеплоизоляция, 66–68.

Кутьев, С. П. 2007а. *Эффективные двухслойные минераловатные изделия*: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Московский государственный строительный университет. Москва: МГСУ. 18 с.

Кутьев, С. П. 2007б. Комплексная оценка конструктивной эффективности минераловатной плиты, *Строительные материалы* 8: 68–69.

Лыков, А. В. 1978. *Тепломассообмен*. Москва: Энергия. 480 с.

Миронов, В.; Тарасевич, К. 2005. Промышленность теплоизоляционных материалов. Современное состояние и перспективы развития, в *АООТ Центр информации и экономических исследований в стройиндустрии – ВНИИЭСМ* [interaktyvus]. [žiūrėta 2005-11-22]. Prieiga per internetą: <<http://www.stroyinform.ru/ststi/str mos/27 1999/14.stm00>>.

Овчаренко, Е. Г. 2003. Тенденции в развитии производства утеплителей в России, в *Проектирование и строительство в Сибири* [interaktyvus]. [№] 2(14). [žiūrėta 2004 02 24]. Prieiga per internetą: <<http://sv.as-stroi.ru/pss/perechen.shtml>>.

Огурцова, Т. 2006. *Метод обследования опорно-двигательного аппарата человека по отпечаткам стоп в динамике и синтез бионических стелек*: реферат промоционной работы, Рижский технический университет. Рига: РТУ. 87 р.

Пономарев, В. Б. 2006. Совершенствование технологии производства и повышение качества теплоизоляционных и композиционных материалов на основе стеклянного и минерального волокна, в кн. *Эффективные тепло- и звукоизоляционные материалы в современном строительстве и ЖКХ* [interaktyvus]. [žiūrėta 2009 11 11]. Prieiga per internetą: <<http://www.expo.mgsu.ru/index.php?option=content&task=view&id=801>>.

Потапов, М. Г.; Татаринцева, О. С.; Корнев, Г. В. 2008. Сравнительная оценка эксплуатационных свойств волокнистых теплозвукоизоляционных материалов, в *Корда* [interaktyvus]. [žiūrėta 2008 02 18]. Prieiga per internetą: <http://www.korda.ru/articles/basaltin_leader.htm>.

Пустовгар, Е. А. 2007. Исследование коррозионной стойкости базальтовых волокон в кислых и щелочных средах, в кн. *Летняя студенческая научно-практическая конференция ФНМ 2007: сборник тезисов докладов 28 июня 2007 г.* Москва, Россия. 16–30.

Радченко, П. А.; Радченко, А. В. 2005. Особенности разрушения тел с преимущественной ориентацией прочностных свойств при ударе, в кн. *Сб. тез. докладов VIII Международной конференции «Забабахинские научные чтения»*: Сентябрь 5–9, 2005, Снежинск, Россия. 1–5.

Российский рынок теплоизоляционных материалов под влиянием кризиса: современное состояние, тенденции и перспективы развития [interaktyvus]. 2009. Discovery Research Group [žiūrėta 2009 10 08]. Prieiga per internetą: <<http://market.og-irk.ru/getresearch.php?id=3844&h=market.og-irk.ru>>.

Рыбьев, И. А. 2003. *Строительное материаловедение*. Москва: Высшая школа. 701 с.

Склизов, Н. И. 1966. *Исследование нового способа введения синтетических связующих в минераловатный ковер*: автореферат. дис. канд. техн. наук., 20 с.

Скокина, Р. Е.; Ворончихина, Л. И. 2002. Электро-микроскопическое исследование структуры и топографии поверхностей медненных стеклянных волокон, *Химия и химические технологии* 45 (2): 123–125.

Сосунов, Е. 2005. Надежность систем наружного утепления, *Белорусский строительный рынок* 3–4: 11–15.

Спирин, Ю. Л. 1975. *Справочник по производству теплоизоляционных материалов*. Москва: Стройиздат. 432 с.

Татаринцева, О. С.; Углова, Т. К.; Игонин, Г. С.; Иголина, Т. К.; Бычин, Н. В. 2004. Определение сроков эксплуатации базальтоволоконистых теплоизоляционных материалов, *Строительные материалы* 11: 14–15.

Тенденции на мировом рынке теплоизоляции [interaktyvus]. 2009. Ants-Network [žiūrėta 2009 10 08]. Prieiga per internetą: <<http://promoboru.ru/statyi.php?url=tendentsii-na-mirovom-rynke-teploizolyatsii>>.

Ушков, Ф. В. 1975. *Методика исследования долговечности при одностороннем попеременном замораживании и оттаивании в воздушной среде. Новые методы и приборы для определения качества изделий и конструкций и исследований строительных материалов*. Киев.

Федорова, Т. П. 2005. Современные способы получения минераловатных изделий (обзор), в *Базальт России. Наука* [interaktyvus]. [žiūrėta 2005 01 09]. Prieiga per internetą: <<http://www.basalt.permonline.ru/ru/ru science 21.htm>>.

Фильков, М. А. 1968. *Исслед. влияния режимов термо-обработки на мех. св-ва и старение теплоиз. минераловатных плит на синтез. связующих*: диссертация.

Чепулис, А. В.; Шойхет, Б. М. 2006. Динамика развития теплоизоляционной отрасли российской экономики в 2001–2006 г.г., в *Эффективные тепло- и звукоизоляционные материалы в современном строительстве и ЖКХ* [interaktyvus]. [žiūrėta 2009 11 11]. Prieiga per internetą: <<http://www.expo.mgsu.ru/index.php?option=content&task=view&id=791>>.

Широкородюк, В. К. 2005. Влияние параметров волокнистых плит слоистой структуры на эквивалентный размер пор минераловатного утеплителя, *Научный журнал Кубанского государственного аграрного университета* 15(07): 1–8.

Широкородюк, В. К. 2007а. Влияние структурного фактора на теплопроводность эффективных минераловатных теплоизоляционных строительных материалов, *Научный журнал Кубанского государственного аграрного университета* 27(03): 1–5.

Широкородюк, В. К. 2007б. Влияние ориентации волокнистой структуры на прочность минераловатного утеплителя повышенной жесткости, *Научный журнал Кубанского государственного аграрного университета* 26(2): 1–9.

Шойхет, Б. М. 2009. Структура и проницаемость волокнистых теплоизоляционных материалов, *Строительные материалы* 1: 64–66.

Autoriaus publikacijos disertacijos tema

Straipsniai recenzuojamuose mokslo žurnaluose

Buska, A.; Lybye, D.; Mačiulaitis, R. 2008. Effect of dynamic load on value of point load of mineral wool boards, *Material science (Medžiagotyra)* 14(3): 268–272. ISSN1392–1320 (Thomson ISI Web of Science).

Buska, A.; Mačiulaitis, R. 2007a. The compressive strength properties of mineral wool slabs: influence of structure anisotropy and methodical factors, *Journal of Civil Engineering and Management* 13(2): 97–106. ISSN 1392-3730 (INSPEC).

Buska, A.; Mačiulaitis, R. 2007b. Investigation of the compressive stress of the layered-structure dual-density mineral wool slabs, *Material science (Medžiagotyra)* 13(4): 322–325. ISSN 1392–1320 (Thomson ISI Web of Science).

Straipsniai kituose leidiniuose

Paukštys, V.; Šeduikytė, L.; Buska, A. 2007. The distribution of temperature and moisture in the construction of roof when mineral wool slabs with air channels are used, in *The 9th international conference “Modern Building materials, Structures and Techniques”*. Vilnius: Technika, 131–135. ISBN 978-9955-28-198-6 (Thomson ISI Proceedings).

Buska, A. 2007. Effect of the point load on the mineral wool products of different structure, iš *10-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“ pranešimų medžiaga*. Vilnius: Technika, 16–23. ISBN 978-9955-28-163-4.

Buska, A. 2006. Mineralinės vatos plokščių stipruminių savybių priklausomybė nuo plaušų orientacijos gaminio struktūroje, iš *9-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“ pranešimų medžiaga*. Vilnius: Technika, 13–19. ISBN 9955-28-047-6.

Buska, A.; Gailius, A. 2005. Akmens vatos plokščių gniuždomojo įtempio nustatymas pagal skirtingus standartus, iš *8-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Lietuva be mokslo – Lietuva be ateities“ pranešimų medžiaga*. Vilnius: Technika, 3–11. ISBN 9986-05-893-7.

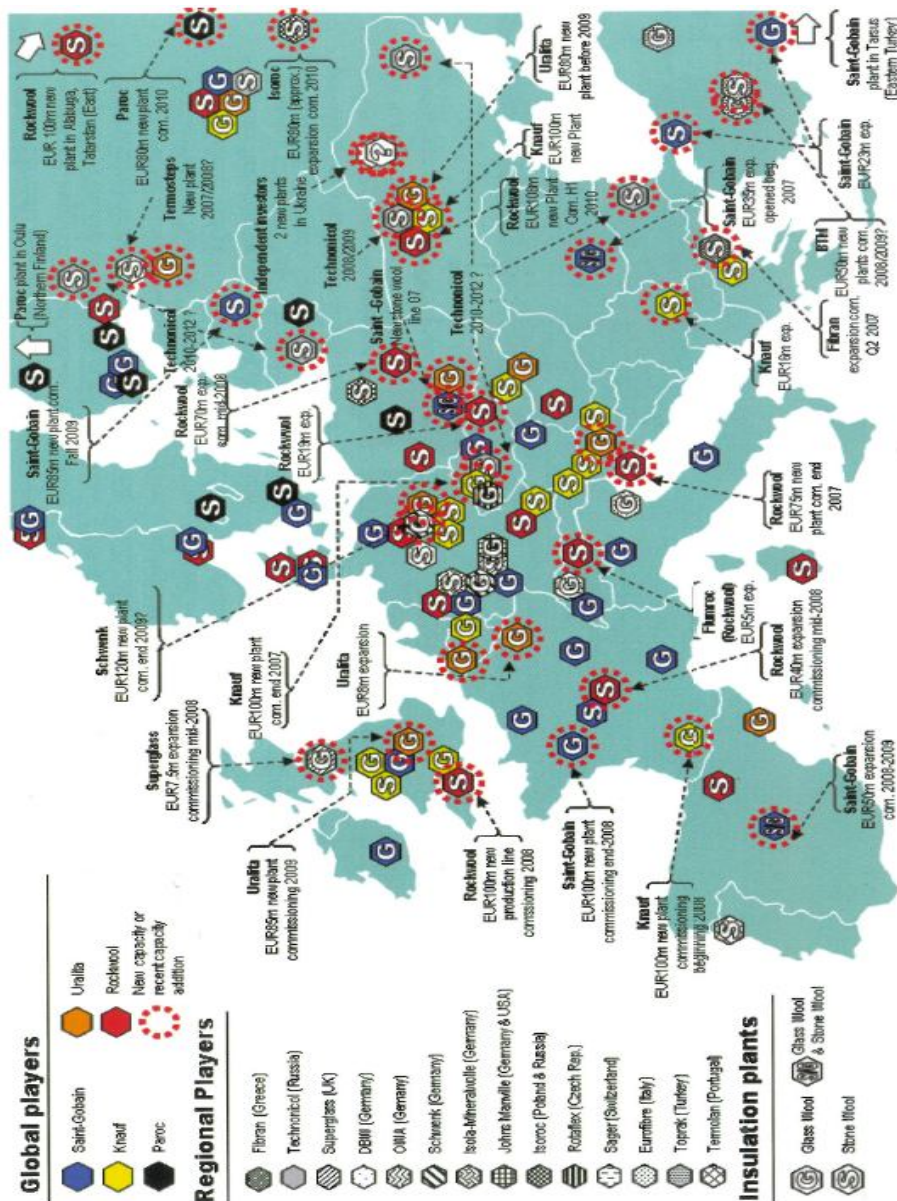
Buska, A. 2005. Metodinių veiksnių įtaka akmens vatos gniuždomajam stipriui, iš *Konferencijos „Pažangioji statyba“ pranešimų medžiaga*. Kaunas: Technologija, 84–93. ISBN 9955-09-851-1.

Patentas

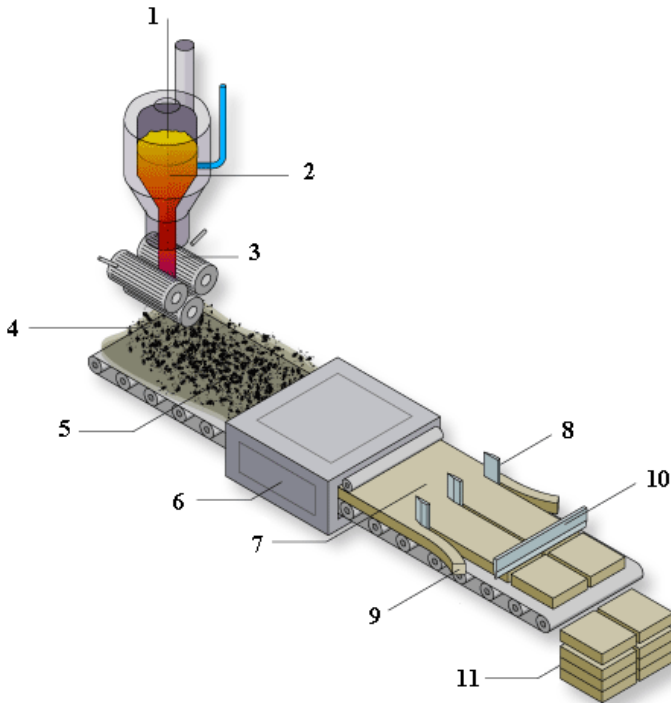
Buska, A.; Mačiulaitis, R. 2010 04 19. *Mineralinės vatos gaminių fizikinių ir mechaninių savybių nustatymo būdas*. Lietuvos Respublikos valstybinis patentų biuras. Paraiškos Nr. 2010 032.

Priedai

A priedas. Mineralinės vatos gamintojų geografinis išsidėstymas Europoje (2008 m. duomenys) ir numatytos investicijos į gamybos vietas



B priedas. Technologinė akmens vatos gaminių gamybos schema



- 1 – žaliavinių medžiagų įkrovos subėrimas;
- 2 – lydalo susidarymas;
- 3 – plaušinimas ir organinių medžiagų įpurškimas;
- 4 – susidariusių plaušų nukreipimas ir surinkimas;
- 5 – pirminio ir (arba) antrinio (apdorojant mechaninės apkrovos įrenginiais) pluošto kldo formavimas;
- 6 – terminis apdorojimas (kietinimas);
- 7 – sukietėjęs reikiamo tankio ir storio nepertraukiamų matmenų mineralinis pluoštas;
- 8 – išilginis pjaustymas;
- 9 – atliekų surinkimas antriniam perdirbimui;
- 10 – skersinis pjaustymas;
- 11 – gaminių pakavimas.

Andrius BUSKA

MAKROSTRUKTŪROS IR KITŲ FIZINIŲ SAVYBIŲ ĮTAKA
MINERALINĖS VATOS GAMINŲ GNIUŽDYMO RODIKLIAMS

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai,
statybos inžinerija (02T)

Andrius BUSKA

THE INFLUENCE OF MACROSTRUCTURE AND OTHER PHYSICAL
CHARACTERISTICS ON COMPRESSIVE PARAMETERS
OF MINERAL WOOL PRODUCTS

Doctoral Dissertation

Technological Sciences,
Civil Engineering (02T)

2010 05 03. 17,25 sp. l. Tiražas 20 egz.
Vilniaus Gedimino technikos universiteto
leidykla „Technika“,
Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius,
<http://leidykla.vgtu.lt>
Spausdino UAB „Biznio mašinų kompanija“,
J. Jasinskio g. 16A, 01112 Vilnius