VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Mindaugas GRIGONIS

PLIENINIŲ KONSTRUKCIJŲ PRIEŠGAISRINIŲ DANGŲ ATSPARUMO UGNIAI TYRIMAI

DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,
MEDŽIAGŲ INŽINERIJA (08T)

LEIDYKLA
Vilnius TECHNIKA 2012

Disertacija rengta 2007–2012 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.

Mokslinis vadovas

prof. habil. dr. Romualdas MAČIULAITIS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, medžiagų inžinerija – 08T).

VG TU leidyklos TECHNIKA 2046-M mokslo literatūros knyga
<http://leidykla.vgtu.lt>

ISBN 978-609-457-331-6

© VG TU leidykla TECHNIKA, 2012
© Mindaugas, Grigonis, 2012
mindaugas.grigonis@vgtu.lt

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Mindaugas GRIGONIS

FIRE RESISTANCE RESEARCHES OF FIRE PROTECTIVE COATINGS FOR STEEL CONSTRUCTIONS

DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,
MATERIALS ENGINEERING (08T)

Vilnius LEIDYKLA
TECHNIKA 2012

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2007–2012.

Scientific Supervisor

Prof Dr Habil Romualdas MAČIULAITIS (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Materials Engineering – 08T).

Reziumė

Disertacijoje nagrinėjamas priešgaisrinių išsipučiančių dažų dangų atsparumas ugniai, keliais skirtingo intensyvumo ir pobūdžio temperatūriniais veikimo režimais modeliuojant eksploatacinį poveikį. Iki šiol dažų dangų atsparumas išoriniams aplinkos veiksniams buvo mažai tirtas. Pagrindinė tyrimų tematika – priešgaisrinių išsipučiančių dažų dangų atsparumo ugniai priklausomybės nuo eksploataavimo laiko nustatymas. Disertacijoje sprendžiamas uždavinys – ištirti dirbtinai sendintų priešgaisrinių išsipučiančių dangų be ir su papildomomis apsauginėmis dangomis termines savybes. Disertaciją sudaro įvadas, penki skyriai, bendrosios išvados, naudotos literatūros ir disertacijos autoriaus publikacijų sąrašai ir priedai.

Įvadiniam skyriuje aptariama tiriamoji problema, darbo aktualumas, aprašomas tyrimų objektas, formuluojamas darbo tikslas ir uždaviniai, aprašoma tyrimų metodika, darbo mokslinis naujumas, darbo rezultatų praktinė reikšmė, ginamieji teiginiai.

Pirmasis skyrius skirtas literatūros analizei. Skyriaus pabaigoje pateikiamos išvados ir formuluojami disertacijos uždaviniai.

Antrajame skyriuje apžvelgiamos naudotos medžiagos ir bandinių paruošimo ypatumai, tyrimų metodai ir įranga.

Trečiajame skyriuje aprašyta metodinių veiksnių įtaka įvertinant priešgaisrinių dangų atsparumo ugniai savybes. Nustatyta priklausomybė tarp priešgaisrinės išsipučiančios dangos susidariusios putos ir plieninės konstrukcijos atsparumo ugniai.

Ketvirtajame skyriuje pateikiami priešgaisrinių išsipučiančių dažų dangų kontrolinių, dirbtinai ir natūraliai sendintų bandinių atsparumo ugniai aprašymai, analizuojama papildomos apsauginės dangos įtaka putos susidarymui, taip pat šių dangų degumo ir toksiškumo charakteristikos.

Penktajame skyriuje aptariami priešgaisrinių išsipučiančių dangų paviršiaus pažeidimai bei aprašytas destrukcijos mechanizmas.

Darbo pabaigoje suformuluotos bendrosios išvados.

Disertacijos tema paskelbtas vienas straipsnis, kuris įtrauktas į *Thomson ISI Web of Science* sąrašą, trys – *IndexCopernicus* duomenų bazėje cituojamuose žurnaluose, vienas straipsnis tarptautinės konferencijos recenzuojamoje medžiagoje, du – kituose leidiniuose. Disertacijos tema perskaityta trylika pranešimų Lietuvos ir užsienio konferencijose. Remiantis tyrimų rezultatais parengtos ir patvirtintos dvi metodikos skirtos priešgaisrinių išsipučiančių dangų identifikavimui ir priežiūrai.

Abstract

The researches described in the dissertation were aimed at assessing the fire resistance of intumescent fire protective coatings by simulating the operating impact in several temperature effect modes of different intensity and character. So far, research of the resistance of coatings to external environmental factors was limited. The main subject matter of the dissertation is the determination of the dependency of the fire resistance of intumescent fire protective coatings on the operating time. The dissertation resolves the following task: to study the thermal properties of intumescent fire protective coatings without and with additional protective coating. The dissertation consists of the introduction, five chapters, general conclusions, bibliography, and list of the publications of the author of the dissertation as well as appendices. The introductory chapter discusses the problem under research, relevance of the study, describes the object of researches, formulates the goal and tasks of the study, describes the methodology of researches, scientific novelty of the study, practical significance of the study results, and hypotheses. The first chapter is dedicated to the analysis of literature. At the end of the chapter, conclusions are presented and tasks of the dissertation are formulated. The second chapter provides a review of the materials applied and specifics of the preparation of samples as well as methods and equipment of researches. The third chapter describes the impact of methodological factors in the evaluation of the fire resistance properties of fire protective coatings and establishes dependency between the foam forming from intumescent fire protective coating and fire resistance of steel structures.

The fourth chapter provides descriptions of reference, artificially and naturally aged samples of various intumescent fire protective coatings and analysis of the impact of additional protective coating on the formation of foam as well as flammability and toxicity characteristics of those coatings.

The fifth chapter discusses surface defects of intumescent fire protective coatings and describes the mechanism of destruction.

At the end of the study, general conclusions are formulated.

One article, which is included in the list of *Thomson ISI Web of Science*, three in journals quoted in *IndexCopernicus* database, one article in international conference on peer-reviewed material, and two in other publications have been published on the topic of the dissertation. Thirteen reports were presented on the topic of the dissertation at Lithuanian and foreign conferences. Two methodologies intended for the identification and maintenance of intumescent fire protective coatings have been prepared and approved on the basis of the results of the researches.

Žymėjimai

Simboliai

t – laikas, min

T – krosnies temperatūra, pasiekta per laiką t , °C

T_o – pradinė krosnies temperatūra, °C

A_p – konstrukcijos elemento skerspjūvio perimetras, m

V – konstrukcijos elemento skerspjūvio plotas, m²

h_{dc} – sausos dangos storis, μm

t_{fr} – kritinės 500 °C temperatūros pasiekimo laikas, min

h_f – susidariusios termoizoliacinės putos storis, mm

t_{am1} – atsparumas ugniai po 60 ciklų pagal I režimą, min

t_{am2} – atsparumas ugniai po 60 ciklų pagal II režimą, min

t_{fran} – atsparumas ugniai po 12 mėn. natūralaus sendinimo, min

n_{am1} – dirbtinių sendinimo ciklų skaičius pagal I režimą

$R90$ – elementas, standartinio gaisro sąlygomis atitinkantis laikomosios galios R kriterijų 90 min

$E15$ – elementas, standartinio gaisro sąlygomis atitinkantis vientisumo E kriterijų 15 min

$II5$ – elementas, standartinio gaisro sąlygomis atitinkantis šilumos izoliavimo I kriterijų 15 min

B – degumo klasė, kai $FIGRA_{0,2MJ} \leq 120$ W/s; $LFS <$ bandinio kraštas; $THR_{600s} \leq 7,5$ MJ ir $F_S \leq 150$ mm ne ilgiau kaip 60 s

C – degumo klasė, kai $FIGRA_{0,4MJ} \leq 250$ W/s; $LFS <$ bandinio kraštas; $THR_{600s} \leq 15$ MJ ir $F_S \leq 150$ mm ne ilgiau kaip 60 s

D – degumo klasė, kai $FIGRA_{0,4MJ} \leq 750$ W/s ir $F_S \leq 150$ mm ne ilgiau kaip 60 s

s_1 – dūmų susidarymo įvertinimo kriterijus, kai $SMOGR_A \leq 30 \text{ m}^2/\text{s}^2$ ir $TSP_{600s} \leq 50 \text{ m}^2$
 s_2 – dūmų susidarymo įvertinimo kriterijus, kai $SMOGR_A \leq 180 \text{ m}^2/\text{s}^2$ ir $TSP_{600s} \leq 200 \text{ m}^2$
 d_0 – liepsnojančių lašelių arba dalelių įvertinimo kriterijus, kai trumpiau kaip per 600 s nėra liepsnojančių lašelių arba dalelių
 R – koreliacijos koeficientas
 R^2 – determinacijos koeficientas
 S_e – vidutinis standartinis nuokrypis

Santrumpos

$FIGRA_{0,2 \text{ MJ}}$ – didžiausias bandinio šilumos išsiskyrimo greičio ir trukmės santykis taikant 0,2 MJ THR slenkstį, W/s

$FIGRA_{0,4 \text{ MJ}}$ – didžiausias bandinio šilumos išsiskyrimo greičio ir trukmės santykis taikant 0,4 MJ THR slenkstį, W/s

HRR – šilumos išsiskyrimo greitis, kW/m² (apibrėžiamas kaip šilumos kiekis, kuris išsiskirs per tam tikrą laiką degant tam tikrai medžiagai) (angl. heat release rate)

$HRR_{\max}$ – didžiausias šilumos išsiskyrimo greitis, kW/m² (angl. maximum heat release rate)

LFS – šoninis liepsnos sklidimas, m (angl. lateral flame spread)

$SMOGR_A$ – dūmų kiekio padidėjimo rodiklis, m²/s²

SPR – dūmų susidarymo greitis, m²/s (angl. smoke production rate)

THR – visa išskirtoji šiluma, MJ/m² (angl. total heat rate)

THR_{600s} – visa šiluma, išskirta iš bandinio per 600 s nuo veikimo pagrindinio degiklio liepsna pradžios, MJ (angl. total heat rate within 600 s)

$T_{HRR_{\max}}$ – laikas, per kurį pasiekiamas didžiausias šilumos išsiskyrimo greitis, s (angl. time to reach maximum heat release rate)

TSP_{600s} – suminis dūmų, susidarančių iš bandinio per 600 s nuo veikimo pagrindinio degiklio liepsna pradžios, kiekis, m² (angl. total smoke production within 600 s)

SBI – vieno degančio objekto bandymo metodas (angl. single burning item)

$ASTM$ – Amerikos bandymų ir medžiagų tyrimo draugija (angl. American society for testing and materials research society)

IMO – tarptautinė jūrų organizacija (angl. international maritime organization)

RWS – Olandijoje taikoma gaisro kreivė tuneliams (ol. Rijkswaterstaat);

$RABT$ – Vokietijoje taikoma gaisro kreivė tuneliams (vok. Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen);

$FT-IR$ – Furjė transformacijos molekulinės absorbcinės mikrospektroskopijos infraraudonojoje spektro srityje metodas

SEM – skenuojantis elektroninis mikroskopas

GTC/GBM – Gaisrinių tyrimo centro gaisrinio bandymo metodika

Turinys

IVADAS	1
Problemos formulavimas	1
Darbo aktualumas	2
Tyrimų objektas	2
Darbo tikslas	2
Darbo uždaviniai	2
Tyrimų metodika	3
Darbo mokslinis naujumas	3
Darbo rezultatų praktinė reikšmė	4
Ginamieji teiginiai	4
Darbo rezultatų aprobavimas	4
Disertacijos struktūra	6
1. PRIEŠGAISRINIŲ DANGŲ SKIRTŲ PLIENINIŲ KONSTRUKCIJŲ APSAUGAI APŽVALGA	7
1.1. Plieninių konstrukcijų atsparumas ugniai	7
1.2. Priešgaisrinių išsipučiančių dažų dangų bandymų sąlygos	11
1.3. Priešgaisrinių išsipučiančių dažų dangų sudėtys, sandara ir savybės	18
1.4. Dangų toksiškumas	25
1.5. Priešgaisrinių išsipučiančių dažų dangų ilgaamžiškumą įtakojantys veiksniai	26
1.6. Analitinės mokslo darbų apžvalgos apibendrinimas ir disertacijos uždavinių formulavimas	31

2. TYRIMAMS NAUDOTOS MEDŽIAGOS IR BANDYMŲ METODIKOS	33
2.1. Tyrimams naudotos medžiagos ir bandiniai	33
2.1.1. Tyrimams naudotos medžiagos	33
2.1.2. Mažų matmenų plieninių plokštelių bandinių paruošimas	35
2.1.3. Plieninių dvitėjų bandinių paruošimas	39
2.2. Tyrimų metodikos ir įrangos	41
2.2.1. Tūrinis ir vienpusis kaitinimas pagal GTC/GBM 2 metodiką	41
2.2.2. Tūrinis ir vienpusis kaitinimas pagal standarto LST EN 1363-1:1999 reikalavimus	43
2.2.3. Degumo nustatymo bandymo metodas pagal LST EN 13823 standarto reikalavimus	45
2.2.4. Dirbtinio sendinimo ciklų režimai ir natūralaus senėjimo sąlygos	46
2.2.5. Skenuojanti elektroninė mikroskopija	47
2.2.6. Derivatografiniai tyrimai ir statistinis duomenų apdorojimas	48
2.2.7. Priešgaisrinių išsipučiančių dangų cheminės sudėties Furjė infraraudonųjų spindulių spektroskopinė analizė	49
2.3. Antrojo skyriaus išvados	50
3. ĮVAIRIŲ PRIEŠGAISRINIŲ DANGŲ ATSPARUMĄ UGNIAI ĮTAKOJANTYS METODINIAI VEIKSNIAI	51
3.1. Įvairių priešgaisrinių dangų atsparumo ugniai tyrimai skirtingais bandymų metodais	51
3.2. Plieninių plokštelių, padengtų skirtingomis išsipučiančiomis dangomis, atsparumas ugniai	57
3.3. Trečiojo skyriaus išvados	63
4. PRIEŠGAISRINIŲ IŠSIPUČIANČIŲ IR KOMBINUOTŲ DAŽŲ DANGŲ SENĖJIMO ĮVAIRIOSE SĄLYGOSE TYRIMAI	65
4.1. Priešgaisrinėmis dažų dangomis padengtų plieninių plokštelių, sendintų pagal I ir II režimą, atsparumas ugniai kaitinant vienpusiai	65
4.2. Natūraliai ir dirbtinai pagal I režimą sendintų plieninių dvitėjų, padengtų priešgaisrinėmis dangomis, atsparumas ugniai kaitinant tūriškai	77
4.3. Priešgaisrinių išsipučiančių ir kombinuotų dažų dangų degumo ir toksiškumo tyrimų rezultatai	91
4.3.1. Priešgaisrinių išsipučiančių dažų dangų degumo savybės	91
4.3.2. Priešgaisrinių išsipučiančių dažų dangų aukštoje temperatūroje išskiriamų dujų toksiškumo vertinimas	98
4.4. Ketvirtojo skyriaus išvados	99
5. PRIEŠGAISRINIŲ IŠSIPUČIANČIŲ IR KOMBINUOTŲ DAŽŲ DANGŲ SUIRIMO MECHANIZMAS	101
5.1. Skirtingų priešgaisrinių išsipučiančių ir kombinuotų dangų paviršiaus analizė	101
5.2. Priešgaisrinių išsipučiančių dažų dangų terminė analizė	108
5.3. Priešgaisrinių išsipučiančių dažų dangų Furjė infraraudonųjų spindulių spektroskopinė analizė	113

5.4. Penktojo skyriaus išvados	120
BENDROSIOS IŠVADOS	123
LITERATŪRA IR ŠALTINIAI	127
AUTORIAUS PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS	137
PRIEDAS. Gaisrinio bandymo metodikos.....	139

Contents

INTRODUCTION	1
Formulation of the problem	1
Importance of the thesis	2
The object of research	2
The goal of the thesis.....	3
The tasks of the thesis	3
Research methodology	3
The scientific novelty of the work	4
Work results of practical value	4
Defended statements	4
Scientific work	4
Structure of the dissertation	6
1. REVIEW OF FIRE PROTECTIVE COATING FOR STEEL STRUCTURES	7
1.1. Fire resistance of steel structures	7
1.2. Fire protective intumescent paints testing conditions	11
1.3. Fire protective intumescent paint coating composition, structure and properties	18
1.4. Coatings toxicity	25
1.5. Fire protective intumescent paint coating durability factors influencing	27
1.6. Analytical research papers and review a summary of tasks for the dissertation	31

2. TESTS MATERIAL AND TEST PROCEDURES	33
2.1. The materials and the samples used for testing	33
2.1.1. Experiments were material	33
2.1.2. The small dimensions of the steel plate sample preparation	35
2.1.3. Steel sections sample preparation	39
2.2. Research methodology and equipment	41
2.2.1. Volumetric and one-sided heating by GTC/GBM 2 methodology	41
2.2.2. Volumetric and one-sided heating according to the standard LST EN 1363-1:1999 requirements	43
2.2.3. Flammability test method in accordance with LST EN 13823 standard ..	45
2.2.4. Artificial aging cycles modes and natural aging conditions	46
2.2.5. Scanning electron microscopy	47
2.2.6. Thermal research and statistical treatment	48
2.2.7. Fire intumescent coating chemical composition analysis by Fourier transform infrared spectroscopy method	49
2.3. Conclusions of second chapter	50
3. METHODOLOGICAL FACTORS AFFECTING FIRE RESISTANCE VARIOUS FIRE PROTECTIVE COATINGS	51
3.1. Fire resistance tests of various fire protective coatings using different test methods	51
3.2. Fire resistance of steel sheets, coated with different fire protective coatings ...	57
3.3. Conclusions of third chapter	63
4. FIRE PROTECTIVE INTUMESCENT AND COMBINED PAINT COATINGS AGING IN VARIOUS TERMS STUDY	65
4.1. Fire resistance one-sided heated steel plates coated different fire protective paint coatings after aging under mode I and mode II	65
4.2. Fire resistance volumetric heated steel sections covered the different fire protective coatings after natural and artificial aging according mode I	78
4.3. Fire protective intumescent and combined paints flammability and toxicity studies	91
4.3.1. Fire protective intumescent paints flammability properties	91
4.3.2. Fire protective intumescent paint coatings at high temperature gases emitted toxicity evaluation	98
4.4. Conclusions of fourth section	99
5. FIRE PROTECTIVE INTUMESCENT AND COMBINED COATING DESTRUCTION MECHANISM	101
5.1. Different fire protective intumescent and combined surface sem analysis.....	101
5.2. Fire protective intumescent paints thermal analysis	108
5.3. Fire protective intumescent paints Fourier transform infrared spectroscopy analysis	113
5.4. Conclusions of fifth chapter	120

GENERAL CONCLUSIONS	123
REFERENCES	127
LIST OF THE AUTHORS SCIENTIFIC PUBLICATIONS ON THE TOPIC OF THE DISSERTATION	139
ANNEX. Fire Testing Methodology	141

Įvadas

Problemos formulavimas

Beveik prieš 8 metus, pagerėjus ekonominei situacijai Lietuvos Respublikoje, buvo pradėta daugiaaukščių visuomeninės paskirties pastatų (biurų, prekybos centrų) ir kitokios paskirties statinių statyba iš plieninių konstrukcijų. Daugiaaukščių pastatų statyba suteikė architektams tam tikrą laisvę, kuri leido naudingiau panaudoti ankštus miestų teritorijos plotus. Visuomeninių pastatų, o ypač daugiaaukščių ir prekybos centrų, statybai Lietuvoje plačiai naudojamos įvairiomis priešgaisrinėmis dažų dangomis apsaugotos plieninės konstrukcijos. Eksploatuojamuose statiniuose ant plieninių konstrukcijų esančių priešgaisrinių išsipučiančių dažų dangų priežiūra praktiškai nebuvo atliekama. Tokios charakteristikos, kaip pastato aplinkos koroziškumas plieninėms konstrukcijoms, priešgaisrinės išsipučiančios dažų dangos suderinamumas su antikoroziniais gruntais ir viršutinėmis apsauginėmis dangomis, nebuvo vertinamos.

Priešgaisrinių išsipučiančių dažų dangų įvairovė, besiplečianti nekilnojamojo turto rinka ir žmonių poreikiai paskatino kurti vis naujus gaminius, savo savybėmis pralenkiančius įprastų gaminių savybes. Medžiagų savybėms modifikuoti buvo naudojamos naujos sukurtos polimerinės dervos ir antipirenai, mažinamas lakiųjų medžiagų kiekis, o tai užtikrino storesnę dažymo metu gaunamą tokių dažų dangą. Šiuo metu sukurta įvairių efektyvių

priešgaisrinių išsipučiančių dažų dangų, tačiau jų naudojimo efektyvumas tiesioginiam taikymui ir tokių pat savybių išsaugojimui, užtikrinant plieninės konstrukcijos atsparumą ugniai, nėra plačiai ištirtas.

Darbo aktualumas

Nuo 1971 metų priešgaisrinių išsipučiančių dažų gamybos srityje atliekama nemažai mokslinių tyrimų. Mokslininkai daug dėmesio skiria priešgaisrinių išsipučiančių dažų sudėčių parinkimui, gruntų ir dažų dangų charakteristikoms ir rodikliams nustatyti, veikimo principams išsiaiškinti.

Šiuo metu itin aktualus priešgaisrinių išsipučiančių dažų dangų ilgalaikiškumo klausimas. Ilgalaikiškumui tirti darbe buvo pasirinkti du sendinimo metodai: natūralus – laikant dangas natūraliose aplinkos sąlygose, kuriose jos būna eksploatuojamos, ir dirbtinis – atliekant modeliuotus sendinimo ciklus pagal du režimus. Šiais metodais priešgaisrinės išsipučiančios dažų dangos iki šiol buvo mažai tirtos.

Tyrimų objektas

Šio darbo tyrimų objektas – aplinkos veiksnių įtaka pagrindinėms įvairių priešgaisrinių išsipučiančių dažų dangų charakteristikoms (atsparumui ugniai, termoizoliacinio sluoksnio susidarymui ir kt.).

Darbo tikslas

Pagrindinis šio darbo tikslas – nustatyti įvairių priešgaisrinių išsipučiančių dažų dangų, skirtų plieninių konstrukcijų apsaugai, atsparumą ugniai, degumą, toksiškumą, ilgaamžiškumą sąlygotą atmosferinių veiksnių, viršutinių apsauginių dangų įtaką šioms savybėms, bei įvertinti veiksnius, lemiančius priešgaisrinių išsipučiančių dažų dangų pokyčius ir destruktiją.

Darbo uždaviniai

Darbo tikslui pasiekti reikia spręsti šiuos uždavinius:

1. Atsižvelgiant į priešgaisrinėmis išsipučiančiomis dangomis padengtų konstrukcijų eksploatacijos sąlygas, skirtingais bandymo metodais atlikti atsparumo ugniai tyrimus.

2. Ištirti priešgaisrinių išsipučiančių dažų dangų, skirtų plieno konstrukcijų apsaugai, atsparumą ugniai, degumą, toksiškumą ir įvertinti papildomų apsauginių dangų įtaką.
3. Atlikti priešgaisrinių išsipučiančių dažų dangų tyrimus skirtingais dirbtinio sendinimo režimais modeliuojant aplinkos sąlygas ir natūrinio poveikio būdu, kad būtų nustatyta šių sendintų dangų senėjimo priežastis ir sendinimo įtaka atsparumo ugniai pokyčiams. Aprašyti priešgaisrinių išsipučiančių dažų dangų destrukcijos mechanizmą.
4. Remiantis tyrimų rezultatais, parengti metodiką, leidžiančią nustatyti priešgaisrinės išsipučiančios dangos tapatumą ir rekomendacijas, skirtas plieninių konstrukcijų padengimui, priežiūrai, tokių dažų dangų renovacijai atlikti.

Tyrimų metodika

Bandinių savybių tyrimams buvo taikyti standartizuoti tyrimų metodai, skirti nustatyti išsipučiančių dažų dangų atsparumą ugniai, degumą, toksiškumą, o formavimosi ir destrukcijos savybėms tirti – įvairios bandymų metodikos bei standartizuoti bandymų metodai (GTC/GBM 2:1999, LST EN 13823:2010 ir LST EN 1363-1:1999), įtraukiant termografinę analizę. Struktūros tyrimams buvo taikytas skenuojančiosios elektroninės mikroskopijos (SEM) analizės metodas, o išsipučiančių dažų dangų destrukcijos bei cheminės sudėties įvertinimui – FT-IR mikrospektroskopijos metodas.

Darbo mokslinis naujumas

Rengiant disertaciją buvo gauti šie medžiagų inžinerijos mokslui nauji rezultatai: nustatyta, kad papildomos (nepriešgaisrinės) apsauginės dangos padidina priešgaisrinių išsipučiančių dažų dangų degumo savybes bei stabdo susidarančios termoizoliacinės putos susidarymą.

Konstatuota, jog plieninių konstrukcijų, padengtų skirtingomis priešgaisrinėmis išsipučiančiomis dažų dangomis, natūralus ir dirbtinis sendinimas skirtingais režimais smarkiai įtakoja šių dangų atsparumą ugniai. Sudarytos empirinės lygtys prognozuoti sendintų dangų atsparumą ugniai ir susidarančios termoizoliacinės putos storį. Nustatyta, kad priešgaisrinių išsipučiančių dažų dangų temperatūros ir drėgmės svyravimai apsprendžia šilumos ir masės mainus, o rezultate dangų senėjimą jų cheminės sudėties kaitą bei absoliutų atsparumą ugniai išreiškiamą laiku.

Darbo rezultatų praktinė reikšmė

Remiantis tyrimų rezultatais parengtos dvi metodikos, kurios yra įteisintos ir įdiegtos.

Metodika „Statybos produktų ir kitų medžiagų identifikavimas terminės analizės metodais“ GTC/GBM-21:2011 leidžia įvertinti priešgaisrinių išsipučiančių dažų dangų padengtų ant plieninių konstrukcijų efektyvumą ir jas identifikuoti.

Remiantis metodika „Priešgaisrinių išsipučiančių dangų parinkimo, padengimo, priežiūros rekomendacijos ir kokybės įvertinimo metodiniai nurodymai“ GTC/GBM-22:2011 galima atlikti patikrą ar tinkamai plieninės konstrukcijos apsaugotos priešgaisrinėmis išsipučiančiomis dažų dangomis, įtraukiant dažymą, priežiūrą, remontą, atnaujinimą.

Ginamieji teiginiai

1. Didėjant sausos priešgaisrinės išsipučiančios dangos storiui, eksponentiškai didėja jos atsparumas ugniai, o didėjant susidariusios termoizoliacinės putos storiui tiesiškai didėja atsparumas ugniai.
2. Papildoma dažų danga įtakoja priešgaisrinių išsipučiančių dažų dangų atsparumą ugniai, degumą, toksiškumą bei ilgaamžiškumą.
3. Priešgaisrinių išsipučiančių dažų dangų senėjimui didžiausią įtaką turi santykinės oro drėgmės ir temperatūros svyravimai, kurie sumažina jų atsparumą ugniai.

Darbo rezultatų aprobavimas

Disertacijos tema paskelbta viena mokslinė publikacija recenzuojamame periodiniame mokslo leidinyje, įrašytame į Mokslinės informacijos instituto *Thomson ISI Web of Science* duomenų bazę. Vienas straipsnis – tarptautinės konferencijos pranešimų rinkinyje ir trys straipsniai *IndexCopernicus* tarptautinėje duomenų bazėje referuojamuose leidiniuose.

Disertacijoje atliktų tyrimų rezultatai buvo paskelbti dešimtyje mokslinių konferencijų:

- 11-oji Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencija „Mokslas – Lietuvos ateitis“, sekcija Statyba, 2008 m. balandžio mėn. 9–11 d., VGTU. Pranešimo tema: „Priešgaisrinių dangų atsparumo ugniai bandymų metodikų analizė“;
- 11-oji Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencija „Mokslas – Lietuvos ateitis“, sekcija Statyba, 2008 m. balandžio mėn. 9–11 d., VGTU.

- Pranešimo tema: „Priešgaisrinių dangų efektyvumą įtakojantys komponentai“;
- 12-oji Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencija „Mokslas – Lietuvos ateitis“, sekcija Statyba, 2009 m. kovo mėn. 27 d., VGTU. Pranešimo tema: „Plieno apsaugos nuo perkaitimo priklausomybė nuo aukštoje temperatūroje susidariusio termoizoliacinio sluoksnio storio“;
- 5-oji Tarptautinė mokslinė – praktinė konferencija „Ypatingos situacijos: įspėjimas ir likvidacija“, įvykusioje Minske (Baltarusijos Respublika) 2009 m. liepos mėn. 8–9 d. Pranešimo tema: „Influence of fire protective coatings, used on steel constructions in high-rise building's, for fire extinguishing efficiency“;
- Respublikinė konferencija „Medžiagų inžinerija 2009“, 2009 m. lapkričio mėn. 20 d., KTU. Pranešimo tema: „Įvairių priešgaisrinių dangų atsparumo ugniai tyrimai“;
- 13-oji Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencija „Mokslas – Lietuvos ateitis“, sekcija Statyba, 2010 m. kovo mėn. 23 d., VGTU. Pranešimo tema: „Priešgaisrinių dangų senėjimo įtakos plieninių konstrukcijų atsparumui ugniai tyrimas“;
- 13-oji Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencija „Mokslas – Lietuvos ateitis“, sekcija Statyba, 2010 m. kovo mėn. 26 d., VGTU. Pranešimo tema: „Metalinių konstrukcijų, apsaugotų įvairiomis priešgaisrinėmis medžiagomis, atsparumo ugniai savybių įvertinimas skirtingomis kaitinimo sąlygomis“;
- 10-oji tarptautinė konferencija „Modern Building Materials, Structures and Techniques“, sekcija Statybinės medžiagos ir jų technologijos, 2010 m. gegužės mėn. 20 d., VGTU. Pranešimo tema: „Fire Resistance and Reaction to Fire Tests of Buildings Constructions“;
- Respublikinė konferencija „Medžiagų inžinerija 2010“, 2010 m. lapkričio mėn. 19 d., KTU. Pranešimo tema: „Priešgaisrinių dangų, skirtų plieninėms konstrukcijoms ugniaatsparinti, ilgaamžiškumo tyrimai“;
- 14-oji Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencija „Mokslas – Lietuvos ateitis“, sekcija Statyba, 2011 m. kovo mėn. 23 d., VGTU. Pranešimo tema: „Priešgaisrinių dangų identifikavimo metodai“;
- 14-oji Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencija „Mokslas – Lietuvos ateitis“, sekcija Statyba, 2011 m. kovo mėn. 25 d., VGTU. Pranešimo tema: „Dangų, naudojamų metalinėms konstrukcijos apsaugoti nuo ugnies poveikio, ilgaamžiškumo tyrimas“;
- 52-oji tarptautinė mokslinė konferencija „Construction Science“, sekcija Construction Science, 2011 m. spalio mėn. 13 d., Rygos technikos universitetas. Pranešimo tema „Laiko įtaka priešgaisrinėms dangoms“;

15-oji Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencija „Mokslas – Lietuvos ateitis“, sekcija Statyba, 2012 m. kovo mėn. 22 d., VGTU. Pranešimo tema: „Plieninių konstrukcijų atsparumo ugniai didinimo galimybių tyrimas“.

Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro įvadas, penki skyriai, bendrosios išvados, naudotos literatūros ir disertacijos autoriaus publikacijų sąrašai.

Darbo apimtis – 160 puslapių, tekste panaudota 12 numeruotų formulių, 84 paveikslai ir 12 lentelių. Rašant disertaciją naudotasi 152 literatūros šaltiniais.

Priešgaisrinių dangų skirtų plieninių konstrukcijų apsaugai apžvalga

Skyriuje apžvelgiami plieninių konstrukcijų apsaugos nuo ugnies būdai ir medžiagos bei jų atsparumo ugniai nustatymo metodai. Pristatomos priešgaisrinių išsipučiančių dažų cheminės sudėtys ir jų veikimo ypatumai, aptariami kitų mokslininkų gauti priešgaisrinių dangų atsparumo ugniai tyrimų rezultatai po natūralaus dangų sendinimo.

1.1. Plieninių konstrukcijų atsparumas ugniai

Dabartiniu metu vykdant statybos ir rekonstrukcijos darbus pradėta naudoti vis daugiau konstrukcijų iš plieno. Tokio tipo konstrukcijų pasirinkimą sąlygoja didėjančios statybinių darbų apimtys, darbų vykdymo laikotarpio trumpėjimas bei pastatų architektūriniai sprendimai.

Šis pasirinkimas yra motyvuotas statybiniu ir architektūriniu požiūriu. Tai – efektyvios ir, palyginus, lengvos konstrukcijos, suteikiančios galimybę pastatyti pastatą arba statinį greitai ir santykinai nebrangiai. Taip pat konstrukcijomis iš plieno galima išspręsti įvairius architektūrinius uždavinius, užtikrinti statinio mechaninį patvarumą ir pastovumą (Žukas *et al.* 2007).

Pagrindinis veiksnys, gaisro metu ardantis konstrukcijas, yra aukšta temperatūra. Temperatūra, kurioje konstrukcija pasiekia atsparumo ugniai ribą, vadinama kritine temperatūra, ji gali būti skirtinga 140 °C, 160 °C, 350–750 °C (LST EN 1363-1:2000; STR 2.01.01(2):1999 2000; Mitkus 2006; LST ISO 834 1997; LST EN 1991-1-2 1991; Čyras *et al.* 1997). Plienai, gerai praleidžiantis šilumą, greitai ją perduoda nuo ugnies židinio, taip padėdamas plisti gaisrui (Ramukevičius 2008; Trebilcock *et al.* 2004; Corus 2007; ASFP 2007; Wastney 2002; Комиссаров *et al.* 1970). Metalinių konstrukcijų laikomosios galios praradimas susietas su tuo, kad tokia konstrukcija linksta, deformuojasi (Bailey *et al.* 1999). Pastebimos metalinių konstrukcijų deformacijos vyksta jau prie 300 °C (Чешко 2002). Nustatyta, kad nuo liepsnos poveikio neapsaugoti, apkrauti plieniniai konstrukciniai elementai, įkaitę iki 450–550 °C, suyra nebeatlaikydami realių apkrovų (Parkinson *et al.* 2009; Bodzay *et al.* 2011; Чешко *et al.* 2002). Temperatūra, kuri yra pasiekiamą gaisro metu – 400–1200 °C (Драйздеил 1990; Астапенко *et al.* 1988; Karlsson *et al.* 1999), todėl turi būti atkreiptas tinkamas dėmesys į projektuojamų laikinųjų konstrukcijų atsparumą ugniai (Vassart *et al.* 2005; Бартелеми, Крюпа 1985).

Plienines konstrukcijas apsaugoti nuo ugnies galima padengiant jų išorę ugniai atspariomis medžiagomis arba konstrukciją aušinant iš vidaus. Aušinti iš vidaus galima vidų užpildant betonu (Kodur 2007a; Kodur 2007b; Schaumann *et al.* 2006). Plieninių kolonų, užpildytų betonu su armuojančiais plaušeliais, atsparumas ugniai pailgėja iki 39 min., (Kodur, Latour 2005). Tačiau šis apsaugos nuo ugnies metodas labai padidina konstrukcijos svorį. Konstrukcijų aušinimui gali būti naudojamas vanduo (Witte 1981; Bouillette 1971). Šiam tikslui naudojamas vanduo su antikoroziniais priedais, o nešildomiems pastatams – antifrizas. Užpildymo vandeniui sistemos paprastai būna vienkartinės, nes po gaisro tampa nebenaudojamomis. Plieninės konstrukcijos, užpildytos vandeniui, esant natūraliai ar priverstinei cirkuliacijai pakankamai brangios ir sudėtingos (Seigel 1969; Seigel 1970).

Plieninių konstrukcijų atsparumui ugniai didinti, kai dangos dengiamos konstrukcijos išorėje, naudojamas priešgaisrines priemones galima suskirstyti į dvi pagrindines grupes: pasyvios (tinkai, mineralinės vatos plokštės, gipso plokštės, plytos) ir aktyvios (priešgaisriniai dažai, priešgaisriniai lakai) (LST L ENV 13381-4 2003). Apsaugai nuo ugnies plieninės konstrukcijos apmūrijamos paprastomis molinėmis, silikatinėmis ir šamotinėmis plytomis naudojant cemento-smėlio skiedinį. Lietuvoje prieš kelis dešimtmečius šamotinių plytų poreikis, skaičiuojant visą ugniai atsparių medžiagų naudojimo apimtį, sudarė apie 90 % (Gailius, Vėjelis 2009). Tinkavimas ir mūrijimas tuščiaavidurėmis plytomis buvo leidžiamas iki ½ plytos storio (120 mm). Mūrijimas atliekamas vienailemis siūlėmis. Horizontalios ir vertikalios siūlės užpildomos skiediniu. Mūrijant plytomis reikia atsižvelgti į tai, kad plytų ir plieno linijinio plėtimosi

koeficientai skiriasi 3 kartus. Dėl to paliekama tuščios vietos tarp plieninių konstrukcijų ir mūro. Mūro stiprinimui naudojamos iki 8 mm skersmens vielos. Norint pasiekti 2 val. atsparumą ugniai, užtenka 6,5 cm mūro sluoksnio (Барамов, Пчелинцев 1997). Mūras ir betono atitvaros praktiškai gali būti naudojamos bet kokiomis temperatūrinėmis ir drėgnio sąlygomis bei veikiant kitiems agresyviems veiksniams. Tokios atitvaros taip pat atsparios ir dinaminėms apkrovoms (Иванов *et al.* 1974). Dažniausiai naudojamas buvo apmūrijimas šilumai nelaidžiais blokais iš perlito, vermikulito surišto cementu, arba apsauga pusiau kietomis mineralinės vatos plokštėmis. Plytų, kurių storis yra 5 cm, mūras užtikrina atsparumą ugniai 2 val., turint omenyje, kad jis tvirtai sukimba su plieno konstrukcijomis. Jeigu betono sluoksnio storis yra 5 cm, tai reikalaujamas atsparumo ugniai laikas 2 val., o jeigu 6 cm, tai reikalaujamas atsparumo ugniai laikas 2,5 val. (Барамов, Пчелинцев 1997).

Dar vienas tradicinis apsaugos nuo ugnies būdas yra smėlio-cemento tinkas. Jam paruošti naudojamas smėlis, cementas ir vanduo. Tokį tinką rekomenduojama naudoti kolonų, sijų, jungiamųjų elementų ar jungiamųjų elementų mazgų apsaugai. Smėlio ir cemento tinko naudojimas yra pagrįstas mišinių sudedamųjų dalių pasiūlos gausa ir nedidelėmis išlaidomis ruošiant mišinį. Mišinio paruošimo procesas nesudėtingas, yra mechanizuoto tinkavimo galimybė (Wastney 2002). Tuo pačiu metu šitie apsaugos nuo ugnies būdai turi ir kelis trūkumus, ribojančius jų naudojimą. Tai didelė darbų apimtis, kuri priklauso nuo armavimo plieninėmis grotelėmis. Tuomet didėja ir apkrovos pastatų pamatams, nes pasunkėja karkasas. Be to, iškyla antikoroziinių dangų naudojimo būtinybė. Purškiamieji tinkai paprastai yra cemento arba gipso pagrindo produktai, kurių užpildas paprastai yra vermikulitas, perlitas arba polistireninio putplasčio granulės su celiuliozės arba stiklo pluošto armuojančiais priedais. Ankščiau plačiai naudotas asbestas dabar yra nebenaudojamas (dėl savo toksiškumo) (Wastney 2002).

Akmens vata dėl plaušelių išsidėstymo ir sluoksniuotos struktūros su atsparumą ugniai didinančiais įvairiais priedais (pvz. aliuminio hidroksidu) gali atlaikyti temperatūrą iki 1000 °C, nors rišiklis iš akmens vatos išdega jau aukštesnėje nei 250 °C temperatūroje, tačiau akmens vatos pluoštas nesuyra ir apsaugo konstrukcinį elementą nuo ugnies poveikio (Wulf 1991; Bowman, Taylor 2002).

Didinant atsparumą ugniai plačiai naudojamos gipso kartono plokštės. Gipso saugumas gaisro metu grindžiamas tuo, kad jame yra apie 20 % chemiškai sujungto vandens (15 mm storio 1 m² gipso plokštėje yra apie 3 litrus vandens). Dėl gaisro poveikio gipsas šio vandens netenka, o tai reiškia, kad chemiškai sujungtas vanduo išgaruoja (John, Bowman 2002). Tam suvartojama energija, o susidarę garai lėtina gaisro vystymąsi. Vandens atskėlimui ir išgarinimui iš 15 mm storio gipso plokštės suvartojama apie 8400 kJ (2000 kcal) šilumos. Be

to, bevandenis gipso sluoksnis veikia kaip izoliatorius, kuris, palyginus su vandens turinčiu gipso sluoksniu, yra mažiau laidus šilumai. Gipso plokščių, skirtų plieninių konstrukcijų apsaugai, atsparumo ugniai savybės plačiai aptartos mokslininko S. M. Cramer straipsnyje (Cramer *et al.* 2003).

Kalcio silikato plokštė yra visiškai nedegi medžiaga, kuri priskiriama A1 degumo klasei. Ji tinkama naudoti padidinto gaisro pavojaus patalpose. Kalcio silikato plokštė yra ypač atspari deformacijoms. Pagal atliktus bandymus, jos liekamoji deformacija yra 8 kartus mažesnė už panašių gipso kartono plokščių. Taip pat ji yra tinkama naudoti drėgnoms patalpoms, kadangi paveikta drėgmės beveik nesiplečia. Kalcio silikato plokštės sudėtyje yra: 45 % kvarco (SiO_2), 0,2 % aliuminio oksido (Al_2O_3), 0,2 % geležies (III) oksido (Fe_2O_3), 0,7 % magnio oksido (MgO), 45 % negesintų kalkių (CaO), 0,1 % natrio oksido (Na_2O), 0,2 % kalio oksido (K_2O) ir 8,6 % kitų junginių (Taylor 1990).

Kitas plačiai išplitęs apsaugos nuo gaisro būdas yra priešgaisriniai išsipučiantys dažai. Pirmą kartą priešgaisriniai išsipučiantys dažai buvo užpatentuoti dar 1938 m. Priešgaisrinės išsipučiančios dažų dangos Europoje naudojamos daugiau kaip 25 metai, nors detaliau tokių dažų pagrindiniai komponentai apžvelgti ir aprašyti 1971 m. (Agunloye *et al.* 1994; Jackman 1998).

Per paskutinius XX a. dešimtmečius priešgaisrinių išsipučiančių dažų gamybos technologijos vystėsi gana sparčiai. Buvo pradėtos naudoti naujos rišamosios dervos, efektyvesni antipirenai ir aktyvieji polimeriniai priedai. Mokslas apie priešgaisrines išsipučiančias dangas taip pat ženkliai pažengė į priekį: buvo aktyviai nagrinėjama įvairių priedų įtaka dangų formavimosi struktūrai, rišiklių stabilumui veikiant aukštai temperatūrai. Buvo ištirtas ir aprašytas dangų veikimo mechanizmas kylant temperatūrai, nustatytos pagrindinės komponentų grupės, reikalingos efektyviai suformuoti dangą (Gu 2007).

Priešgaisrinės išsipučiančios dažų dangos savo savybėmis užtikrina efektyvią apsaugą nuo ugnies poveikio. Be to, priešgaisrinius išsipučiančius dažus galima greitai ir lengvai naudoti. Jie suformuoja kietą, lygų paviršių. Šių dažų dangų privalumai (Jackman 1998; Duquesne *et al.* 2005):

- priešgaisrinės išsipučiančios dangos yra mažo storio, palyginus su kitomis tam skirtomis medžiagomis;
- jos gerai apsaugo visus konstrukcijos elementus, ir dažai gali būti naudojami (padengiami) tiesiog statybvietėje, taip sutrumpinant statybos darbų laiką;
- gana plona danga yra dažnai estetiškai priimtina ir gali būti be papildomos dekoratyvinės dangos arba padengta papildomomis spalvotomis apdailos medžiagomis.

Trūkumai (Corus 2006):

- santykinai didelės išlaidos, kai reikalaujamas aukštas atsparumo ugniai lygis;
- dažais organinių tirpiklių pagrindu turi būti dengiama tik gerai vėdinamose vietose;
- šių dažų veiksmingumas sunkiai įvertinamas konstrukcijų eksploatavimo metu;
- būtini reguliarius patikrinimai ir priežiūra, kai reikia įvertinti esamos dangos būklę.

Šiuo metu užsienyje yra sukurta daug įvairių efektyvių priešgaisrinių išsipučiančių dangų, skirtų specialiai plieninių konstrukcijų apsaugai. Taip pat žinomi teoriniai pasiūlymai dangų atsparumo šiluminiams poveikiams gerinti dėka šilumos mainų reguliavimo. Pagrindinis informacijos šaltinis apie tyrimus šioje srityje ir priešgaisrinių išsipučiančių dažų gamybą yra patentiniai aprašymai. Mūsų atlikta mokslinė analizė nukreipta išsiaiškinti ir plėvelę sudarančių medžiagų ir komponentų veikimo ypatumus.

1.2. Priešgaisrinių išsipučiančių dažų dangų bandymų sąlygos

Priešgaisrinių išsipučiančių dažų dangų naudojime ir jų atsparumo ugniai savybių realizacijoje sukaupta didelė patirtis. Tai duoda galimybę gana objektyviai įvertinti dažų atsparumą ugniai. Remiantis šaltiniais (Babrauskas, Williamson 1978a; Babrauskas, Williamson 1978b), vieni pirmųjų gaisro poveikio ir trukmės bandymai buvo atlikti JAV su dviem pastatais išmatuojant maksimalią temperatūrą, kuri pasiekė net 1200 °C. 1956 m. atlikti gaisro temperatūros kitimo nustatymo bandymai, panaudojant specialią patalpą ir medienos gaisro apkrovas. Šių eksperimentų metu buvo pasiekta 800 °C temperatūra (Kawagoe 1957).

Priešgaisrinių dangų efektyvumui nustatyti naudojami konstrukcinių elementų atsparumo ugniai bandymai. Bandymai vykdomi siekiant nustatyti statybinių konstrukcijų, padengtų reikiamo storio dažų danga, atsparumą ugniai. Atsparumas ugniai priskiriamas pagrindinėms konstrukcijų charakteristikoms ir reglamentuojamas statybinėmis normomis ir taisyklėmis. Pasak šaltinio, (Čyras, Šukys 1997), atsparumas ugniai yra pastato konstrukcijos arba elemento (statybos produkto) gebėjimas bandymo metu pagal standartinio gaisro temperatūros nuo laiko priklausomybės kreivę tam tikrą laiko tarpą išlaikyti nustatytas apkrovas ir (arba) šilumos izoliacines savybes ir (arba) išlikti jam vientisam (sandariam, be plyšių). Standartai apibrėžia standartines kaitinimo ir slėgio sąlygas, bandymo metodus bei įvairių kategorijų statybinių konstrukcijų elementų atsparumo ugniai nustatymo kriterijus. Nustatant priešgaisrinių dažų

dangų efektyvumą, svarbiausiu faktoriumi laikomas konstrukcijos atsparumas temperatūriniam poveikiui pagal standartinę gaisro kreivę laikui bėgant nuo R15 iki R240 (LST EN 13501-2:2007+A1 2009). Bandymo esmė – susieti produktą su galutinio panaudojimo sąlygomis, kurios tiksliau atspindėtų jo savybes. Nagrinėjant gaisro plitimo įtaką priešgaisrinei dažų dangai, gali būti pasirinktos skirtingos temperatūros kilimo kreivės. Paveiksle 1.1 parodytos šešios kreivės, naudojamos įvairiems gaisriniams bandymams. RWS kreivė (1.1 pav.) buvo sukurta Olandijos Transporto ministerijoje kaip blogiausias scenarijus, kai tunelyje užsidega ir 2 valandas dega autocisterna su degalais. Šio gaisro vystymas prilgsta 50 m² degančio skysto kuro, gaisro apkrova sudaro 300 MW, o temperatūra siekia 1200–1365 °C (Fire Guidelines 2006). Remiantis šia kreive buvo atliekami tunelių atsparumo ugniai bandymai. Vonelės buvo pripildomos benzino: nuo 6,6 m² iki 95 m² (Offenegg tunelio atveju 1965 Šveicarijoje), nuo 6,8 m² iki 13,6 m² (Zwenberg tunelio atveju 1975 Austrijoje), ir nuo 4 m² iki 6 m² (P.W.R.I. tunelio atveju, skirtu keleiviniams automobiliams ir autobusams, 1980 Japonijoje), (Fires in Transport Tunnels 1995; Steinert 1994; Shipp, Spearpoint 1995). RABT kreivė (1.1 pav.) sukurta Vokietijoje. Pagal šią gaisro kreivę temperatūros augimas vyksta labai greitai, t. y. per penkias minutes pasiekama 1200 °C. Ši kreivė taip pat naudojama Japonijoje ir Prancūzijoje (Ingason, Lönnermark 2004).

1.1 pav. Modeliuoto gaisro temperatūros priklausomybė nuo laiko

Fig. 1.1. Simulated fire temperature dependence of the time

Angiavandenilių gaisro kreivė (1.1 pav.) atspindi temperatūros kitimą degant naftos produktams, t. y. kai temperatūros augimas vyksta daug greičiau,

negu numatytas esant standartiniam gaisrui (Husted, Westerman 2005; Gibson 2003). Ši kreivė naudojama naftos pramonėje statybos produktų atsparumui ugniai įvertinti arba, kai numatoma, jog gali išsivystyti naftos produktų gaisras (Crown 2009). Taip pat, kai nustatinėjamas kompozitinių polimerinių laminatinių plokščių atsparumas ugniai (Dodds *et al.* 2000).

Lėto gaisro augimo kreivė (1.1 pav.) vaizduoja lėtai didėjančią gaisrą, t. y. iki 21 min vaizduoja rusenimo efektą, o nuo 21 min temperatūros augimą esant pliūpsniui ir perėjimą į degimą liepsna (LST EN 1363-2:1999 1999).

Išorinio gaisro kreivė (1.1 pav.) yra skirta parodyti gaisro, vykstančio už pastato ribų (atviro gaisro, kai maža jo apkrova), temperatūros augimą. Todėl šiluminis poveikis po 20 min yra palyginus nedidelis ir pasiekiamas tik apie 680 °C temperatūra (LST EN 1363-2:1999 1999). Standartinio gaisro kreivė (1.1 pav.) įteisinta 1961 metais, ir jos temperatūros augimas analogiškas tolygiai išdėstytos 50 kg/m² medienos apkrovos degimui patalpoje (Бушев *et al.* 1970).

1975 m. priimtas standartas ISO 834 (ISO 834:1975 1975), reglamentuojantis statybinių konstrukcijų atsparumo ugniai bandymo sąlygas, įrangą, bandomos konstrukcijos minimalius matmenis bei bandymų rezultatų vertinimo kriterijus. Atsparumo ugniai konstrukcinių elementų bandymai paprastai atliekami laikantis standartinės laiko ir temperatūros priklausomybės kreivės, kaip apibrėžta ISO 834 (ISO 834:1975 1975), EN 1363-1:1999 (EN 1363-1:1999 1999), BS 476 Part-20 (BS 476: Part 20:1987 1987), ASTM E 119 (ASTM E 119-12 1995), CAN/ULC S101-07 (CAN/ULC S101-07 2007) ir UL 263 (UL 263 2003). Darbe (ISO/TR 3956 1973) bandyta sujungti realių gaisrų sąlygas su standartinėmis statybinių konstrukcijų atsparumo ugniai bandymo sąlygomis. Bandymų metu pagal standartus ASTM E 119 ir ISO 834 buvo lyginamos gaisro kreivės atsižvelgiant į matavimo tikslumą ir nominalią krosnies temperatūrą. Buvo nustatyta, kad gaisrinių bandymų trumpesniu laiku (iki 1,5 h) ASTM testas yra šiek tiek griežtesnis nei ISO testas. Ilgesnių bandymų laikotarpiu skirtumas yra nereikšmingas, nors pagal ISO 834 kreivės temperatūra aukštesnė (Harmathy *et al.* 1987). Statybinių konstrukcijų atsparumo ugniai nustatymui Europos Sąjungos šalyse galioja visa grupė standartų, o pagrindinė informacija pateikiama standarte EN 1363-1:1999. Jame aprašyta naudojama įranga bei pagrindinės bandymo sąlygos. Nustatant statybinių konstrukcijų atsparumą ugniai, bandymų atlikimo tvarka yra panaši. Temperatūros kilimas krosnyje turi neišeiti už leistinų paklaidų ribų ir atitikti šią priklausomybę:

$$T - T_o = 345 \lg_{10} (8t + 1), \quad (1.1)$$

čia: t – laikas, min; T – krosnies temperatūra, pasiekta per laiką t , °C; T_o – pradinė krosnies temperatūra, °C.

Pagrindiniai bandymui naudojami prietaisai yra: krosnis (3x3x1,5 m), galinti užtikrinti bandymo sąlygas; apkrovos įranga (jei reikalinga), atitinkanti reikalavimus, įskaičiuojant termoporas krosnies vidaus bei bandinio vidutinei temperatūroms matuoti. Bandinių paviršiuje temperatūrai fiksuoti naudojamos chromel/aliumel tipo termoporos, krosnies viduje plokštelinės termoporos (LST EN 1363-2:1999).

Siekiant įvertinti plieninių konstrukcijų atsparumą ugniai, Lietuvoje ir daugumoje Europos Sąjungos šalių priimtas standartas EN 13381-8:2010 „Bandymo metodai nustatyti konstrukcinių elementų poveikį atsparumui ugniai. 8 dalis. Plieninių elementų reaktyvioji apsauginė danga.“, kuriame taip pat numatomi atlikti bandymai ir skaičiavimai. Norint nustatyti priešgaisrinės dangos efektyvumą esant atitinkamam plieninės konstrukcijos elemento masyvumo koeficientui, išmėginama visa gama bandinių. Pagrindinis kriterijus – laiko tarpas, per kurį konstrukcijos elementas pasiekia kritinę temperatūrą. Plieninėms konstrukcijoms ji nustatyta 500 °C. Projektuojant konstrukciją gali būti parenkama kritinė temperatūra nuo 350 °C iki 750 °C (LST EN 13501-2:2007+A1:2009 2009), tačiau kiekviena šalis pagal savo normatyvinius reikalavimus turi teisę pasirinkti skirtingą temperatūrą.

Didžiojoje Britanijoje kritinė temperatūra kolonomams laikoma 462 °C, sijoms 550 °C, sijoms apsaugotoms iš trijų pusių, kai viena pusė liečiasi su betonu 620 °C. Kritinė konstrukcinio elemento temperatūra nustatoma projektuojant bei užduodant jam keliamus reikalavimus (atsargos koeficientai, aukštingumas). Horizontalioms konstrukcijoms yra svarbūs kritiniai įlinkiai, vientisumas ir perkaitimas, vertikalioms – vientisumas ir perkaitimas, o laikančioms – dar ir kritinės deformacijos (STR 2.01.01(2):1999 2000). Plieninių konstrukcijų elementai skirstomi pagal profiliuoto skerspjūvį (LST ENV 1993-1-2 Eurokodas 3 1995): atvirojo I ir H; uždarojo apvalūs, stačiakampiai.

Bandymams atlikti naudojami atvirojo profilio konstrukcinių elementų duomenys, nes atvirasis profilis leidžia nuosekliau įvertinti termoizoliacines dangų savybes (LST EN 13381-8:2010 2010). Plieniniai elementai parenkami pagal naudojamą skerspjūvį: nuo mažiausio iki didžiausio su skirtingais dažų dangos storiais. Skerspjūvio koeficientas nustatomas remiantis LST ENV 1993-1-2:2000 4.2.5.1 p. nurodymais (LST ENV 1993-1-2, Eurokodas 3 1995):

$$A_p / V, \text{ m}^{-1}, \quad (1.2)$$

čia: A_p – konstrukcijos elemento skerspjūvio perimetras, m; V – konstrukcijos elemento skerspjūvio plotas, m^2 .

Sunkus ir masyvus plieninis elementas įkais lėčiau ir tokiu būdu jo atsparumas ugniai bus didesnis, o lengvas ir plonas perkais greičiau. Todėl užtikrinti tą patį atsparumą ugniai skirtingo masyvumo koeficiento

konstrukcijoms prireiks skirtingo storio dangos (Taylor 1990). Kaip skirtingais greičiais temperatūra kyla skirtingo masyvumo koeficiento plieniniuose elementuose pavaizduota 1.2 paveiksle.

1.2 pav. Neapsaugotų plieninių kolonų su skirtingais masyvumo koeficientais temperatūros kitimas priklausomai nuo laiko, atliekant bandymą pagal standartinio gaisro kreivę

Fig. 1.2. Unprotected steel columns with different cross-sectional temperature variation coefficients depending on the time of the test under the standard fire curve

Dangos efektyvumui nustatyti naudojami keturi skaičiavimo metodai su skirtingais pradiniais duomenimis (LST EN 13381-8:2010 2010, ENV 13381-4:2002 2003):

- pastovios lambdos metodas;
- kintamos lambdos metodas;
- skaitinės regresinės analizės metodas;
- grafinis metodas.

Kiekvienas metodas yra teisingas, bet naudojant skirtingus gautus bandymo rezultatus gaunami skirtingi galutiniai rezultatai. Kiekvienas iš šių metodų turi savo privalumų ir trūkumų. Labiausiai paplitęs yra skaitinės regresinės analizės metodas. Jis reikalauja mažiausiai bandinių. Profiliai, kurie turėtų būti išbandyti, kai naudojamas skaitinės regresijos metodas, yra aprašyti 1.1 lentelėje (ENV 13381-4:2002 2003).

1.1 lentelė. Bandinių skerspjūviai ir dangos storiai**Table 1.1.** Cross-sections of the specimen and coating thickness

Dangos storis	Masyvumo koeficientas A_p/V uždarasis profiliuotis/atvirasis profiliuotis, m^{-1}					
	50/70	—	80/116	104/153	212/145	—
Minimalus dangos storis	50/70	—	—	—	—	269/210
Vidutinis dangos storis	50/70	—	—	—	—	269/210
Maksimalus dangos storis	—	65/95	—	104/153	212/145	269/210

Vienu metu yra bandomi keli elementai, kurių išdėstymas pavaizduotas 1.3 paveiksle.

1.3 pav. Bandomųjų elementų išdėstymas bandymų krosnyje,

TP – termopora, (vaizdas iš viršaus)

Fig. 1.3. Specimens orientation in the test furnace, TP – thermocouple (top view)

Norint nustatyti dangos efektyvumą, yra bandomos (LST EN 13381-8:2010 2010):

- apkrauta sija;
- neapkrauta sija;
- apkrauta 3 m kolona;
- neapkrauta 2 m kolona;
- trumpos neapkrautos kolonos.

Temperatūros matuojamos termoporomis, kurių skaičius priklauso nuo bandinio matmenų (10–30 termoporų). Jos išdėstomos visu bandomo elemento perimetru. Pavyzdys pateiktas 1.4 paveiksle (LST EN 13381-8:2010 2010).

1.4 pav. Termoporų išdėstymo ant bandinio schema
Fig. 1.4. Thermocouple location on the specimen scheme

Laikantis teorinio požiūrio, kad kolonos yra stipriau veikiamos gaisro apkrovos nei sijos ar santvaros, pagrindinėms savybėms nustatyti daugiausiai bandomos kolonos. Tačiau skiriasi jų panaudojimo pobūdis ir sąlygos. Skaičiavimams naudojami neapkrauti elementai. Apkrauti elementai naudojami patikrinimui, kai situacija yra artima neapkrautos konstrukcijos elemento temperatūrai laike, tam įvestas koreliacijos koeficientas R . Šis koeficientas turi būti artimas vienetui (LST EN 13381-8:2010 2010). Duomenų apdorojimas realizuojamas rankiniu būdu ir naudojant programinę įrangą. Nustačius atvirojo profiliuoties konstrukcijos elementui reikalingą priešgaisrinės dangos storį bei panaudojus tuos pačius bandymo rezultatus, galime apskaičiuoti ir uždarojo profiliuoties elemento priešgaisrinės dažų dangos storį, tačiau koregavimo koeficientas negali būti didesnis už 1,5. Kadangi temperatūrų pasiskirstymas esant tam pačiam elemento masyvumo koeficientui skiriasi, negalime taikyti gautų rezultatų atviriems profiliuoties, o turime juos taikyti uždariems. Atliekant dangos savybių įvertinimą, atsižvelgiama ir į galiojančius norminius aktus, todėl ta pati apsauginė danga gali būti ir skirtingų savybių. Nustatant

priešgaisrinės išsipučiančios dažų dangos storį skaičiuojant skaitinės regresinės analizės metodu, pakanka naudoti devynių bandinių duomenis, tačiau jie turi būti išsidėstę atitinkama sklaida (ASFP: 2007; ENV 13381-4:2002 2003).

Priešgaisrinių išsipučiančių dangų analizei bei jų veikimo mechanizmo paaiškinimui reikia įvertinti jų šilumines ir atsparumo ugniai charakteristikas. Šiluminėms savybėms įvertinti, be didžiagabaričių bandymų, galima pasirinkti vienpusio kaitinimo metodą, kuris yra pagrįstas kryptingu bandomosios konstrukcijos šilumos srauto poveikiu. Tokiu principu buvo bandomos medinės konstrukcijos ir putų polistirenu apšiltinto fasado fragmentai (Lipinskas, Mačiulaitis 2005; Nyderis, Mačiulaitis 1999). Šiuo principu pagrįstas statybinių medžiagų tyrimo metodas pirmą kartą panaudotas aštuntajame dešimtmetyje įvairių konstrukcijų atsparumo ugniai įvertinimui (Хлевчук, Артыкпаев 1973; Lukošius, Mačiulaitis 2002).

Taigi norint įvertinti priešgaisrinių išsipučiančių dangų atsparumą ugniai, reikia atlikti daug ir sudėtingų bandymų bei skaičiavimų. Tačiau atliekant mokslinius tyrimus ir taupant laiką bei mažinant bandymų išlaidas, tikslinga vykdyti mažagabaričius bandymus, kurie taip pat leistų įvertinti šių dangų termoizoliacines savybes.

1.3. Priešgaisrinių išsipučiančių dažų dangų sudėtys, sandara ir savybės

Šiuo metu pagrindinės priešgaisrinių išsipučiančių dažų dangų kompozitinės medžiagos yra (Duquesne *et al.* 2004; Almeras *et al.* 2002; McGinniss *et al.* 1999; Deogon 1991; Jimenez 2006; Zhenyu 2006; Duquesne *et al.* 2004; Council Directive 1999/13/EC 1999; Hanafin, Bertrand 1998; Olcese, Pagel 1999; Khan *et al.* 2005):

- organiniai sintetiniai ir elementų organiniai bei dirbtiniai, polimeriniai, oligomeriniai ir/ar netgi monomeriniai rišikliai (akrilas, akrilvinilas, fosfato karbamidformaldehydas, melamino fosfatas, mono amonio polifosfatas, diamonio fosfatas, amonio fosfatas, karbamido ir amonio fosfatas, vinilchloridas, etileno kopolimeras, chlorsulfonintas polietilenas, vinilo toluenas, akrilo arba akrilato kopolimeras, etileno vinilo chloridas, vinilacetatas, vinilchlorido ir etileno terpolimeras, vinilacetato ir vinilchlorido kopolimerai, modifikuoti alkidai, uretano ir akrilo kopolimerai, celiuliozės eteriai, polivinilacetatas, polivinilchloridas, pentaetritolio, melanino, epoksidinės ir kitos, ypač halogenų turinčios, polimerinės ir kopolimerinės dervos, krakmolas, dekstrinas, sacharozė);

- neorganiniai ir organiniai, atsparumą ugniai didinantys antipireniniai, įskaičiuojant ir išskiriančius dujas, priedai (karbamidas, p-tolueno sulfonil-

hidrazidas, azodikarbonamidas, cianguanidinas, diciandiamidas, diamino-fenazinas, boraksas, cinko karbonatas ir chloruotas parafinas, amonio ortofosfatai, amonio polifosfatai, trichloretilfosfatas, boro rūgštis);

– kiti funkciniai priedai, įskaičiuojant iniciatorius, kietintojus, pigmentus, užpildus ir t.t. (titano dioksidas, bario sulfatas, žerutis, kalcio karbonatas, geležies oksidas, cinko oksidas, molis, kaolinas, kalcio sulfatas, diciandiamidas, silicio oksidas, stiklo granulės, mineralinis plaušas, stiklo grūdėliai, stiklo pluošto ar kvarco skaidulos, silicio dioksidas).

Priešgaisrinių išsipučiančių dažų dangų tikslas yra padidinti konstrukcijų atsparumą ugniai. Visų pirma, dangos aukštoje temperatūroje paprastai sudaro nestiprią putą, kuri yra labai trapi, ir gaisro metu pasireiškiantis oro judėjimas gali ją pažeisti, taip atverdamas plieno paviršių. Tai riboja dangos panaudojimą, ir ji tam tikromis gaisro sąlygomis tampa netinkama. Dangos, kurių susidariusi puta gali atlaikyti turbulentinį oro srautą, paprastai yra gaminamos panaudojant organinius tirpiklius, erdvinės struktūros organinius polimerus ir polifosfatus ar pirofosfatus (Hill 1993).

Patentiniuose aprašymuose pateikiama daug įvairių sudėčių. 1975 metų patente pateikta tokia priešgaisrinių išsipučiančių dažų komponentų sudėtis: vanduo 30–54 %, kalio tripolifosfatas 0,2–0,6 %, etoksilintas ricinos aliejus 0,2–0,4 %, fenilgyvsidabrio acetatas (30 %) 0,03–0,06 %, vaško-riebalų esteris (12%) 0,2–0,5 %, dipentaeritritolis 4,0–7,0 %, chloruotas parafinas iki 3,6 %, titano oksidas 4,0–5,0 %, melamino pirofosfatas 16,5–28,0 %, vinilacetato kopolimero derva (55 %) 11–20 %, hidroksietil-celiuliozė 5–11 % ir stiklo pluoštas 0,1–2,8 %. Nustatyta, kai panaudota 2 % stiklo pluošto, sumažėja liepsnos plitimas (Fessler, Tredinnick 1975).

1993 metų patente pirmą kartą panaudotas mono amonio fosfatas. Taip pat pateikiama naudingos informacijos, jog, gaminant dangų medžiagą, kuri susideda iš fosforo rūgšties, melamino ir mono amonio fosfato, ir laikantis tam tikrų technologinių gamybos procesų, mono amonio fosfatui ištirpdinti reikalinga žemesnė temperatūra (Hill 1993).

Dažniausiai priešgaisrinėse dangose naudojamos medžiagos, išskiriančios inertines dujas, kurios nepalaiko liepsnos ir tarnauja kaip papildoma izoliacija, stabdanti šilumos plitimą į gilesnius dangos sluoksnius. Stengiamasi parinkti tokias medžiagas, kurios gali sugerti daug šilumos bei pagerinti dangos termoizoliacines savybes ir taip pat stabdyti liepsnos plitimą, kuris yra svarbus gaisro padarinyš. Dangose taip pat naudojamos įvairios paviršiaus aktyvios medžiagos ir kietikliai (Hanafin, Bertrand 1998). Priešgaisrinėse dangose vanduo yra naudojamas kaip tirpiklis arba skiediklis. Vandens naudojimas taip pat gerokai prisideda prie žmonių saugos darbe, aplinkos apsaugos, tad sumažina pavojų žmogaus sveikatai. Nustatyta, kad priešgaisriniais dažais, kurių tirpiklis vanduo, negalima dengti esant plieninių paviršių temperatūrai žemiau +5 °C, nes

gali susidaryti rasos taškas. Taip pat šias dangas po padengimo 48 val. būtina apsaugoti nuo lietaus poveikio (Liu 2003).

Priešgaisriniai išsipučiantys dažai taip pat naudojami tekstilės gaminių impregnavimui, kad sumažintų liepsnos plitimą gaminių paviršiumi. Patente pateikiama tokia priešgaisrinių išsipučiančių dažų sudėtis: vandens 28,8 %, naftaleno sulfonato 0,8 %, polioksietileno tridecilo alkoholio 0,72 %, amonio kazeino 4,28 %, paviršiaus aktyvios medžiagos 1,4 %, melamino 8,1 %, mono amonio polifosfato 20,2 %, pentaeritritolio 8,1 %, cinko borato 5,69 %, stibio oksido 5,21 %, karbamido 0,8 %, sulfonuoto dietilo heksanolio (60 %) 0,27 %, trietanolamino 0,68 %, aliuminio trihidrato 12,19 %, Karaya dervos (5 %) tirpalo 2,67 %. Priešgaisrinė išsipučianti danga naudojama tekstilės gaminių impregnavimui ruošiami sekančiai: anksčiau paminėto mišinio 68,3 %, akrilo latekso 19,2 %, vandens 3,04 %, chlorinto parafino aliejaus 8,88 %, skysto amoniako 0,29 %, tirštiklio 0,16 %. Nustatyta, kad mišiniu padengti bandiniai išlieka lankstūs, ir žymiai sumažėja liepsnos plitimas bandinių paviršiumi (Hairston *et al.* 2006).

Pagal patentą (Delobel, Jama 2004) papildomai į priešgaisrinius išsipučiančius dažus buvo įmaišyti skirtingų ilgių, perdirbti iš atliekų, armuojantys plaušeliai. Trumpi, kurių diametras nuo 2 μm iki 10 μm ir ilgis nuo 2 μm iki 35 μm ; taip pat tokie, kurių diametras nuo 0,75 mm iki 1,25 mm ir ilgis nuo 0,75 mm iki 2,45 mm; ir ilgi, kurių diametras nuo 0,65 mm iki 1,22 mm ir ilgis nuo 2,45 mm iki 10 mm. Plaušelių sudėtis: aliuminio oksidas (Al_2O_3) nuo 40 % iki 55 %, silicio oksidas (SiO_2) nuo 40 % iki 55 %, geležies oksidas (Fe_2O_3) nuo 0,02 % iki 0,1 %, titano dioksidas (TiO_2) nuo 0,01 % iki 0,1 %, kalio oksidas (K_2O) nuo 0,01 % iki 0,1 %, natrio oksidas (Na_2O) nuo 0,1 % iki 0,3 %, cirkonio oksidas (ZrO_2) nuo 0,1 % iki 0,3 %. Šių priešgaisrinių išsipučiančių dažų sudėtis: dujas išskiriančios medžiagos, monoamonio fosfatas, diamonio fosfatas, amonio polifosfatas arba kalio ortotrifosfatas ar jų deriniai (miltelių pavidalo arba granulės) nuo 10 % iki 40 %, anglėjimą sukeliančios arba putą sudarančios medžiagos, kaip antai dipentaeritritolis, poliolas ar chlorintas parafinas, ar jų deriniai (granulių pavidalo) nuo 4 % iki 35 %, dujas išskirianti medžiaga, pavyzdžiui, melamino, karbamido arba diciandiamido dervos nuo 5 % iki 35 %; plėvele formuojančios rišamosios medžiagos, pavyzdžiui, polivinilacetato, akrilo, vinilo, silikono ar/ir epoksidinės dervos, poliuretano dariniai nuo 1 % iki 50 %. Kaip tirpiklis naudojamas vanduo, alkoholiai, aromatiniai angliavandeniliai, nuo 10 % iki 60 %; pigmentai, pavyzdžiui, TiO_2 , ZnO , silikatai; užpildai, pavyzdžiui, CaCO_3 nuo 0 % iki 40 %. Nustatyta, kad dangos su plaušeliais gali būti dengiamos ant bet kokio paviršiaus, o susidariusios putos storis buvo nuo 5 iki 12 kartų didesnis už pradinį dangos storį (Hastings 1990).

Priešgaisriniai išsipučiantys dažai buvo sumaišyti su plaušeliais, kurių

sudėtyje – pluoštinės medžiagos, kalcio ir magnio silikatas. Plaušelių sudėtis: nuo 59 iki 67 masės dalių masės silicio oksido (SiO_2), nuo 0 iki 3,5 masės dalių aliuminio oksido (Al_2O_3), nuo 19 iki 35 masės dalių kalcio oksido (CaO) ir nuo 4 iki 17 masės dalių – magnio oksido (MgO). Pluoštinės medžiagos priešgaisrinėse dangose paprastai yra nuo 5 % iki 30 %, o pageidautina – nuo 8 % iki 18 % (pagal masę), o dar geriau – nuo 8 % iki 12 %. Vidutinis pluošto ilgis paprastai yra tarp 10 ir 500 mikronų, o pageidautina nuo 10 iki 300 mikronų. Pluošto skersmuo paprastai yra nuo 1 iki 10 mikronų. Sauso mišinio komponentų sudėtis: amonio polifosfatas 42 %, melaminas 18 %, pentaeritrolis 15 %, dicianidamidas 10 %, plaušeliai „Superwool X-607“ 8 %, „Ceepree“ 5 %, cinko boratas 2 %. Paruošti sausi mišiniai buvo sumaišyti su skirtingais vandenyje disperguojamais rišikliais: vinilo akrilo kopolimeras, poliakrilinės dervos, PVA, stireno ir akrilo kopolimeras. Iš viso buvo paruošta 12 dangų, kuriomis padengtos 6x10 cm plieninės plokštelės su 1,00–1,18 mm dangų storiais, ir atlikti bandymai. Atlikti bandymai parodė, kad kritinė 550 °C temperatūra neveikiamoje bandinio pusėje buvo pasiekta po 45–49 min, o susidariusios putos storis buvo 10–45 mm. Dangos, kurios sudėtis: sauso mišinio 55 %, PVA kopolimero 30 % ir vandens 15 %, parodė geriausias termoizoliacines savybes, nes plokštelės 550 °C temperatūrą pasiekė 48 bandymo minutę, o susidariusios putos storis buvo 45 mm (Wainwright, Evans 1994).

Kaip rišiklis buvo panaudota vandenyje disperguota vulkanizuota guma, kuri buvo sumaišyta santykiais 1:10, 1:5 ir 1:3 su sausu tokios sudėties mišiniu: amonio polifosfatas 46 %, dipentaeritrolis 27 %, melaminas 27 %. Plieninės kolonos 203x203 mm, Hp/A 200 padengtos šiomis dangomis, kurių sausos dangos storis buvo apie 1,27 mm. Kritinė temperatūra 550 °C buvo pasiekta vėliausiai 40 minutę to bandinio atveju, kurio dangos sudėtyje buvo daugiausia antipireninių priedų, o susidariusios putos storis siekė 50 mm (O'Brien, Schofield 2000).

Patente pateikta sudėtis: titano oksido 9,8 %, amonio polifosfato 29,0 %, pentaeritritolio 8,20 %, melamino 10,5 %, ricinos aliejaus 0,70 %, akrilo dervos 31,6 %, metilmetakrilato 10,2 %. Prieš padengimą sumaišyta su 1,0 % dibenzoilperoksido. Antra sudėtis: titano oksido 9,52 %, sferinių stiklo granulių 0,14 %, pentaeritritolio 8,89 %, cinko borato 1,01 %, melamino 14,8 %, aliuminio hidroksido 0,51 %, amonio polisfosfato 31,6 %, drėkiklio 0,38 %, akrilo dervos 33,11 %. Prieš padengimą sumaišyta su 1,0 % dibenzoilperoksido. Nustatyta, kad pirmąją dangą padengti bandiniai 550 °C pasiekė 63 minutę, o antrąją dangą padengti bandiniai – net 83 minutę (Green, Darysl 2005).

Patente ištirta priešgaisrinės išsipučiančios dangos sudėtis, kuri sudaryta iš chloruotos gumos 12 %, chloruoto parafino 7 %, pentaeritritolio 7 %, amonio polifosfato 22 %, melamino 8 %, titano dioksido 15 %, grafito 4 % ir skiediklio

SBP5:MIAK 83:17 24 %. Kai dalis melamino pakeičiama išsipučiančiu grafitu, padidėja putos masė ir tūris (Deogon 1991).

Dažai epoksidinio rišiklio pagrindu būna tokios sudėties: epoksidinė derva 35 %, bromuota epoksidinė derva 8 %, polisulfidas 13 %, melamino boratas 5 %, melamino fosfatas 8 %, titano dioksidas 15 % ir skiediklis Aromosol 7:2:1 14 %. Nustatyta, kad dėl kietos epoksidinės dangos trapumo susiformuoja plonas putos sluoksnis (Jimenez *et al.* 2006).

Priešgaisrinių išsipučiančių dažų dangų poveikis plieninių konstrukcijų paviršiams tiriamas atsižvelgiant į dangų fizines ir chemines savybes bei šilumos ir masės mainų procesus. Veikiant gaisro faktoriams, fiziniai rodikliai gali būti: dengiamos medžiagos šiluminė izoliacija besiplečiant dengimo sluoksnio tūriui, paviršiaus aušinimas dėl komponentų išgaravimo ir gazifikacijos, apsauginio barjero sudarymas tarp padengto sluoksnio ir aplinkos apsilvėdžius paviršiui; komponentes dengiančiųjų medžiagų difuzijos greičio pokytis. Tuo pačiu, gaisro sąlygomis cheminiai rodiklių pokyčiai pasireiškia dėl inhibitorių (garų fazėje) cheminio poveikio ir degimo (oksidacijos reakcijos) (Camino *et al.* 1984; Duquesne *et al.* 2005).

Polimerinės rišančiosios medžiagos degumą mažina, o kokso sudarymą skatina antipirenai. Kylant temperatūrai termoplastinis rišiklis minkštėja ir dėl dažų dangoje išsiskiriančių garų, o dujų rišiklio sluoksnis išputoja; taip auga termoizoliacinis sluoksnis. Šitie procesai pasireiškia, kai rišamosios medžiagos kietėjimo greitis atitinka išsiskiriančių dujų sudarymo greitį. Susidaręs putų pavidalo koksas yra pakankamai atsparus degimui ir irimui iki 500–600 °C. Po to, kylant temperatūrai, šis koksas suyra, gazifikuojasi, sudega ir atidengia saugomą paviršių. Dėl to kokso terminis stabilumas pasiekiamas stabilizatorių naudojimu – smulkiadispersinių, plaušinių priedų pavidalu. Šios medžiagos suteikia struktūrinio vientisumo putai, kai ji susiformuoja; jos yra nedegios, o turėdamos aukštą lydymosi temperatūrą, sugeria šilumą ir nepalaiko degimo. Dėka to koksas yra armuojamas ir pagerėja jo stabilumas esant ilgalaikėms aukštoms gaisro temperatūroms. Jau tapo taisykle, kad šitas išnagrinėtas mechanizmas yra panaudojamas sintetinių dervų arba tirpių polimerinių kompozicijų dažų dangose (McGinniss *et al.* 1996; Deogon 1991; Khan *et al.* 2005). Tarp jų dažniausiai sutinkami kondensacijos produktai: melamino formaldehidinės dervos ir jų mišiniai su epoksidinėmis dervomis, poliuretanais, lateksais, vinilacetatu ir chlorinto vinilo su vinilidenchloridu kopolimerų atvejais (Jimenez *et al.* 2006).

Plačiai naudojamos ir vandeniui skiedžiamos amino dervos su akrilatu ir lateksų priemaišomis tam, kad pagerinanti adheziją ir padengiamo sluoksnio elastingumą (Zhenyu *et al.* 2006). Efektyvūs antipirenai – rišikliai amino dervoms – yra amonio polifosfatai. Prie koksą sudarančių priemaišų priskiriami krakmolai, dekstrinai, sacharozė, dipentaeritritolis, kurie šildant ir veikiant

rūgščiajam katalizatoriui lengvai dehidratuojasi (Duquesne *et al.* 2004; Liu 2003).

Geriausiomis antipireninėmis savybėmis pasižymi amonio polifosfatas $[\text{NH}_4\text{PO}_3]_n$, kuris beveik netirpsta vandenyje ir turi didžiausią fosforo kiekį. Šios savybės leidžia jį naudoti dažuose, kurių skiediklis yra vanduo. Nors ir sunkiai skiedžiamas vandenyje, amonio polifosfatas yra labai gera medžiaga, pasižyminti apsaugos nuo ugnies efektyvumu ir labai geru sukibimu su metaliniais paviršiais. Pasiiekus apie 200 °C temperatūrą amonio polifosfatas, skirtingai nuo ortofosfatų, pradeda skilti į amoniaką ir į polifosfatinę rūgštį (1.5 pav.), kuri nekeičia savo savybių iki 800 °C (Jimenez *et al.* 2006).

1.5 pav. Amonio polifosfato skilimas

Fig. 1.5. Decomposition of ammonium polyphosphate

Naudojant amonio polifosfatus vandeniui tirpinamuose ar skiedžiamuose rišikliuose, atsiranda poreikis koreguoti susidarančių plėvelę medžiagų pH, apsaugojant jas nuo koaguliacijos ir senėjimo anksčiau laiko. Tam tikslui pridedami karboksimetilceliuliozės, dekstrino, kazeino arba tetrametilen-diamino, heksametiltetramino rišikliai. Dipentaeritritolis pradeda skilti 270 °C temperatūroje ir beveik visiškai suskyla esant 400 °C (Hairston *et al.* 2006; Dimanshteyn, Barone 2006; Hastings 1990; Zhou 2008). Norint padidinti kokso išeigą tiriamuose priešgaisriniuose dažuose naudojamas melaminas, kurio skilimas gaisro metu pateiktas 1.6 paveiksle. Melamino cheminė formulė – $\text{C}_3\text{N}_3(\text{NH}_2)_3$. Kitaip melaminas dar vadinamas 1,3,5-triazina-2,4,6-triaminas. Tai labai stabilus junginys, kuris, pasiekus 200 °C temperatūrą, pradeda sublimuotis (t.y. vyksta garavimas bei ryšių silpnėjimas) (Andersson *et al.* 2007).

1.6 pav. Melamino skilimas gaisro metu

Fig. 1.6. Melamine decomposition in fire

Melamino poveikis pagrįstas energetiniu sąveikavimu su azoto turinčiomis medžiagomis NH_2 grupių pavidalu (pvz., diciandiamidu). Melaminas prie $150\text{ }^\circ\text{C}$ temperatūros jungiasi su pentaeritritu taip suformuodami naują polimerą (1.7 pav.) (Wang *et al.* 2007).

1.7 pav. Melamino reakcija su pentaeritritu
Fig. 1.7. Melamine reaction with pentaeritrite

Tokios amino grupės padidina atsparumą ugniai dėl NH_3 , CO_2 , o vėliau vandens garų, N_2 išsiskyrimo, bei termiškai atsparių anglies liekanų susidarymo (Duquesne *et al.* 2004; Hastings 1990; Wainwright, Evans 1994; O'Brien, Schofield, 2000; Balabanovich 2005; Andersson *et al.* 2007).

Kaip užpildas taip pat gali būti naudojamas perlitas. Nuo karščio perlitas gali išsiplėsti net 20 kartų. Plėtimasis vyksta dėl vandens atskilimo. Kai temperatūra pasiekia $800\text{--}1100\text{ }^\circ\text{C}$, vandens molekulės, esančios perlite, virsta garais, kurie ir priverčia jį išsiplėsti (Горлов *et al.* 1980).

Linijinės struktūros polimeriniai rišikliai naudojami net tik tam, kad padidintų priešgaistrinės išsipučiančios dangos kietumą, bet ir dengiamojo sluoksnio storiui padidinti. Tam gali būti įvedamas disperguotas SiO_2 ar kiaušinio lukštas, kurie veikia kaip putojančio sluoksnio stabilizatoriai (Yew and Ramli Sulong, 2012, Wang *et al.* 2010). Kai pasiekama kritinės temperatūros riba, viršutiniai sluoksniai sukepa, koksuoja ir iš dalies lydosi, tai mažina šilumos patekimo į išputintą dangą greitį ir, tuo pačiu, į konstrukcijos vidų. Visa tai garantuoja viršutinės temperatūrinės ribos praplėtimą ir didina konstrukcijų atsparumą šilumos smūgiams (Duquesne *et al.* 2005; Duquesne *et al.* 2002; Jimenez *et al.* 2006).

Šiuolaikiniai požiūriai į pūtimosi mechanizmą yra šie: veikiant liepsnai arba aukštai temperatūrai vyksta rišklio suminkštėjimas ir, išsiskiriant skylančio antipireno dujoms, danga pučiasi. Tuo pačiu metu įvyksta anglies sluoksnio susidarymas dėl polihidratinių junginių hidratacijos, prisijungiant rūgštims. Tam tikrų junginių ir komponentų parinkimas leidžia panaikinti suminkštėjusių sluoksnių nutekėjimą nuo kaitinamo paviršiaus, o atitinkamų priedų pridėjimas

leidžia struktūrizuoti susidarančias putas ir sulėtina dangos degimą (Bodzay *et al.* 2011). Esminę reikšmę polimero degumui turi jo struktūra. Labiausiai degūs yra linijiniai polimerai (Green, Darysl 2005). Kuo ilgesnė linijinio stambiamolekulinio junginio molekulė, tuo lengvesni šiluminiai svyravimai apsprendžia jos skilimą. Polimerai, turintys tinklines (plokštumines) ir erdvinės struktūras, mažiau degūs. Tokių struktūrų polimerai turi stiprius pagrindinių valentingumų ryšius. Kad būtų įmanoma juos išardyti, reikia sunaudoti daug kartų didesnę energiją, negu linijinės struktūros atveju. Jei polimeras turi erdvinę struktūrą, susidedančią iš anglies, azoto ir vandenilio molekulių, jis yra mažiausiai degus ir labiau atsparus aukštomis temperatūroms (Wang, Yang 2012).

Priešgaisrinių išsipučiančių dažų sudėčių yra sukurta pakankamai daug. Tačiau labai didelė jų įvairovė ir labai sudėtingos panaudotų skirtingų medžiagų kompozicijos apsunkina paaiškinimą, kaip šie komponentai įtakoja įvairias dangų savybes. Kol kas nėra pasiekta bendros ir vieningos nuomonės apie labai detalų priešgaisrinių dažų veikimo mechanizmą. Išsiaiškinti tik pagrindinių komponentų bendrieji poveikiai. Atlikti tyrimai leidžia geriau įvertinti tik naujai pagamintų dažų charakteristikas (ypač atsparumą ugniai), neatsižvelgiant į tokių dažų dangų stabilumą bėgant laikui modeliuotose ir realiose eksploatacijos sąlygose.

1.4. Dangų toksiškumas

Degdamos skirtingos sudėties dažų dangos išskiria skirtingą dūmų kiekį (Duquesne *et al.* 2005; Jimenez *et al.* 2006), o su jais ir žmogui kenksmingų dujų, garų ir/ar kietų dalelių komponentus. Svarbu žinoti, kokį pavojų žmonių sveikatai gali kelti priešgaisrinės išsipučiančios dažų dangos gaisro metu. Intensyvus toksinių medžiagų (dujų, garų ir kietų anglies dalelių) susidarymas ir greitas sklidimas, ypač patalpoje, evakuaciniais keliais vyksta jau pradinėje gaisro stadijoje. Apie 82 % žmonių mirčių lemia išsiskyrusiuose degimo produktuose esančios toksinės medžiagos (Brushlinsky *et al.* 2006).

Degant polimerinėms medžiagoms, pastebėtas ne tik aukštas CO išsiskyrimo lygis, bet ir didelės CO₂ koncentracijos. Neigiamas CO₂ poveikis gaisro metu pasireiškia tuo, kad žmogus ima tankiai kvėpuoti, o tuo metu į organizmą patenka ir daugiau toksinių medžiagų, kurių yra degimo produktuose. Remiantis turimais duomenimis, galima teigti, kad esant trumpalaikiam CO₂ (15 min.) poveikiui, leistina koncentracija yra 1,5 %. Amoniakas (NH₃) yra bespalvės, turinčios aštrų bei dirginantį kvapą, degios dujos. Būtent dėl to, kad iškart jaučiamas jo specifinis kvapas, apsinuodijimų amoniaku skaičius nėra didelis. (Žukas *et al.* 2005). Anglies monoksidas (CO) – žinomas nuodas, nes daug žmonių juo apsinuodija gamyboje ir buityje. Atsiradus neaktyviam karboksihemoglobino (HbCO) kompleksui, pasireiškia deguonies trūkumas

organizme, kuris ypač pavojingas nervų, širdies bei kraujagyslių sistemoms. Anglies monoksido cheminis aktyvumas hemoglobinei yra 200–300 kartų didesnis nei deguonies (Darginavičienė, Drungilienė 2008).

Cheminės analizės duomenimis paremtas toksiškumo įvertinimas skirtas skaičiuojamajam numatomam toksiškumo efektui nustatyti pagal dujų degimo produktų pagrindinių komponentų išsiskyrimo lygius. Ši kryptis prieinamesnė tyrimų laboratorijoms ir leidžia riboti arba visiškai nenaudoti gyvūnų laboratoriniams tyrimams, taupyti laiką ir darbo sąnaudas. Tačiau šiam įvertinimui plėtoti reikia tam tikrų sąlygų: duomenų bazės apie degimo produktų toksiškumą; būdingųjų toksinių efektų ryšių su dujų koncentracijomis ir ekspozicijos trukme. Iš duomenų, gautų atliekant medžiagų degimo produktų toksiškumo eksperimentus ir analitinius tyrimus, padarytos išvados apie polimerinių medžiagų pavojingumą.

Pastebėta, kad esant tam tikriems metodikų skirtumams gaunami skirtingi tiriamųjų medžiagų įvertinimai. Todėl kartais abejojama tokių laboratorinių bandymų metu gautų praktinių rezultatų verte, o tai verčia riboti šių rezultatų panaudojimą (Jimenez *et al.* 2006). Priešgaisrinėse išsipučiančiose dangose naudojami įvairūs antipirenai, kurie mažina toksinių medžiagų išsiskyrimą (Karpovič *et al.* 2010). Antipirenų panaudojimo galimybės ir jų įtaka gaminio toksiškumui plačiai išanalizuota Karpovič darbuose (Karpovič 2009; Karpovič, Šukys 2009; Šukys, Karpovič 2010). Statybos produktų degumui įvertinti Lietuvos Respublikoje įteisintas Europoje standartizuotas bandymų metodas LST EN 13823:2010 „Statybinių gaminių reakcijos į ugnį bandymai. Statybiniai gaminiai, išskyrus grindų dangas, kuriuos veikia vieno degančio objekto šiluma“ (LST EN 13823:2010 2010). Tyrimų rezultatų apie priešgaisrinių išsipučiančių dangų gaisro metu išskiriamų dujų toksiškumą bei pačių dangų degumą ir jo charakteristikas literatūroje nebuvo rasta. Tačiau tokių dažų dangos sudarytos ir iš polimerų, kurie yra pakankamai degūs ir išskiria toksiškas medžiagas. Todėl toksiškumą būtina įvertinti.

1.5. Priešgaisrinių išsipučiančių dažų dangų ilgaamžiškumą įtakojantys veiksniai

Lietuvai būdingi vidurio klimatinės juostos orai, kurie priklauso ir nuo Baltijos jūros. Kaip rodo pastatų ir statinių projektavimo praktika, negalima nepaisyti klimato įvairovės. Kitaip tariant, temperatūros, kritulių, saulės spinduliuotės, vėjo, oro drėgumo kaitos, kai skaitinės vertės yra pakankamai skirtingos atskiruose Lietuvos regionuose (Barkauskas, Stankevičius 2000).

Senėjimu vadinamas procesas, kai medžiagos fizikinės savybės tam tikromis gamtinėmis aplinkos sąlygomis kinta nepaisant to, kad yra patenkinti

pirminiai eksploataavimo reikalavimai. Senėjimą paprastai rodo medžiagos negebėjimas atlikti numatytų funkcijų ar jos suirimas (Association for Specialist Fire Protection Technical Guidance Note 008 2008).

Aplinka gali smarkiai įtakoti ne tik priešgaisrinės išsipučiančios dangos sluoksnį, bet ir antikorozinio grunto sluoksnio storį bei papildomos apsauginės dangos sluoksnio savybes (LST EN ISO 12944-2:2000 2000). Kalbant apie plieno apsaugą bendrai, EN ISO12944-2:2000 standarte (LST EN ISO 12944-2:2000 2000) pateikiami kelių aplinkų apibrėžimai, vertinant jas koroziškumo požiūriu, remiantis atitinkamais anglinio plieno korozijos greičiais. C1 kategorijos aplinkoje (dažniausiai sutinkamos priešgaisrinėje apsaugoje) gali nebūti griežtai reikalaujama apsauga nuo korozijos. Tačiau statybvietėje atliekamam padengimui priešgaisrine išsipučiančia danga turi būti nurodytas padengimas antikorozinio gruntu, norint užtikrinti laikiną apsaugą statybos darbų metu (Association for Specialist Fire Protection Technical Guidance Note 008, 2008).

Greta bendro pastatų aplinkos koroziškumo įvertinimo taip pat reikia atsižvelgti į keletą kitų klausimų, kurie gali turėti įtakos priešgaisrinei išsipučiančiai dangai (LST EN ISO 12944-5:2007 2007; Association for Specialist Fire Protection Technical Guidance Note 008 2008):

- ar galėtų aplinka pasikeisti artimoje ateityje?
- ar esama kokios nors formos vietinio užteršimo? Pavyzdžiui, dideli sieros dioksido kiekiai galėtų sudaryti rūgštinę atmosferą, o tai savo ruožtu gali turėti įtakos parenkant vandeniui nelaidaus sluoksnio tipą.
- ar sąlygos pastate yra skirtingos? Pavyzdžiui, ar pastogės erdvės nėra šildomos, ir tokiu būdu jose nuolat susidaro kondensatas?
- ar kokie nors neįprasti procesai gali sukelti specialias lokalizuotas sąlygas, tokias kaip taškymasis, vandens kaupimasis, lokalizuotos aukštos temperatūros ir pan.?

Visoms kitoms aplinkų kategorijoms paprastai bus numatyta kokio nors lygio antikorozinė apsauga (LST EN ISO 12944-2:2000 2000). Standartas EN ISO12944-2:2000 (LST EN ISO 12944-2:2000 2000) nustato ryšį tarp šių kategorijų ir skirtingų apsauginių dangų sistemų sudėties ir storio, reikalingų užtikrinti trumpalaikę, vidutinę arba ilgalaikę apsaugą nuo korozijos. Tačiau tik C1 ir C2 kategorijos būtų laikomos tipinėmis dauguma padengimo plona išsipučiančios dengimo medžiagos plėvele atveju. Dėl tokių vietų atsiradimo galimybių, kuriose gali susidaryti neįprastos sąlygos, reikėtų imtis papildomos apsaugos priemonių nuo aplinkos ardųjų veiksmų.

Priešgaisrines išsipučiančias dažų dangas ant plieninių konstrukcinių elementų veikia supanti gamtinė aplinka, ir tas poveikis gali turėti įtaką dangų ilgaamžiškumui ir, tuo pačiu, jų rodikliams gaisro atveju. Todėl parenkant priešgaisrinius dažus turi būti atsižvelgta į aplinkos poveikius, kurie skirstomi

penkias kategorijas. Kiekvienai kategorijai būdingos aplinkos pavyzdžiai pateikiami 1.2 lentelėje.

1.2. lentelė. Aplinkos koroziškumo įvertinimo klasifikacija

Table 1.2. Environmental assessment of corrosivity classification

Koroziškumo kategorija	Korozijos/ Aplinkos poveikio greitis	Tipiniai aplinkos pavyzdžiai, esant vidutinio klimato sąlygoms	
		Laukas	Vidas
C1	Labai žemas	Nėra	Šildomų arba oro kondicionavimo sistemas turinčių pastatų vidus, kur atmosfera yra švari. Mažas santykinis oro drėgnumas ir nėra galimybės susidaryti vandens kondensatui, pvz., biurai, mokyklos, parduotuvės, viešbučiai.
C2	Žemas	Atmosfera, kurios užteršimo lygis yra mažas, o klimatas – gana sausas. Daugiausiai tai yra kaimo vietovės. Priešgaisrinė išsipučianti dangą dažniausiai naudojama apsaugotose zonose, pvz., po stogu.	Dažnai pasitaikanti drėgnos arba šlapios sąlygos. Nešildomi pastatai, kuriuose gali atsirasti vandens nuotėkis arba susidaryti kondensatas, pvz., nešildomi sandėliai, sporto salės, įrenginių patalpos ir pan. bei stogo tuštymės.
C3	Vidutinis	Miesto ir pramoninė atmosferos, kuriose užterštumas sieros dioksidu nėra didelis. Mažo druskingumo pakrantės zonos. Pavyzdžiui, aplinkos veikiama automobilių stovėjimo aikštelės.	Pastoviai drėgna atmosfera, tačiau gali būti šilta ir gerai ventiliuojama. Gamybinės patalpos, kuriose didelis drėgnumas ir nedidelis oro užteršimas, pvz., maisto pramonės įmonės, virtuvės, skalbyklos, alaus daryklos, pieninės.
C4	Aukštas	Pramoninės zonos, kuriose užterštumas sieros dioksidu yra didelis, ir pakrantės zonos, kurių druskingumas yra vidutinis. Tipinės zonos – naftos bazės talpyklos, naftos cheminių produktų įrenginiai ir pan., arba bet kokių užterštoje aplinkoje esančių konstrukcijų neapsaugoti išoriniai paviršiai.	Chemines medžiagas naudojančių įmonių, pastoviai išmetančių į atmosferą cheminių medžiagų turinčius garus, vidus. Pastovios šiltos ir labai drėgnos sąlygos, tokios kaip baseinai. Pakrantų laivų ir katerių statyklos.
C5–I	Labai aukštas	Pramoninės zonos, kurių atmosfera labai drėgna ir agresyvi. Plono sluoksnio priešgaisrinę išsipučiančią dangą reikėtų naudoti tik pasikonsultavus su gamintoju.	Nėra
C5–M	Labai aukštas	Pakrantės ir tolakai nuo kranto esančios zonos, kurių druskingumas yra didelis. Plono sluoksnio priešgaisrinę išsipučiančią dangą reikėtų naudoti tik pasikonsultavus su gamintoju.	Nėra

Klimato veiksniai neretai pakeičia veikiamų objektų spalvą, faktūrą, struktūrą, cheminę sudėtį arba formą. Klimatinis senėjimas statybines medžiagas priverčia natūraliai destrukтуриzuotis – koroduoti, oksiduotis, kalkėti, brinkti, tapti laidžiomis skysčiams, skeldėti, sluoksniuotis, skaidytis, sutrūkinėti. Natūralus statybinių medžiagų senėjimas – daugelį metų vykstantis procesas, kurį gali pagreitinoti įvairūs veiksniai (Stankevičius 1997). Pastatų fasadų apdailos senėjimą sukelia tokie klimatiniai veiksniai (Paukštys *et al.* 2001):

- saulės ultravioletinė spinduliuotė;
- ore esanti drėgmė, lietaus vanduo ir šlapdriba;
- oro temperatūros kitimai;
- įvairios druskos ir oro tarša.

Saulės spinduliuojama energija ir jos poveikis nevienodas, o labiausiai statybininkus domina ultravioletinė ir šiluminė šviesos spinduliuotė (Barkauskas 1977). Lietuvoje būna nuo 31 iki 42 atlydžių, kai temperatūra nukrinta iki -6°C ir pakyla iki $+7,5^{\circ}\text{C}$, kurie laikomi ypač agresyvūs (Ščemeliovas 1962). Veikiant šiems veiksniams dažų dangoje atsiranda pūslės, išorinis dažų sluoksnis pradeda luptis, trūkinėti.

Priešgaisrinių epoksidinių dangų ir cementinių tinkų sendinimą natūraliomis sąlygomis atliko Anglijos mokslininkai (Roberts *et al.* 2010). Mokslininkai naudojo dvyliką metalinių plokštelių, kurių matmenys $300\times 300\times 5$ mm ir 38, kurių matmenys $230\times 150\times 5$ mm, padengtas šešiais skirtingais priešgaisriniais dažais „Chartek III“ ir „Chartek IV“ (International Coatings, Olandija) „Firetex M90“ (Leighs Paints, Jungtinė Karalystė), „Nullfire System E“ ir „Thermo-lag 440“ (Carboline, JAV), „Pitt-Char“ (PPG Industries, Jungtinė Karalystė) ir tinku „Mandolite 550“ (Mandoval Coatings Ltd., Jungtinė Karalystė). Visų šių dangų rišikliai buvo skirtingos epoksidinės dervos, kurios pasižymi padidintu atsparumu aplinkos poveikiui, o dangos storis svyravo nuo 1,6 cm iki 4,5 cm.

Dangų sendinimas truko apie 10,5 metų. Sendinimas atliktas metalines plokšteles veikiant jūros vandeniu ir aplinkos drėgme. Plokštelės buvo paliktos naftos platformoje Šiaurės jūroje. Rezultatai parodė, jog drėgnas oras, saulė ir vėjai daro įtaką priešgaisrinių dažų efektyvumui. Sistemingai apžiūrint bandinius, pastebėtas pastovus korozijos požymių atsiradimas. Po metų pastebėtas bandinių išvaizdos pasikeitimas. Po dviejų metų – mikro įtrūkimai tarp dangos ir pagrindo didesniuose bandiniuose, pažeistose srityse – akivaizdi paviršiaus erozija. Praėjus trimis metams pastebimi įtrūkimai ir ant mažesnių bandinių šoninių sienelių. Po ketverių metų toliau stebimas dangų atsilupimas nuo plieninių bandinių kraštų. Atliekant apžiūrą penktais metais daugelis paviršiaus įtrūkimų buvo susijungę į tinklą, o šešiaisiais ir septintais metais papildomų pažeidimų nepastebėta. Po aštuonerių metų pastebėta, jog danga nuo kraštų atsilupusi iki 10 mm gylio, o paviršius išsisluoksniavęs iki 3 mm, ir jame

pastebimi žalieji dumbliai. Devintais metais paviršiaus įtrūkimai matomi dangose ant visų plokščių, taip pat šiek tiek progresavo išsisluoksniavimas nuo kraštų.

Po dešimties metų nuo vienos plokštės nukrito danga, bandiniai pasidengė žaliaisiais dumbliais, po dešimties su puse metų visų bandinių paviršiuje atsislauksniavo dangos dalis, atsilupę kraštai pasidengė dumbliais. Atsparumo ugniai bandymai įrodė, jog po 10,5 metų priešgaisriniai dažai pasižymi prastesnėmis termoizoliacinėmis savybėmis. Bandymų rezultatai byloja, kad efektyvumas gali sumažėti iki 25 %. (Roberts *et al.* 2010).

Priešgaisrinės išsipučiančios dažų dangos turi du skirtingus kontaktus: vieną su išorine aplinka arba su papildoma apsaugine danga, kitą – su gruntu, t. y., paviršiumi, kuriuo dengiamos plieninės konstrukcijos, arba paviršiumi su padidintu konstrukcijos atsparumu korozijai. Dažų dangų sankiba eksploatavimo metu kinta, todėl dažų dangos, kaip nevienalytės (nehomogeniškos) medžiagos, turi būti tiriamos fizikiniu ir cheminiu požiūriu, (Roberts *et al.* 2010; Miniotaite 1998; Miniotaite 1999; Miniotaite 2001).

Dažų dangų senėjimą taip pat veikia saulės spinduliuojama energija, kurią sudaro įvairios bangos, o jų poveikis nevienodas. Dėl šiluminės saulės spinduliuotės padidėja dažytų fasadų paviršiaus temperatūra. Vasaros metu išorinio paviršiaus temperatūra gali būti 2–3 kartus didesnė už aplinkos oro temperatūrą. Ultravioletinė saulės spinduliuotė dažų dangos paviršiuje sukelia fotocheminius kitimus. Ypač ji turi didelę svarbą polimerinių dangų ilgalaikiškumui (Miniotaite 2005).

Laboratorijose apdailos dangos dirbtinai sendinamos specialiose kamerose, imituojančiose natūroje vykstančius procesus. Kameriniai apdailos dangų ilgalaikiškumo tyrimai gana plačiai naudojami pradedant XX a. 6-tuoju dešimtmečiu. Pagreito tyrimo metodika skirta nustatyti medžiagų ir komponentų elgseną juos eksploatuojant, norint tai pasiekti, reikia suprasti irimo procesus. Eksploatavimo trukmės nustatymo tyrimą galima pagreitinoti sustiprinus sendinimo veiksnius. Buvo nustatyta, kad kartu veikianti UV spinduliuotė ir rūgščių nuosėdos sustiprina vienas kito poveikį ir pagreitina irimą (CEEES WG 1999; Stoye, Freitag 1998).

Dažai susideda iš keleto komponentų: plėvėdario (rišiklio), pigmento ir funkcinų priedų (antiprenų, užpildų, skiediklių ir kt.). Nuo pigmentų kiekio dažuose priklauso dažų plėvelės susidarymas, blizgesys, atsparumas ir vandens pralaidumas. Jei dažų dangos plėvėdaris yra per silpnas, ji gali prarasti sluoksnio tankumą (lankstumą) ir tapti trapią. Todėl, kaip papildomai apsauganti nuo aplinkos poveikių gali būti naudojama epoksidinės dervos danga. Tačiau nebuvo ištirtas UV saulės spinduliuotės poveikis šių medžiagų senėjimui, nors tai yra svarbus polimerų senėjimo veiksnys, sukeliantis paviršiaus skilimą, mikro pleišėjimą ir polimerų trapumą. Cheminės gamybos cechuose, nešildomuose

sandėliuose ir kitur, kur galimas gamybos teršalų poveikis ir kiti mikroklimato poveikiai, gali pasireikšti tokių poveikių sinergizmas. Pagrindinių klimatinių veiksnių poveikis išorinių paviršių ilgalaikiškumui nėra pakankamai ištirtas (Stankevičius 1997; Paukštys 2001; Barkauskas 1991).

Nėra pakankamai gerai išnagrinėtas klimatinių ilgalaikiškumo bandymų modeliavimas ir jų pritaikymas bei panaudojimas konkrečioms aplinkoms. Pagreitinto statybos produktų sendinimo klimatinėse bandymų kameroje rezultatai mažai susieti su jų ilgalaikiškumu natūroje, kadangi tokių tyrimų su priešgaisrinėmis dangomis beveik neatlikta. Priešgaisrinė danga turėtų visiškai išlaikyti savo termoizoliacines ir mechanines savybes bei atlikti savo funkcijas per visą pastato gyvavimo trukmę. Naujos priešgaisrinės dangos yra sertifikuotos ir atitinka visus gaisrosaugos reikalavimus, tačiau ar jų savybės nekis visą jų naudojimo laiką, yra sunku atsakyti.

1.6. Analitinės mokslo darbų apžvalgos apibendrinimas ir disertacijos uždavinių formulavimas

Iš šiame skyriuje atliktos literatūros analizės daromos tokios išvados:

1. Priešgaisrinės išsipučiančios dangos plačiai naudojamos ir labiausiai paplitusios priemonės plieninėms konstrukcijoms apsaugoti nuo ugnies poveikio.

2. Atmosferos veiksniai, įtakoja statybos produktų ilgaamžiškumą, tačiau tokio tipo tyrimų su priešgaisrinėmis išsipučiančiomis dangomis atlikta labai mažai. Taip pat nerasta duomenų apie priešgaisrinių išsipučiančių dangų savybių pokyčius atlikus kelis modeliuotus eksploatacinius sendinimo ciklus.

3. Glaustai aprašyti priešgaisrinių išsipučiančių dangų veikimo principai, kai termoizoliacines savybes užtikrina aukštoje temperatūroje susidaręs kokso sluoksnis. Įvardyta daug skirtingų komponentų, kurie gali būti naudojami priešgaisrinių išsipučiančių dažų gamyboje, ir bandyta įvertinti jų savybes. Tačiau beveik nebuvo vertinamos tokių dažų dangų degumo ir toksiškumo charakteristikos.

4. Išnagrinėti galimi tokių dangų efektyvumo nustatymo metodai, tačiau jie yra pakankamai skirtingi ir tos pačios medžiagos taikymo atveju gali duoti skirtingas charakteristikų reikšmes įvertinant jų atsparumą ugniai.

Remiantis šiomis išvadomis, suformuluotas toks pagrindinis darbo tikslas: nustatyti įvairių priešgaisrinių išsipučiančių dažų dangų, skirtų plieninių konstrukcijų apsaugai, atsparumą ugniai priklausomai atmosferinių veiksnių, degumą, toksiškumą, ilgaamžiškumą ir viršutinių apsauginių dangų įtaką šioms

savybėms, bei įvertinti veiksnius, lemiančius priešgaisrinių išsipučiančių dažų dangų pokyčius, ir destrukciją.

Darbo tikslui pasiekti darbe reikia spręsti šiuos uždavinius:

1. Atsižvelgiant į priešgaisrinėmis išsipučiančiomis dangomis padengtų konstrukcijų eksploatacijos sąlygas, skirtingais bandymo metodais atlikti atsparumo ugniai tyrimus.
2. Iširti priešgaisrinių išsipučiančių dažų dangų, skirtų plieno konstrukcijų apsaugai, atsparumą ugniai, degumą, toksiškumą ir įvertinti papildomų apsauginių dangų įtaką.
3. Atlikti priešgaisrinių išsipučiančių dažų dangų tyrimus skirtingais dirbtinio sendinimo režimais modeliuojant aplinkos sąlygas ir natūrinio poveikio būdu, kad būtų nustatyta šių sendintų dangų senėjimo priežastis ir sendinimo įtaka atsparumo ugniai pokyčiams. Aprašyti priešgaisrinių išsipučiančių dažų dangų destrukcijos mechanizmą.
4. Remiantis tyrimų rezultatais, parengti metodiką, leidžiančią nustatyti priešgaisrinės išsipučiančios dangos tapatumą ir rekomendacijas, skirtas plieninių konstrukcijų padengimui, priežiūrai, tokių dažų dangų renovacijai atlikti.

Tyrimams naudotos medžiagos ir bandymų metodikos

Šiame skyriuje apžvelgiamas priešgaisrinių išsipučiančių dangų bandinių paruošimas, pristatomi jų tyrimo metodai, laboratorinė įranga.

2.1. Tyrimams naudotos medžiagos ir bandiniai

2.1.1. Tyrimams naudotos medžiagos

Bandinių plieninių paviršių valymui naudotas gamintojo Danushis Chemicals skiediklis „Skiediklis 646“, kuris yra aromatinių angliavandenilių ir spiritų mišinys, sudėtyje yra iki 60 % toluolo, iki 15 % n-butanolio ir kt. Plieniniai bandinių paviršiai buvo pasirinktinai dengiami vienu iš dviejų skirtingu antikorozinu gruntu. Pirmuoju pasirinktas labiausiai Lietuvos Respublikos statybvietėse naudojamas plieninėms konstrukcijoms skirtas gamintojo Rilak antikorozinis alkidinis gruntas „GF-021“ (toliau – AG) kurio plėvelę sudaro gliftalinė derva. Grunto spalva raudonai ruda, nelakių medžiagų kiekis 49 ± 2 %, kai oro temperatūra 20 °C, o santykinė oro drėgmė 65 %, džiūvimo laikas 24 val. Antruoju buvo pasirinktas gamintojo PPG Industries „Amercoat 71 Primer“ (toliau – EDG) poliamidais modifikuotas epoksidinės dervos gruntas, tinkamas

ir jūriniam naudojimui. Lakiųjų organinių junginių kiekis 358 g/l. Džiūvimo laikas esant 50 µm šlapios dangos storiui temperatūroje 18–27 °C – 4 val. Priešgaisrinių išsipučiančių dangų tyrimams buvo naudojami tokie dažai, kurių charakteristikos pateiktos 2.1 lentelėje.

2.1 lentelė. Priešgaisrinių išsipučiančių dažų dangų rodikliai

Table 2.1. Characteristics of intumescent fire protective coatings

Dažų pavadinimas	Bazinis sintetinis rišiklis	Savitoji masė, kg/l	Nelakių medžiagų kiekis pagal masę, %	Lakiųjų organinių junginių kiekis, g/l	Tirpiklis ir/ar skiediklis
Steelguard FM 550	Akrilstireno kopolimeras	1,3	68±3	325	Ksilenas
Steelguard FM 585	Polivinilacetatinė derva	1,43	70±3	30	Vanduo
Teknosafe 100	Polivinilacetatinė derva	1,2	62	2,3	Vanduo
Teknosafe 2002-00	Polivinilacetatinė derva	1,01	60	3	Vanduo
Interchar 404	–	1,37	75±2	237	Ksilenas
Interchar 963	–	1,37	75	325	Toluolas
Char 21	Polivinilacetatinė derva	1,35±0,05	75±5	–	Vanduo
Char 22	–	1,40±0,05	77,3	–	Vaitspiritas
Pyro-tech SPX	Polivinilacetatinė derva	1,4	66	–	Vanduo
Sika Unitherm ASR	–	1,29	70	500	Toluolas
Protherm Steel	–	1,3–1,4	77±1	–	Solvesso 100
Nonfire S104	Polivinilacetatinė derva	1,27	62±2	15	Vanduo
Pyroplast-ST 200	–	1,24	–	450	Ksilenas
Pyroplast-HW	Polivinilacetatinė derva	1,39	–	85	Vanduo
Speedhide 47-2	Polivinilacetatinė derva	1,16	50±2	33	Vanduo
АгниТерм М	Polivinilacetatinė derva	1,4	65±5	–	Vanduo

Bandiniams padengti naudotos ir dvi papildomos viršutinės dažų dangos. Gamintojo PPG Industries „Steelguard 2458“ (toliau – ADD) pusiau matinė danga akrilo dervos pagrindu, kai dangos storis nuo 75 µm iki 125 µm, nelakių

medžiagų kiekis pagal masę 45 ± 2 %, o lakiųjų organinių junginių kiekis 499 g/l. Dengiamo paviršiaus minimali temperatūra turi būti 5°C , o santykinė drėgmė ne didesnė nei 90 %. Dangos džiūvimo laikas esant 10°C yra 10 dienų. Kai 20°C yra 7 dienos, o prie 30°C visai išdžiūsta per 4 dienas. Dar pasirinkti silikoninės dervos pagrindu gaminami firmoje Caparol papildomi apsauginiai vandeniu skiedžiami „Amphisilan“ matiniai dažai (toliau – SDD). Kai oro drėgmė 65% ir temperatūra 20°C išdžiūsta per 2–3 dienas.

Taip pat naudotos priešgaisrinės gipso plokštės Knauf „GKFI“: nominali ploto masė – $10,5 \text{ kg/m}^2$, storis – 12,5 mm, absorbuoto vandens – nuo 30 % iki 50 %, tankis – 800 kg/m^3 (± 20 %), grynumas – ≥ 95 %. Siūlėms užpildyti naudotas miltelinis glaistas Knauf „UNIFLOTT“, gaminamas iš specialaus gipso su polimerais ir mineraliniais užpildais. Naudotos Paroc „Rob 80t“ akmens vatos plokštės, kurių degumo klasė pagal LST EN 13501-1 yra A1, tankis $180 \pm 18 \text{ kg/m}^3$, taškinė apkrova 700 N. Plokštėje esantis rišiklis pradeda garuoti, kai temperatūra viršija 200°C , tačiau termoizoliacinės savybės kinta mažai, o stipris gniuždant sumažėja žymiai. Akmens vatos plokštėms suklijuoti naudoti modifikuoti užpildais skysto stiklo pagrindu „Kleber K84“ klijai. Savo savybių tokie klijai nekeičia net iki 1000°C temperatūros. Esant oro temperatūrai 20°C , jie išdžiūsta per 24 valandas.

Priešgaisrinių išsipučiančių dažų dangų savybėms įvertinti (po nugruntavimo) jomis buvo padengti skirtingi plieno gaminiai, t.y. plieninės plokštelės – $(250 \pm 1) \text{ mm} \times (200 \pm 1) \text{ mm} \times (1 \pm 0,1) \text{ mm}$ (plieno markė St3), plieninės plokštelės – $40 \times 40 \times 1 \text{ mm}$ (plieno markė St3), plieninės plokštelės – $400 \times 1500 \times 1 \text{ mm}$ (plieno markė St3), plieniniai dvitėjo profiliuočiai IPE 120.

2.1.2. Mažų matmenų plieninių plokštelių bandinių paruošimas

Bandiniams paruošti plokštelės, kurių kraštinių matmenys $(250 \pm 1) \text{ mm} \times (200 \pm 1) \text{ mm}$, giljotinos pagalba buvo iškirptos iš 1 mm storio plieno lakštų tam, kad būtų gautas galimai didžiausias skerspjūvio masyvumo koeficientas, kuris yra 3600 m^{-1} . Toks bandinių storis buvo pasirinktas ir norint gauti minimalią šilumos talpą, kuri leidžia padidinti temperatūros fiksavimo tikslumą. Taip pat toks didelis bandinių skerspjūvio koeficientas iki minimumo sumažina plieninės plokštelės šiluminės talpos įtaką. Jis buvo apskaičiuotas vadovaujantis LST ENV 1993-1-2 (2000) 4.2.5.1 p. nurodymais:

$$A_p / V = 0,9 / 0,0025 = 3600 \text{ m}^{-1}, \quad (2.1)$$

čia: A_p – konstrukcijos elemento skerspjūvio perimetras, m; V – konstrukcijos elemento skerspjūvio plotas, m^2 .

Nuo plokštelių buvo nuvalytos dulkės, o toliau plokštelės nuriebalintos preparatu „Skiediklis 646“. Nuo plokštelės paviršiaus išgaravus preparato likučiams, iš visų pusių užpurštas antikorozinis gruntas AG, kurio išeiga – 150 g/m², kad išdžiūvusio sluoksnio storis būtų 40–50 μm. Nugruntuotos plokštelės toliau buvo dedamos į džiovinimo kamerą, kur nustatyta džiovinimo temperatūra +25±2 °C. Po 24 val. plokštelės išimtos iš džiovinimo kameros, vizualiai patikrinta, ar nėra atsiradę dangos pažeidimų, ir 180 val. sudėtos kondicionavimo patalpoje, kurioje buvo palaikoma temperatūra +20±2 °C ir 65±5 % santykinė oro drėgmė. Praėjus kondicionavimo laikui, plokštelės paimtos iš patalpos, 24 taškuose išmatuotas ir užfiksuotas vidutinis grunto dangos storis. Jis svyravo nuo 40 μm iki 50 μm. Matavimams buvo naudotas vienas iš neardančiųjų metodų, magnetinės indukcijos principu veikiantis įrenginys – magnetinės indukcijos prietaisas „Mega Check“. Jis naudotas matuoti laidžios išdžiovintos plėvelės, padengtos ant plieninės plokštelės, storį (LST EN ISO 2808: 2007 2007). Prieš pradedant matavimus įrenginys buvo kalibruotas pagal gamintojo instrukciją, naudojant atitinkamą kalibravimo etaloną. Vienpusiams bandymams plokštelės priešgaisriniais išsipučiančiais dažais buvo dengiamos iš vienos pusės ir šonų. Plokštelių paruošimo etapai pavaizduoti 2.1 paveiksle.

2.1 pav. Plieninių plokštelių paruošimo bandymui etapai: a) švari plieninė plokštelė; b) plokštelė padengta gruntu; c) plokštelė padengta priešgaisrine išsipučiančia danga

Fig. 2.1. Steel plates for the test preparation phases: a) the clean steel plate; b) plate coated with primer; c) a plate covered with a intumescent fire protective coating

Tūriniams bandymams plieninės plokštelės priešgaisrine išsipučiančia dažų danga buvo padengiamos iš abiejų šonų bei pusių. Plieninių plokštelių padengimui panaudota 14 skirtingų priešgaisrinių dažų dangų. Kiekvieno tipo danga buvo padengta po 3 plienines plokšteles. Nudažytos plokštelės buvo dedamos į džiovinimo kamerą, kurioje palaikoma temperatūra +25±2 °C, o po

24 val. – išimamos ir 7 paras laikomos kondicionavimo patalpoje. Po tokio išlaikymo dažų danga pilnai sukietėjo. Prietaisu „Mega Check“ išmatuotas dangos storis, kuris svyravo nuo 980 μm iki 1050 μm . Tyrimams, skirtiems įvertinti skirtingas priešgaisrines dangas (akmens vata, priešgaisrinė gipso plokštė ir priešgaisriniai išsipučiantys dažai) skirtingomis metodikoms naudotos stačiakampės formos plieninės plokštelės, kurių išoriniai matmenys $(250 \pm 1) \text{ mm} \times (200 \pm 1) \text{ mm} \times (1 \pm 0,1) \text{ mm}$. Jos padengtos gruntu AG ir priešgaisrinę išsipučiančią dangą sudarančiais dažais „Speedhide 47-2“, dalis apsaugotos priešgaisrinėmis gipso plokštėmis „GKFI“, siūlės tarp kurių užpildytos glaistu „UNIFLOTT“. Kiekvieno bandinio išoriniai matmenys $(275 \pm 5) \text{ mm} \times (225 \pm 5) \text{ mm} \times (31 \pm 2) \text{ mm}$ (2.2 pav.).

2.2 pav. Bandinys su priešgaisriniu gipsu: 1 – gipso plokštė; 2 – sraigčiai; 3 – glaistas; 4 – termopora; 5 – plieninė plokštelė

Fig. 2.2. The specimen with fire plasterboard: 1 – plasterboard; 2 – screws; 3 – filler; 4 – thermocouple; 5 – steel plate

Bandymams, kurių apsauginė danga – akmenų vata, prie plieninės plokštelės pritvirtinus termoporą, akmenų vatos Paroc „Rob 80t“ 20 mm storio

plokštės buvo priklijuotos klėjais Promat „KLEBER K84“, o bandinio kraštai papildomai užglaistomi glaistu „UNIFLOTT“. Kiekvieno bandinio išoriniai matmenys $(290 \pm 5) \text{ mm} \times (240 \pm 5) \text{ mm} \times (46 \pm 2) \text{ mm}$ (2.3 pav.).

2.3 pav. Bandinys su akmens vata: 1 – akmens vata; 2 – glaistas; 3 – termopora; 4 – plieninė plokštelė

Fig. 2.3. The specimen with rock wool: 1 – rock wool; 2 – filler; 3 – thermocouple; 4 – steel plate

Bandiniai skirti dirbtinio sendinimo ciklui pagal I režimą paruošti naudojant plienines plokšteles $(250 \pm 1) \text{ mm} \times (200 \pm 1) \text{ mm} \times (1 \pm 0,1) \text{ mm}$, padengiant jas $40\text{--}50 \text{ }\mu\text{m}$ storio antikorozinio gruntu AG, tačiau jos buvo padengtos plonesnio storio $(450 \pm 50 \text{ }\mu\text{m})$ priešgaisrinėmis išsipučiančiomis dangomis. Padengimui pasirinktos keturios priešgaisrinių išsipučiančių dažų rūšys: „АгннТерм М“, „Steelguard FM585“, „Steelguard FM550“ ir „Char 21“. Viena bandinių serija buvo padengta papildoma apsaugine (nepriešgaisrine) dažų danga ADD siekiant išvengti priešgaisrinių išsipučiančių dažų kontakto su drėgnu oru ir įvertinti šios dangos poveikio efektyvumą. Nominalus išdžiuvusios antikorozinės dangos storis buvo $40\text{--}50 \text{ }\mu\text{m}$.

Plieninių plokštelių $(40 \pm 1) \text{ mm} \times (40 \pm 1) \text{ mm} \times (1 \pm 0,1) \text{ mm}$. bandiniai skirti dirbtinio sendinimo ciklą pagal II režimą tyrimams, buvo dengiami 40–50 μm AG antikorozinio gruntu bei dažais: „Steelguard FM585“, „Steelguard FM550“ ir „Char 21“ laikantis ankščiau nurodytos bandinių ruošimo metodikos.

Priešgaisrinių išsipučiančių dažų dangų degumo tyrimams buvo paruošti bandiniai $(500 \pm 1) \text{ mm} \times (1500 \pm 1) \text{ mm} \times (1 \pm 0,1) \text{ mm}$ plieno lakštus St3 klasės padengiant 40–50 μm AG antikorozinio gruntu ir skirtingomis dangomis: „Steelguard FM585“ ir „Steelguard FM550“, kai pagal standartus nereikalaujamas papildomas apsauginis sluoksnis sausoms vidinėms C1 kategorijos patalpoms (LST EN ISO 12944-2:2000 2000). Bandinių paruošimas atliktas laikantis analogiško eiliškumo, kaip ir mažųjų plieninių plokštelių atveju. Viena bandinių serija papildomai padengta 40–50 μm apsaugine ADD danga. Padengti bandiniai džiovinami iki visiško dangos išdžiūvimo.

2.1.3. Plieninių dvitėjų bandinių paruošimas

Atsparumo ugniai bandymams pasirinktos 1 m ilgio dvitėjo profiliuotio IPE 120 kolonos. Paveiksle 2.4 pateiktas plieno dvitėjo profiliuotio IPE 120 su matmenimis. Plieninių dvitėjų masyvumo koeficientas apskaičiuotas vadovaujantis LST ENV 1993-1-2:2000 4.2.5.1 p. nurodymais:

$$A_p / V = 474,96 / 1321 = 359,6 \text{ m}^{-1}, \quad (2.2)$$

čia: A_p – konstrukcijos elemento skerspjūvio perimetras, m; V – konstrukcijos elemento skerspjūvio plotas, m^2 .

2.4 pav. IPE 120 dvitėjo profiliuotio, čia: $R - 7 \text{ mm}$, $s - 4,4 \text{ mm}$, $t - 6,3 \text{ mm}$, $b - 64 \text{ mm}$, $h - 120 \text{ mm}$

Fig. 2.4. IPE 120 steel profile, where: $R - 7 \text{ mm}$, $s - 4,4 \text{ mm}$, $t - 6,3 \text{ mm}$, $b - 64 \text{ mm}$, $h - 120 \text{ mm}$

Plieninių dvitėjų IPE 120 (EN 10034:1993 2000), padengtų priešgaisrinėmis išsipučiančiomis dangomis, atsparumo ugniai bandymai ir skaičiavimai atlikti laikantis standarto LST EN 13381-8:2010 reikalavimų. Bandiniai ruošiami laikantis analogiškos paruošimo metodikos, kaip ir mažųjų plieninių plokštelių bandinių. Detalios bandinių medžiagų kombinacijos pateiktos 2.2 lentelėje.

2. 2 lentelė. Bandinių paruošimui panaudotų medžiagų kombinacijos

Table 2.2 Samples preparation used combination of materials

Bandinio nr.	Gruntas	Priešgaisriniai išsipučiantys dažai	Papildoma apsauginė nepriešgaisrinė danga
1	2	3	4
A1	EDG	Steelguard FM550	–
A2	AG		–
A3	EDG		ADD
A4	AG		ADD
A5	AG		SDD
B1	EDG	Steelguard FM585	–
B2	AG		–
B3	EDG		ADD
B4	AG		ADD
B5	AG		SDD
C1	AG	Char 21	–
C2	AG		SDD

Bandinių ruošiniai padengti skirtingais antikoroziniais gruntais: EDG ir AG, kurių išdžiūvusios dangos storis, išmatuotas prietaisu „Mega Check“, kito nuo 40 µm iki 50 µm. Padengimui naudoti priešgaisriniai išsipučiantys dažai: „Steelguard FM585“, „Steelguard FM550“ ir „Char 21“. Išmatuotas prietaisu „Mega Check“ sausos dangos storis buvo 410–540 µm. Padengimui taip pat naudojamos dvi apsauginės dangos: akrilo dervos pagrindo papildoma danga (toliau – ADD) ir silikoninės dervos pagrindo papildomi apsauginiai vandeniu skiedžiami dažai „Amphisilan“ (toliau – SDD), kurių sausos dangos storis, išmatuotas prietaisu „Mega Check“, buvo 40–50 µm.

Bandinių paruošimo etapai, susidedantys iš bandinių paviršiaus valymo, gruntavimo antikoroziniais gruntais, dažymo priešgaisrinėmis išsipučiančiomis dangomis ir dažymo papildomomis apsauginėmis dangomis, pateikti 2.5 paveiksle.

2.5 pav. Plieninių dvitėjų paruošimo bandymui etapai: a) švarus plieninis dvitėjas; b) plieniniai dvitėjai padengti priešgaisrinėmis dangomis; c) plieniniai dvitėjai padengti priešgaisrinėmis ir papildomomis dangomis

Fig. 2.5. Steel profile specimens preparation for test phases: a) the clean steel profile b) steel profiles covered with intumescent fire protective coatings c) steel profiles covered with intumescent fire protective coatings and additional top coats

Paruošti bandiniai suskirstyti į tris tapačias grupes. Viena grupė – pradiniam atsparumo ugniai įvertinimui; antrajai bandinių grupei atlikta 60 dirbtinio sendinimo ciklą pagal I režimą ir nustatytas atsparumas ugniai; trečioji grupė 12 mėn. išlaikyta nešildomoje patalpoje ir tik tada atlikti atsparumo ugniai bandymai.

2.2. Tyrimų metodikos ir įrangos

2.2.1. Tūrinis ir vienpusis kaitinimas pagal GTC/GBM 2 metodiką

Termoizoliacinėms priešgaisrinių išsipučiančių dangų savybėms nustatyti pagal GTC/GBM 2 metodiką (GTC/GBM 2 2002) paruošti bandiniai buvo tūriniai arba vienpusiai kaitinami elektrinėje krosnelėje SNOL. Krosnelėje galima išbandyti matmenų (250 ± 1) mm $\times$ (200 ± 1) mm $\times$ $(1 \pm 0,1)$ mm bandinius. Temperatūra krosnelėje ir bandinio temperatūra buvo matuojama K tipo termoporomis ($\varnothing$ 0,8 mm). Termoporų paklaida $1,5^\circ\text{C}$ matuojant temperatūrą ribose nuo -40°C iki $+375^\circ\text{C}$, o intervale nuo 375°C iki 1100°C matavimo paklaida buvo 0,4 %. Temperatūra fiksuota įrenginiu „Euroterm 401“, kuris gali užrašyti parodymus 1 s intervalu. Bandinių laikymo įtaisas užtikrina metalinių bandinių (plokštelių) stabilią padėtį viso bandymo metu ir minimalią įkaitusių krosnelės detalių įtaką plokštelių kaitimui. Bandymai atlikti aplinkos temperatūrai esant nuo $+10^\circ\text{C}$ iki $+30^\circ\text{C}$. Priešgaisrinei dangai išdžiuvus, bandiniai tvirtinami jų laikymo įtaise, kuris hermetiškai prispaudžiamas prie krosnelės angos ir užfiksuojamas. Bandiniai įtaisomi į laikiklį taip, kad nekontaktuotų su metalinėmis korpuso dalimis, kurios gali turėti poveikį jų

kaitimui. Įrenginio, skirto vienušiai kaitinti ir nustatyti metalo dangų termoizoliacines savybes, schema pateikta 2.6 paveiksle.

2.6 pav. Vienpusio kaitinimo įrenginys pagal GTC/GBM 2 metodiką: 1 – elektrinė krosnelė; 2 – elektrinės krosnelės valdymo blokas; 3 – bandinių laikymo įtaisas; 4 – temperatūros registravimo prietaisas; 5 – bandinys; 6 – bandinio įkaitimo temperatūros nekaitinamoje pusėje matavimo K tipo termopora

Fig. 2.6. One side heating device in accordance with GTC/GBM 2 methodology: 1 – electric oven; 2 – electric oven heating control unit; 3 – sample storage device; 4 – temperature recorder; 5 – specimen; 6 – K type thermocouple for measurement of sample unfired warm side

Atliekant bandymus, termoporų pagalba buvo matuojama bandinių temperatūra neveikiamoje plokštelės pusėje. Jų išdėstymas pateiktas 2.7 paveiksle.

2.7 pav. Temperatūros matavimo taškai: 1 – termopora, matuojanti bandinio temperatūrą; 2 – termopora, matuojanti temperatūrą krosnelėje

Fig. 2.7. Temperature measurement points: 1 – thermocouples, monitoring the temperature of the sample; 2 – thermocouples, monitoring the temperature of the oven

Naudotos „Filaflex RB/RB“ termoporos su specialia rišamąja medžiaga. Termoporos kalibruotos, kad būtų užtikrintas rezultatų tikslumas aukštoje temperatūroje iki 760 °C. Prieš pradedant bandymą, patikrintos termoporos, esančios krosnelės viduje, ir termoporos, matuojančios bandinio perkaitimą. Bandymas sustabdytas, kai temperatūra neveikiamoje plokštelės pusėje pasiekė 500 °C. Tada fiksuojamas ir laikas. Išėmus plokštelę, dvylikoje vietų išmatuotas susidariusios išsipūtusios dangos storis. Atliekant bandymus tūriniu principu, krosnelėje vietoje bandinio laikiklio buvo įstatytos ir naudojamos krosnelės durys, o bandinys patalpinamas krosnies viduje.

2.2.2. Tūrinis ir vienpusis kaitinimas pagal standarto LST EN 1363-1:1999 reikalavimus

Tūriniams plieninių profilių IPE 120 ir vienpusiams plieninių plokštelių $(250 \pm 1) \text{ mm} \times (200 \pm 1) \text{ mm} \times (1 \pm 0,1) \text{ mm}$ kaitinimo bandymams buvo panaudota vienintelė Lietuvos Respublikoje Gaisrinių tyrimų centre esanti Hasle gamintojo vertikali konstrukciją $3,4 \text{ m} \times 3,4 \text{ m} \times 1,5 \text{ m}$ (aukštis $\times$ plotis $\times$ gylis) atsparumo ugniai bandymų krosnis, atitinkanti bandymo standarto LST EN 1363-1:1999 keliamus reikalavimus (2.8 pav.).

2.8 pav. Bandymų įrangos pagal LST EN 1363-1:1999 reikalavimus bendras vaizdas
Fig. 2.8. Test equipment in accordance with the requirements of LST EN 1363-1:1999
the overall view

Pagrindinę bandymo įrangą sudaro:

- specialiosios konstrukcijos vertikali krosnis bandinio bandymo sąlygoms sukurti;
- valdymo įranga, reguliuojanti krosnies temperatūrą;
- įranga krosnyje esančių karštųjų dujų slėgiui reguliuoti ir matuoti;
- rėmas, kuriame gali būti surinkta bandomoji konstrukcija ir kurio padėtis krosnyje galėtų būti parinkta taip, kad būtų sudarytos tinkamos kaitinimo, slėgio ir atramos sąlygos;
- įranga krosnies ir bandinio neveikiamojo šono temperatūrai matuoti ir temperatūrai bandinio viduje matuoti;
- įranga bandymų laikui matuoti;
- įranga deguonies koncentracijai krosnies dujose matuoti.

Bandymų krosnis suprojektuota taip, kad joje būtų įmanoma:

- kaitinti vieną vertikalojo skiriamojo elemento pusę (vienpusiai);
- kaitinti elementą iš visų pusių (tūriniai).

Vidutinę krosnies temperatūrą, matuoja 16 plokščiųjų pirometrų, keliamą pagal standartinę gaisro kreivę (2.3 lentelė).

2.3 lentelė. Temperatūros priklausomybė nuo laiko

Table 2.3. Temperature dependence from the time

Laikas, min	Krosnies temperatūra, °C	Laikas, min	Krosnies temperatūra, °C
0	20	90	1006
5	576	120	1049
10	678	150	1082
15	738	180	1110
20	781	210	1133
30	842	240	1153
45	902	300	1186
60	945	360	1214

Plieninių elementų temperatūrai matuoti buvo naudojamos „Filaflex RB/RB“ termoporos su kalibruotais laidininkais, skirtais dideliu matavimų tikslumui. Jie apsaugoti „Filaflex“ izoliacija, kuri yra atspari dilimui ir išlieka lanksti aukštoje temperatūroje iki 760 °C.

Prie plieninio elemento termoporos buvo pritvirtintos taškinio suvirinimo įrenginių „WELD-A-WIRE II“. Suvirinimo vieta buvo padengta „PFC“ karščiui atspariais išsipučiančiais klijais, kurie ne tik padidina atsparumą ugniai, bet ir sustiprina termoporos tvirtinimą.

2.2.3. Degumo nustatymo bandymo metodas pagal LST EN 13823 standarto reikalavimus

Priešgaisrinių išsipučiančių dangų degumo charakteristikoms nustatyti buvo naudojamas vieno degančio objekto (toliau – SBI) bandymų stendas pagal standartą LST EN 13823:2010. Šis Europos standartas apibrėžia bandymo metodą, kaip nustatyti statybos gaminių degumo charakteristikas, veikiant bandinius vieno degančio objekto išskiriama šiluma. SBI bandymo įrangą sudaro bandymų patalpa, bandymų aparatūra (vežimėlis, rėmas, degikliai, gaubtas, kolektorius ir vamzdžių sistema), dūmų išmetimo sistema ir bendroji matavimo įranga (2.9 pav.). SBI įrenginiai susideda iš dviejų vienodų degiklių, vienas yra vežimėlio dugne (pagrindinis degiklis), kitas tvirtinamas rėmelio skyriuje (pagalbinis degiklis). Kampinį bandinį sudaro du sparnai, pavadinti trumpuoju ir ilguoju sparnais. Didžiausias bandinio storis – 200 mm. Skydiniai gaminiai turi būti šių matmenų:

- a) trumpasis sparnas: $495 \pm 5 \text{ mm} \times 1500 \pm 5 \text{ mm}$,
- b) ilgasis sparnas: $1000 \pm 5 \text{ mm} \times 1500 \pm 5 \text{ mm}$.

2.9 pav. Vieno degančio objekto bandymų įrangos bendra schema

Fig. 2.9. General scheme of single burning item test equipment

Produkto degumui įvertinti bandomi trys bandiniai (trys ilgųjų ir trumpųjų sparnų rinkiniai). Bandinys, sudarytas iš dviejų stačiu kampu sustatytų vertikalių sparnų, veikiamas kampo apačioje įrengto degiklio (pagrindinio degiklio) liepsna. Liepsna gaunama deginant per smėlio dėžę leidžiamas propano dujas, kurių išskiriamos šilumos galingumas $30,7 \pm 2,0$ kW. Bandinio eksploatacinių savybių vertinimo trukmė – 20 min. Eksploataciniai parametrai: šilumos susidarymas, dūmų susidarymas, šoninis liepsnos sklaidimas ir liepsnojančių lašelių bei dalelių kritimas. Prieš uždegant pagrindį degiklį, trumpą laiką matuojami tik degiklio šilumos našumas ir dūmų susidarymas, panaudojant toliau nuo bandinio įrengtą (pagalbinį) degiklį. Kai kurie matavimai daromi automatiškai, kai kurie – stebint vizualiai. Išmetimo vamzdyje įrengti jutikliai, kuriais matuojama temperatūra, šviesos sugėrimas, O_2 ir CO_2 srauto vamzdyje sukeliamas slėgių skirtumas. Šie dydžiai yra registruojami automatiškai ir panaudojami apskaičiuojant tūrinį srautą, šilumos išsiskyrimo greitį (HRR) ir dūmų susidarymo greitį (SPR). Vizualiai stebimas šoninis liepsnos sklaidimas bei liepsnojančių lašelių ir dalelių kritimas (LST EN 13823:2010 2010; Mačiulaitis, Lukošius 2006).

2.2.4. Dirbtinio sendinimo ciklų režimai ir natūralaus senėjimo sąlygos

Bandinių sendinimo esmė yra nustatyti, kaip keičiasi išsipučiančių dangų atsparumo ugniai parametrai. Priešgaisrinės išsipučiančios dangos buvo dirbtinai sendinimos dviem skirtingais režimais.

Bandymams naudoti kalibruota šaldymo kamera Whirlpool „AFG 543-C/H“, kurios matmenys 122 cm x 48 cm x 72 cm (ilgis x plotis x gylis), eksikatorius, kvarcinė lempa „SUNLAMP 70 UVA/B“, generuojanti ultravioletinius spindulius (galingumas 120W), bandinių kondicionavimo patalpa, kurioje palaikoma temperatūra $+20 \pm 2$ °C, o santykinė oro drėgmė 45 ± 5 %.

I pasirinktas toks modeliuotas bandinių bandymų režimas:

- tūrinis bandinių šaldymas 6 valandas šaldytuve -20 ± 2 °C temperatūroje;
- tūrinis bandinių šildymas 18 valandų eksikatoriuje arba bandinių kondicionavimo patalpoje $+20 \pm 2$ °C temperatūroje, esant santykiniai oro drėgmei 45 ± 5 %.

Vieno ciklo trukmė – 24 valandos.

II pasirinktas toks modeliuotas bandinių bandymų režimas:

- tūrinis bandinių šaldymas 6 valandas šaldytuve -20 ± 2 °C temperatūroje;
- vienpusis bandinių dangos švytinimas 1 valandą 1 m atstumu kvarcine lempa;

- tūrinis bandinių šildymas 17 valandų eksikatoriuje virš vandens $+20 \pm 2$ °C temperatūroje, esant santykinei oro drėgmei 95 ± 5 %.

Vieno ciklo trukmė – 24 valandos.

Natūraliam senėjimui įvertinti paruošti, kaip nurodyta 2.1.3 skyriuje, IPE 120 profiliuotieji bandiniai 12 mėn. buvo laikomi:

- padengti priešgaisrine išsipučiančia danga ir papildoma apsaugine nepriešgaisrine viršutine danga, lauko patalpoje PAGD prie VRM Gaisrinių tyrimų centro teritorijoje.

Lauko patalpos vyrausių drėgmės ir temperatūros vertės per tam tikrą laikotarpį, pateikiamos 2.4 lentelėje. Vyrausios drėgmės ir temperatūros vertės gautos apskaičiavus vidutinę tam tikro laikotarpio vertę pagal meteorologų pateiktus ištisą parą, kas valandą, matuotus duomenis.

2.4 lentelė. Lauko patalpoje vyrausios vidutinės santykinės drėgmės ir temperatūros verčių per tam tikrą laikotarpį, vidurkiai

Table 2.4. Average values of the moisture and temperature values outdoors during a certain period of time

Laikotarpis	Maksimali/ minimali santykinė drėgmė per laikotarpį, %	Oro vidutinė santykinė drėgmė per laikotarpį, %	Maksimali/ minimali temperatūra per laikotarpį, °C	Vidutinė temperatūra per laikotarpį, °C
2009-10-01 – 2009-10-31	100 / 50	87,98	+15 / –5	+4,8
2009-11-01 – 2009-11-30	100 / 55	90,94	+10 / –5	+3,34
2009-12-01 – 2009-12-31	100 / 42	86,92	+9 / –18	–2,97
2010-01-01 – 2010-01-31	100 / 45	82,88	–2 / –26	–10,55
2010-02-01 – 2010-02-28	100 / 45	86,51	+5 / –13	–3,98
2010-03-01 – 2010-03-31	100 / 32	83,36	+18 / –17	+0,39
2010-04-01 – 2010-04-30	100 / 20	71,64	+22 / –1	+8,19
2010-05-01 – 2010-05-31	100 / 31	77,59	+24 / +2	+13,89
2010-06-01 – 2010-06-30	100 / 29	76,38	+30 / +6	+16,63
2010-07-01 – 2010-07-31	100 / 42	75,67	+31 / +13	+20,38
2010-08-01 – 2010-08-31	100 / 31	78,25	+35 / +7	+19,36
2010-09-01 – 2010-09-30	100 / 52	84,23	+21 / +2	+11,34

2.2.5. Skenuojanti elektroninė mikroskopija

Priešgaisrinių išsipučiančių dangų paviršiaus struktūros analizei buvo naudojamas skenuojantis elektroninis mikroskopas JEOL „JSM-7600F“, kurio skiriamoji geba yra 1,5 nm, didinimas nuo 25 iki 1 000 000 kartų; bandymų metu naudota 4,0 kV įtampa, tiriamų bandinių paviršius padengtas auksu.

2.2.6. Derivatografiniai tyrimai ir statistinis duomenų apdorojimas

Terminėms priešgaisrinių išsipučiančių dangų savybėms ištirti buvo naudojami derivatografai NETZSCH „TG 209 F1 Iris“ ir „PT 1000“, registruojantys kreives TG, DTG, DTA. NETZSCH „TG 209 F1 Iris“ derivatografas, sujungtas su Furje transformacijos infraraudonųjų spindulių spektrometrijos prietaisu BRUKER Optics „FTIR TENSOR“, kuris naudojamas išsiskiriančių iš bandinio dujų analizei. Tyrimams naudotos įrangos schema pateikta 2.10 paveiksle.

2.10 pav. Terminės analizės įrenginio, sujungto su F-TIR dujų analizės prietaisu, schema
Fig. 2.10. Scheme of Thermal analysis device, connected to the F-TIR gas, analysis device

Bandinių terminėms savybėms tirti naudotas Linseis derivatografas „PT 1000“ serijos duomenys, kuriuo jie apdoroti remiantis standartų LST EN ISO 11357-1:2010 ir LST EN ISO 11358:2001 nuorodomis. Terminės analizės tyrimai buvo atlikti pasirinktose sąlygose, kurios pateiktos 2.5 lentelėje.

2.5 lentelė. Terminės analizės sąlygos

Table 2.5. Conditions of the thermal analysis

Parametras	Reikšmė
Maksimali temperatūra, °C	1000
Aplinka	Azotas (N ₂)
Dujų tekėjimo greitis, ml/min	10
Temperatūros kėlimo greitis, K/min	10
Bandinio masė, mg	7–11

Duomenų apdorojimui naudota programinė įranga „NETZSCH PROTEUS“ kartu su „Bruker OPUS“, kuri leido vienu metu apdoroti duomenis, gautus iš derivatografo ir spektrometro. Regresinei analizei atlikti duomenys buvo grupuojami ir paruošiami programa „MS Excel“, o duomenų regresinė analizė atlikta naudojantis „Statistica“ programiniu paketu. 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 ($y = b_0 \cdot e^{bx}$). Bandymų metu apskaičiuoti regresinio modelio kokybės rodikliai: koreliacijos R ir determinacijos R^2 . Šie koeficientai turi būti artimiausi vienetui (Sakalauskas 2003). Regresinė analizė taikoma, jeigu $R^2 \geq 0,25$, o jeigu $R^2 < 0,25$, tad labai abejotina, ar tiesinės regresijos modelis tinka (Čekanavičius, Murauskas 2000; Martinėnas 2004). Priklausomybės tarp tiriamųjų veiksnių ryšio stiprumas buvo vertinamas pagal koreliacijos koeficiento (R) skaitinius dydžius ir apskaičiuojamas pagal metodiką (Liukaitis, Kleveckas 2006). 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 (LST ISO 5725-1+AC:2002 2002; Kasiulevicius, Denapienė 2008).

2.2.7. Priešgaisrinių išsipučiančių dangų cheminės sudėties Furjė infraraudonųjų spindulių spektroskopinė analizė

Priešgaisrinių išsipučiančių dangų cheminė sudėtis buvo tirama Furjė transformacijos molekulinės absorbcinės mikrospektroskopijos infraraudonojoje spektro srityje (FT-IR mikrospektroskopijos) metodu. Pasirinktas PERKIN ELMER firmos FT-IR spektrometras „Spectrum One“ naudojant FT-IR mikroskopą „AutoIMAGE“, pateikta 2.11 paveiksle.

2.11 pav. FT-IR spektrometro PERKIN ELMER „Spectrum One“ ir FT-IR mikroskopo „AutoIMAGE“ bendras vaizdas

Fig. 2.11. FT-IR spectrometer Perkin Elmer “Spectrum One” and FT-IR Microscope “AutoIMAGE” the overall view

Priešgaisrinių išsipučiančių dangų FT-IR mikrospektroskopija – priešgaisrinių išsipučiančių dangų cheminės sudėties tyrimo metodas, pagrįstas infraraudonosios spinduliuotės absorbcijos spektrų tyrimu. Tyrimo sąlygos: pereinantis IR spindulių srautas, $4000\text{--}600\text{ cm}^{-1}$ sritis, skenavimų skaičius – ne mažiau kaip 50, skiriamoji galia – 4 cm^{-1} , skystu azotu šaldomas vidutinio diapazono detektorius „MCT MB“, dangos pavyzdys supresuojamas ir tiriamas mikrodeimantinėje kiuvetėje.

Užregistruoti priešgaisrinių išsipučiančių dangų absorbcijos spektrai analizuojami ir palyginami įvertinant užregistruotų spektrų charakteristikas (spektrų formą, absorbcijos juostų padėtis, formą, santykinį intensyvumo pasiskirstymą) ir pagal absorbcijos juostas atitinkančias molekulių funkcines grupes nustatant dažų komponentų cheminę sudėtį – rišiklį, užpildus, pigmentus ir kt. Pagal šiuos požymius priešgaisrinės išsipučiančios dažų dangos buvo identifikuojamos ir lyginamos.

2.3. Antrojo skyriaus išvados

1. Priešgaisrinių išsipučiančių dangų atsparumo ugniai, degumo tyrimams panaudoti standartiniai bandymų metodai pagal galiojančius Lietuvos perimtus Europos standartų reikalavimus. Tyrimai atlikti panaudojus vertikalią atsparumo ugniai bandymų krosnį, vieno degančio objekto ir vienpusio bei tūrinio kaitinimo bandymų įrangas.
2. Senėjimo ir irimo procesų tyrimams pasirinktos skirtingo rišiklio dervos pagrindo priešgaisrinės išsipučiančios dangos, bei kelių tipo papildomos apsauginės dažų dangos.
3. Siekiant nustatyti atmosferos veiksnių poveikį priešgaisrinių išsipučiančių dangų senėjimui, bandiniai buvo laikomi kondicionavimo patalpoje (kur palaikoma vienoda temperatūra ir drėgmė), nešildomoje patalpoje, lauke po stogu, taip pat sukurta dirbtinio sendinimo metodika.
4. Priešgaisrinių išsipučiančių dangų terminių savybių pokyčiams po dirbtinių sendinimo ciklų ir natūralaus sendinimo nustatyti pasirinkti derivatografi, o cheminės sudėties tyrimams FT-IR mikrospektroskopija.

Įvairių priešgaisrinių dangų atsparumą ugniai įtakojančios metodiniai veiksniai

Kadangi iš literatūros apžvalgos žinoma, kad priešgaisrinės išsipučiančios dažų dangos naudojamos įvairiuose konstrukciniuose sprendimuose (kolonos, santvaros, rygeliai, sijos), todėl svarbu nustatyti, kokią įtaką medžiagos savybėms gali daryti bandinio pozicionavimas bandymų stende ir pasirinkta bandymo metodika.

Skyriaus tematika paskelbti trys autoriaus straipsniai (Grigonis, Lipinskas, Mačiulaitis, Jocius 2010; Grigonis, Mačiulaitis, Lipinskas 2011; Podolski, Grigonis 2011).

3.1. Įvairių priešgaisrinių dangų atsparumo ugniai tyrimai skirtingais bandymų metodais

Priešgaisrinių išsipučiančių dangų, padengtų ant plieninių plokštelių, savybėms nustatyti tyrėjas Harden (Harden, Velin 2006) naudojo Bunzeno degiklį, kurio temperatūros kilimo kreivės negalime reguliuoti ir modeliuoti, negalime nustatyti standartinės gaisro temperatūros priklausomybės nuo laiko. Todėl

pasirinktos skirtingai ir įvairiomis dangomis padengtos plokštelės, kai bandymų įranga leidžia valdyti temperatūros kilimą priklausomai nuo laiko.

Atlikus pastarųjų ketverių metų Priešgaisrinės apsaugos ir gelbėjimo departamento prie Vidaus reikalų ministerijos Gaisrinių tyrimų centre esančių matavimo protokolų analizę (viso 284 matavimų protokolai), kai konstrukcijų apsaugai nuo gaisro buvo panaudotos priešgaisrinės išsipučiančios dažų dangos, nustatėme tirtus konstrukcinių elementų tipus ir vyraujančius konstrukcijų masyvumo koeficientus (3.1 ir 3.2 paveikslai).

3.1 pav. Priešgaisriniais išsipučiančiais dažais dažniausiai dengiami statinio plieninių konstrukcijų elementai

Fig. 3.1. Mostly covered with fire protection intumescent paints building steel construction elements

3.2 pav. Dažniausiai naudojamų konstrukcinių elementų masyvumo koeficientai

Fig. 3.2. The most commonly used structural elements in cross-section ratios

Sijos ir santvaros gaisro metu yra veikiamos ugnies iš visų pusių, kolonos iš keturių, o kai liečiasi su siena – iš trijų. Tačiau, kai kolonos yra sienoje – tik iš vienos pusės.

Priešgaisrinių dangų termoizoliacinės savybės pasirinkta taip pat įvertinti keturiais skirtingais kaitinimo režimais:

- tūrinis, kaitinant plokšteles krosnyje pagal standarto LST EN 1363-1:1999 reikalavimus;
- vienpusis, kaitinant plokšteles krosnyje pagal standarto LST EN 1363-1:1999 reikalavimus;
- tūrinis, kaitinant plokšteles pagal GTC/GBM 2 reikalavimus;
- vienpusis, kaitinant plokšteles pagal GTC/GBM 2 reikalavimus.

Kaitinant plienines plokšteles padengtas gipso kartono plokštėmis, tūriniu būdu (pirmas režimas), temperatūra pradėjo kilti nuo pat bandymo pradžios (3.3 pav.), o 5 minutę pasiekė 95 °C temperatūrą. Tuo metu krosnies temperatūra jau buvo 576 °C. Apytiksliai 95–125 °C temperatūrų intervale gipse vyksta cheminė dehidratacijos reakcija (John, Bowman 2002). Dėl šios priežasties temperatūra bandinyje kurį laiką nesikeičia. Garuodamas vanduo 10 min. sustabdo temperatūros kilimą. Temperatūros kilimas, apytiksliai 30,5 °C/min, pastebimas nuo bandymo pradžios praėjus 15 minučių. Tai reiškia, kad didžioji dalis vandens išgaravo. Kritinė užduota temperatūra, 500 °C, esant kuriai smarkiai mažėja plieno takumo ir stiprumo ribos, buvo pasiekta 28 minutę nuo bandymo pradžios. Taigi, tūrinio bandymo atveju, kaip ir tikėtasi, bandinys yra kaitinamas intensyviausiai ir jo atsparumas ugniai tampa minimalus.

Bandinių, kaitintų vienpusiu būdu (3.3 pav.), atsparumo ugniai krosnyje pagal standarto LST EN 1363-1:1999 reikalavimus, temperatūra 10 minutę pasiekė 94 °C. Priešgaisriniame gipse vykusi cheminė dehidratacijos reakcija 7,5 minutėms sustabdė temperatūros kilimą. Intensyviausias temperatūros kilimas, apytiksliai 20 °C/min, pastebimas nuo bandymo pradžios praėjus 15 minučių. Po 25 minučių nuo bandymo pradžios temperatūros kilimo greitis sumažėja iki apytiksliai 5,3 °C/min ir taip tęsiasi, kol pasibaigia bandymas. Kritinė užduota temperatūra – 500 °C, buvo pasiekta 59 minutę nuo bandymo pradžios. Vienpusis šilumos intensyvėjimas pradiname bandymo etape vyksta panašiai, o vėliau žymiai sulėtėja. Rezultatas – atsparumo ugniai laikas padidėja 2,1 karto. Reikia pažymėti, jog tam įtakos, be šilumos pritekėjimo būdo, turi konstrukcijos forma, jos matmenys, apsauginės medžiagos charakteristikos bei intensyvumas konvekcijos bandymų įrangoje, nežiūrint to, kad laikomasi standartinio gaisro kreivės.

Visiškai kitaip temperatūra kinta krosnyje vienpusiai kaitinant bandinį, apsiūtą priešgaisriniu gipsu pagal GTC/GBM 2 reikalavimus (3.3 pav.). Bandymo pradžioje, atinkamai pagal ketvirtą režimą, temperatūra pirmas 25 minutes kyla 3 °C/min greičiu. Bandinio paviršiui įkaitus iki 95 °C, prasideda chemiškai

sujungto vandens dehidratacija ir garavimas, kam reikalinga šiluma (John, Bowman 2002), o tai pusvalandžiui sustabdo temperatūros kilimą. Nuo bandymo pradžios praėjus 55 minutėms pastebima, kad temperatūra pradeda kilti apytiksliai $8,2\text{ }^{\circ}\text{C/min}$ greičiu. Toks intensyvumas tęsiasi iki 95 minutės. Vėliau temperatūros kilimo greitis sumažėja, kol 115 minutę pasiekiami $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūrą. Šiuo metodu atsparumo ugniai bandymas truko 56 minutėmis ilgiau negu krosnyje vienpusiai kaitinant pagal LST EN 1363-1:1999 reikalavimus. Nežiūrint to, kad ir šiuo atveju buvo laikomasi standartinio gaisro kreivės, minėta krosnis yra elektrinė (kaitinama tenais) ir joje šilumos konvekcija minimali. Tuo galima paaiškinti tokį didžiulį gautų atsparumo ugniai bandymų rezultatų skirtumą.

3.3 pav. Skirtingų kaitinimo sąlygų įtaka bandinių, apsaugotų priešgaisriniais gipsu, atsparumui ugniai

Fig. 3.3. Fire resistance of the samples protected plaster fireboard at different heating conditions

Akmens vatos perkaitime bandant tūriniu būdu pagal LST EN 1363-1:1999, pastebimi keli temperatūrinės kreivės lūžio momentai (3.4 pav.), t. y., 7,5 min bei 22,5 min. Bandinių temperatūra nuo bandymo pradžios iki 7,5 min. pakilo iki $97\text{ }^{\circ}\text{C}$, kai, tikėtina, vyko akmens vatoje esančios drėgmės išsiskyrimas. Po to laiko kreivė kilo greičiau, apytiksliai $34\text{ }^{\circ}\text{C/min}$, kol pasiekė $600\text{ }^{\circ}\text{C}$, ir nuo 22,5 minutės temperatūra pradėjo kilti lėčiau (apie $16\text{ }^{\circ}\text{C/min}$). Prieš tai apie 20 minutę buvo pasiekta kritinė $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūra. Bandinių, kaitintų vienpusiu būdu, atsparumo ugniai krosnyje pagal LST EN 1363-1:1999 reikalavimus, temperatūra bandymo pradžioje pradėjo kilti panašiai kaip ir tūriniu atveju (3.4 pav.).

3.4 pav. Skirtingų kaitinimo sąlygų įtaka bandinių, apsaugotų akmens vata, atsparumui ugniai

Fig. 3.4. Fire resistance of the samples protected rock wool at different heating conditions

Nuo 1 minutės iki 7,5 minutės temperatūra pakilo $92\text{ }^{\circ}\text{C}$ ir pasiekė $112\text{ }^{\circ}\text{C}$, kilimo greitis buvo apie $12,3\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$. Po 7,5 minutės kilimo greitis išaugo iki $16,3\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$. Nuo 12 minutės kreivė kilo tolygiai $15,4\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ greičiu, kol buvo pasiekta $480\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūra. Vėliau greitis truputį sumažėjo, o kritinė $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūra buvo pasiekta 30 minutę. Vienpusiai kaitinant apsaugotus akmens vata bandinius krosnyje pagal GTC/GBM 2 reikalavimus (3.4 pav.), pirmas penkias minutes temperatūra išliko beveik be pakeitimų. Nuo 5 minutės iki bandymo pabaigos temperatūros ir laiko kreivė tolygiai kilo apie $10,2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ greičiu. Kritinė temperatūra buvo pasiekta 50 minutę, t. y. 20 minučių vėliau negu vienu būdu nustatant atsparumą ugniai pagal LST EN 1363-1:1999, kai krosnyje naudojamos dujos ir dominuoja konvekcija bei turbulenciniai srautai.

Plieninių plokštelių, apsaugotų priešgaisriniais dažais, tūrinio bandymo metu pagal LST EN 1363-1:1999 matyti (3.5 pav.), kad bandinių temperatūra pradėjo kilti iš karto uždegus krosnies degiklius. Jau antrą minutę bandinių temperatūra siekia vidutiniškai $200\text{ }^{\circ}\text{C}$, nes danga nespėja reaguoti (dar nėra susidariusio termoizoliacinio sluoksnio). Nesuputojusios dangos šilumos laidumo koeficientas didelis. Vėliau temperatūros kilimo kreivėje stebimas lūžis rodo, kad pradėjo pūstis dažai, sudarydami termoizoliacinį sluoksnį ir tuo pačiu sulėtindami temperatūros augimą. Po to temperatūra tolygiai kilo iki 10 min, kol pasiekė $325\text{ }^{\circ}\text{C}$. Toliau kreivės kilimo greitis išaugo iki $25,5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ir nesikeitė iki bandymo pabaigos. Kritinė temperatūra buvo pasiekta 15 minutę (3.5 pav.).

3.5 pav. Skirtingų kaitinimo sąlygų įtaka bandinių, apsaugotų priešgaisriniais dažais „Speedhide 47-2“, atsparumui ugniai

Fig. 3.5. Fire resistance of the samples protected intumescent fire protective coating “Speedhide 47-2” at different heating conditions

Atliekant plokštelių, apsaugotų priešgaisriniais dažais, atsparumo ugniai bandymus vienpusio kaitinimo režimu krosnyje pagal LST EN 1363-1:1999 reikalavimus, penktą minutę temperatūra siekė 206 °C, o temperatūros kilimo greitis iki 5 minutės buvo 37,2 °C/min. Po 5 minutės kreivėje pastebimas nuo laiko priklausomas temperatūros lūžis, kuris neleidžia bandinio temperatūrai staigiai kilti toliau. Temperatūros pokytis tarp 5 ir 30 minučių neviršijo 57 °C. Toliau temperatūros kreivė kilo tolygiai 13 °C/min greičiu iki 40 minutės. Po 40 minutės temperatūros kilimo greitis sumažėjo iki 87 °C/min ir išsilaikė iki kritinės 500 °C pažeidimo temperatūros, t. y., iki 51 minutės. Viršijus kritinę temperatūrą, bandinio neveikiamojo paviršiaus temperatūra toliau kilo apie 24 °C/min greičiu. Atliekant vienpusio kaitinimo bandymus su bandiniais, apsaugotais priešgaisriniais dažais krosnyje pagal GTC/GBM 2 reikalavimus, jau 5 minutę nuo bandymo pradžios plieninių plokštelių neveikiamojo paviršiaus temperatūra siekė 123 °C. Po to neveikiamojo paviršiaus temperatūra tolygiai, apie 5,5 °C/min, kilo iki 20 minutės. Toliau stebimas kreivės lūžis, kai praktiškai pusvalandžiui sustabdomas temperatūros kilimas, nes kilimo greitis sudarė vos 1 °C/min. Toks stabilumas išlieka iki 50 minutės, kai vėl galima fiksuoti temperatūros kilimo tendenciją, kuri išlieka iki pat bandymo pabaigos. Nuo 50 minutės temperatūra kyla apytiksliai 6 °C/min greičiu. Kritinė 500 °C temperatūra pasiekama 96 minutę nuo bandymo pradžios, t. y. bandymas truko

45 minutėm ilgiau negu nustatant atsparumą ugniai vienpusiu kaitinimu pagal standarto LST EN 1363-1:1999 reikalavimus.

Iš pateiktų 3.3, 3.4 ir 3.5 paveikslų matyti, kad vienodų konstrukcinių elementų atsparumą ugniai įtakoja skirtingos kaitinimo sąlygos ir bandinių padėtis bandymų krosnyje. Bandinių, apsaugotų akmens vata ir priešgaisrinio gipsu (3.3 pav. ir 3.4 pav.) atveju pastebima, kad tik pirmomis bandymų minutėmis nėra didelio skirtumo tarp tūrinio kaitinimo poveikio pagal LST EN 1363-1:1999 ir vienpusio kaitinimo poveikio atsparumo ugniai krosnyje pagal LST EN 1363-1:1999 reikalavimus. Atliekant bandymus su priešgaisrinėmis išsipučiančiomis dangomis (3.5 pav.), kurioms reikalinga pasiekti atitinkamą temperatūrą, kad susiformuotų termoizoliacinis sluoksnis, tūrinio kaitinimo kreivės labiausiai skiriasi nuo vienpusio bandymo kaitinimo rezultatų. Nors temperatūros kėlimas priklausomai nuo laiko (pagal standartinę kreivę) buvo vienodas visose naudotose bandymų metodikose, tačiau bandinių kritinė temperatūra pasiekta skirtingu laiku. Todėl lemiamą poveikį akivaizdžiai daro bandinių kaitinimo būdas ir konvekcijos intensyvumas, o kai deginamos dujos – netgi turbulencijos apraiškos. Atliekant bandymus pagal vienpusį metodą GTC/GBM 2, gautos didžiausios visų bandytų apsaugos medžiagų bandinių atsparumo ugniai vertės, nors bandinių temperatūrų kilimo tendencijos analogiškos, kaip ir bandant vienpusiu kaitinimo metodu pagal LST EN 1363-1:1999 standartą. Todėl nenaudojant didelių matmenų bandinių galima palyginus objektyviai įvertinti priešgaisrinių išsipučiančių dangų termoizoliacines savybes pagal vienpusį GTC/GBM 2 metodą ir gauti būdingąsias temperatūros reikšmes, kad atliktume jų palyginimą.

3.2. Plieninių plokštelių, padengtų skirtingomis išsipučiančiomis dangomis, atsparumas ugniai

Siekiant optimizuoti priešgaisrinių dangų storį vienpusio kaitinimo atveju, kai danga buvo padengta iš vienos pusės ir visų šonų, buvo atliekami tolesni tyrimai. Vienpusio kaitinimo režimu pagal GTC/GBM 2 metodiką buvo nustatytas skirtingu storiu priešgaisrine išsipučiančia dažų „АгниТерм М“ danga padengtų plieninių plokštelių atsparumas ugniai, gautos bendros empirinės lygtys (3.1) – (3.2) bei jų statistiniai parametrai (3.1 lentelė):

$$h_{dc} = 26,3 t_{fr} - 548,4, \quad (3.1)$$

$$h_{dc} = 100,7 \exp(0,033 t_{fr}), \quad (3.2)$$

čia: h_{dc} – sausos dangos storis, μm ; t_{fr} – kritinės 500 °C temperatūros pasiekimo laikas, min.

3.1 lentelė. Empirinių lygčių (3.1)–(3.2) statistiniai parametrai

Table 3.1. Statistical parameters of the empirical equations (3.1)–(3.2)

Empirinė lygtis	R	R ²	S _e , s
(3.1)	0,9689	0,9387	7,24
(3.2)	0,9724	–	–

Tyrimų rezultatai rodo eksponentės tipo funkcinę priklausomybę, kai grunto ir dangos storis kinta nuo 300 μm iki 2400 μm (3.6 pav.). O tai reiškia, kad maksimaliai galima pasiekti tik R 90 elemento atsparumo ugniai vertę.

3.6 pav. Priešgaisrinės išsipučiančios dažų dangos „АгниТерм М“ storio įtaka plieninės plokštelės atsparumui ugniai

Fig. 3.6. Intumescent fire protective coating “АгниТерм М” thickness influence to fire resistance of steel plate

Rezultatai, labiausiai atspindintys skirtumus tarp tūrinių ir vienusių pagal GTC/GBM 2 metodiką bandymų, pateikti 3.7 ir 3.8 paveiksluose. Iš 3.7 paveikslo, kai buvo bandoma priešgaisrinė danga „Steelguard FM585“, galime pastebėti, kad skirtumai tarp bandymų metodų pradeda ryškėti plieninėms plokštelėms pasiekus 100 °C temperatūrą. Tūriniu metodu kaitinamų bandinių temperatūra kyla greičiau, nei vienusiu metodu kaitinimų bandinių. Plokštelės bandomos tūriniu kaitinimo pagal GTC/GBM 2 metodiką būdu kritinę temperatūrą pasiekia 11–14 min greičiau, nei bandomos vienusiu metodu.

Tokias pačias tendencijas nustatėme atlikę bandymus su priešgaisrine išsipučiančia danga „Char 21“ (3.8 pav.). Šiuo atveju taip pat skiriasi kritinės temperatūros pasiekimo laikas priklausomai nuo kaitinimo būdo.

3.7 pav. Vidurkiniai duomenys temperatūros kitimo, plieninių plokštelių paviršiuje padengtų priešgaisrine išsipučiančia danga „Steelguard FM585“, bandant skirtingais metodais: bandiniai kaitinti vienpusiu ir tūriniu metodais pagal GTC/GBM 2 metodiką

Fig. 3.7. Average data of temperature change in the surface of the coated steel plates intumescent fire protective coating “Steelguard FM585”, testing different heating methods: specimens heated one-side and volumetric according GTC/GBM 2 method

3.8 pav. Vidurkiniai duomenys temperatūros kitimo, plieninių plokštelių paviršiuje padengtų priešgaisrine išsipučiančia danga „Char 21“, bandant skirtingais kaitinimo metodais: bandiniai kaitinti vienpusiu tūriniu ir metodais pagal GTC/GBM 2 metodiką

Fig. 3.8. Average data of temperature change in the surface of the coated steel plates covered intumescent fire protective coating “Char 21”, testing different heating methods, there: specimens heated one-side and volumetric according GTC/GBM 2 method

Lyginant vienpusio kaitinimo metodu gautus rezultatus, taikant tūrinį metodą jau bandymo pradžioje matomas ryškus temperatūros kilimo greičių skirtumas. Tūrinio kaitinimo metu pagal GTC/GBM 2 metodiką bandinio temperatūra pradeda sparčiau kilti, kol pilnai susiformuoja apsauginės putos sluoksnis, o galiausiai išlieka ryškus ≈ 12 min skirtumas (3.8 pav.).

Iš 3.9 paveikslo galima konstatuoti, kad iki 250°C vienpusio kaitinimo pagal GTC/GBM 2 metodiką atveju stebime beveik vienodas temperatūros kitimo tendencijas pradžioje iki 10 min, nepriklausomai nuo to, ar danga buvo iš vienos pusės ir visų šonų, ar visai padengta. Toliau situacija keičiasi intervale $300\text{--}500^{\circ}\text{C}$. Kai danga buvo kaitinama iš vienos pusės ir buvo padengta iš vienos pusės, rezultatai pagal temperatūros kitimą artėja prie tūrinio bandymų rezultatų pagal GTC/GBM 2 metodiką. O kai danga padengta iš abiejų pusių ir visų šonų bei kaitinama vienpusiu režimu, atsparumo ugniai laikas vienareikšmiškai pradeda augti. Tai vyksta dėl to, kad pradeda pūstis ir kaitros neveikiamoje pusėje esantis priešgaisrinės dangos sluoksnis.

3.9 pav. Temperatūros kitimas plieninių plokštelių paviršiuje, padengtų priešgaisrine išsipučiančia danga „Steelguard FM550“, bandant skirtingais kaitinimo metodais: bandiniai kaitinti vienpusiu metodu pagal GTC/GBM 2, danga iš vienos pusės; bandiniai kaitinti vienpusiu metodu pagal GTC/GBM 2, danga iš abiejų pusių; bandiniai kaitinti tūriniu metodu pagal GTC/GBM 2 danga iš abiejų pusių

Fig. 3.9. Average data of temperature change in the surface of the coated steel plates covered intumescent fire protective coating “Steelguard FM550”, testing different heating methods: specimens heated one side according GTC/GBM 2 method, coated on one side; specimens heated one side according GTC/GBM 2 method, both side coated; specimens heated volumetric according GTC/GBM 2 method both side coated

Gauti rezultatai parodė (3.9 pav.), kad atsparumo ugniai laikas žymiai padidėja, kai kaitinimas yra vienpusis ir kai plieninė plokštelė visa padengta priešgaisrine danga. Vadinasi, bandymo rezultatams įtakos turi ne tik skirtingi šilumos mainų arba kaitinimo principai, bet ir bandinių paviršių padengimo laipsnis.

Priešgaisrinės dangos „Steelguard FM585“, kai buvo kaitinama vienpusiu pagal GTC/GBM 2 metodiką kaitinimo režimu, reakcija į kaitrą matoma 3.10 a paveiksle. Akivaizdi priešgaisrinės išsipučiančios dažų dangos reakcija – susiformavęs termoizoliacinis putos sluoksnis. Iš 3.10 b paveikslo aiškiai matyti, kad danga sudaryta iš dviejų sluoksnių: viršutinis (baltasis sluoksnis) yra nekonsoliduotas ir labai trapus, o apatinis pilkasis – pakankamai konsoliduotas ir tvirtas. Tai galima paaiškinti tuo, kad viršutinis sluoksnis yra visiškai sudegęs (susioksidavęs) ir jame likę tik mineraliniai komponentai, o pilkasis sluoksnis yra nesudegęs, bet iš dalies suanglėjęs. Akivaizdu, jog pilkasis sluoksnis mažiau apsaugo nuo temperatūros pokyčių, o laikui bėgant išdega ir tampa baltos spalvos.

3.10 pav. Bandinio, padengto priešgaisrine išsipučiančia danga „Steelguard FM585“, vaizdas po vienpusio kaitinimo bandymo pagal GTC/GBM 2 metodiką: a) susidariusios dangos storis 40 mm; b) iš bandinio išpjauta dangos dvisluoksnė dalis

Fig. 3.10. Sample coated intumescent fire protective coating “Steelguard FM585” image of a one-sided heating by GTC/GBM 2 test methodology: a) foaming coating thickness of 40 mm b) two layers part cut from the sample surface

Atlikus bandymus su pasirinktomis keturiolika priešgaisrinių dangų (2.1 lentelė išskyrus dangas „Speedhide 47-2“ ir „АгниТерм М“) vienpusiu kaitinimu pagal GTC/GBM 2 metodiką, duomenų apdorojimui pasirinktas tiesinės priklausomybės modelis (Sakalauskas 2003; Čekanavičius, Murauskas 2004).

Lygties (3.3) koreliacijos koeficientas ($R = 0,917$), determinacijos koeficientas ($R^2 = 0,842$), o paklaida ($S_e = 4,99$ min). Gauta tokia regresijos tiesės lygtis:

$$t_{fr} = 1,26 h_f + 0,336, \quad (3.3)$$

čia: t_{fr} – kritinės temperatūros 500 °C pasiekimo laikas, min; h_f – susidariusios termoizoliacinės putos storis, mm.

3.11 pav. Priešgaisrinių išsipučiančių dangų, susiformavusių vienpusio kaitinimo būdu pagal GTC/GBM 2 metodiką, kritinės temperatūros priklausomybė nuo susidariusios putų dangos storio

Fig. 3.11. Critical temperature and the foam thickness values of intumescent fire protective coatings heated one-sided method according to the methodology GTC/GBM 2

Iš 3.11 paveikslo matome susidariusios putos sluoksnio įtaką kritinės plokštelės temperatūros 500 °C pasiekimo laikui, kai pradinis dangos storis buvo vienodas, o bandymo sąlygos identiškos. Susidariusios putos storis po kaitinimo kito nuo 17 mm iki 82 mm. Matome, kad priešgaisrinės išsipučiančios dangos storis tiesiogiai įtakoja konstrukcijos atsparumą ugniai, nes kuo puta plonesnė, tuo bandinys greičiau pasiekia kritinę temperatūrą, o susidariusios putos sluoksniui didėjant, ilgėja ir kritinės temperatūros pasiekimo laikas.

3.3. Trečiojo skyriaus išvados

1. Atliekant bandymus pagal vienpusio kaitinimo metodą GTC/GBM 2, gautos didžiausios visų bandytų apsaugos medžiagų bandinių atsparumo ugniai vertės. Bandinių, padengtų akmens vata „Rob 80t“ – 50 min; priešgaisrinis gipsu „GKFI“ – 115 min ir priešgaisrine išsipučiančia danga „Speedhide 47-2“ – 96 min. Bandinių temperatūrų kilimo tendencijos yra panašios, kaip ir bandant vienpusiu kaitinimo metodu pagal standartą LST EN 1363-1:1999. Taigi nenaudojant didelių matmenų bandinių galima palyginus objektyviai įvertinti priešgaisrinių išsipučiančių dangų termoizoliacines savybes pagal vienpusio kaitinimo metodą GTC/GBM 2 ir nustatyti būdingąsias temperatūros vertes ir kitimo tendencijas.
2. Vienpusis kaitinimas pagal metodą GTC/GBM 2 ir standartą LST EN 1363-1:1999 atspindi konstrukciją, veikiamą iš vienos pusės, o tūriniai metodai pagal tūrinio kaitinimo režimus atspindi konstrukcijos darbą, kai ji veikiamą gaisro iš visų pusių, t. y. realiai griežtesnėmis sąlygomis.
3. Priešgaisrines išsipučiančias dangas bandant vienpusiu kaitinimo metodu pagal GTC/GBM 2, kuris imituoja konstrukcinio elemento paviršių, apsaugotą iš šonų, t. y., veikiamą tik viena bandinio plokštuma, išgaunamas 11–14 min didesnis konstrukcijų atsparumas ugniai (jo vertės) lyginant su tūriniu bandymo metodu pagal GTC/GBM 2.
4. Bandant tūriniu kaitinimo metodu GTC/GBM 2 iš visų pusių apsaugotą priešgaisrine išsipučiančia dažų danga plieninę plokštelę nustatyta, kad bandinio paviršiuje temperatūra kyla greičiau, ir kritinės temperatūros pasiekimo laikas sutrumpėja net 15 min. Tai įtakoja didesnis bandinio paviršius, kuris veikiamas kaitinimo.
5. Priešgaisrinė išsipučianti dažų danga pradeda veikti, kai temperatūra bandymo krosnyje pasiekia 200 °C, nes lėtėja plieninės plokštelės paviršiaus temperatūros kilimas, dėl termoizoliacinio sluoksnio formavimosi, kuris stabdo bandinio temperatūros kilimą. Bandinio paviršiuje esant 250–300 °C temperatūrai, temperatūra krosnyje siekia (kaitinimo metu fiksuojamą) 678 °C.
6. Iš priešgaisrinės išsipučiančios dangos susidaręs termoizoliacinės putos sluoksnis susiskirstęs į dvi dalis: viršutinis sluoksnis yra visiškai oksidavęs ir jame likę tik mineraliniai komponentai, o apatinis sluoksnis yra iš dalies suanglėjęs, kas ir apsaugo bandinio paviršių nuo tolesnės temperatūros kilimo.
7. Nustatyta, kad norint užtikrinti didesnę plieninės konstrukcijos atsparumą ugniai, reikia padidinti priešgaisrinės išsipučiančios pirminės dangos storį, kurio priklausomybę nuo atsparumo ugniai geriausiai aprašo empirinė eksponentinė lygtis.

8. Įvairių rūšių priešgaisrinių išsipučiančių dažų dangų tyrimais nustatyta, kad didėjant išputintos dangos storiui tiesiškai didėja ir plieno konstrukcijos atsparumo ugniai laikas kaitinant dažų dangą vienpusiai pagal GTC/GBM 2 metodiką, nes kuo plonesnė puta susidaro, tuo bandinys greičiau pasiekia kritinę 500 °C temperatūrą.

Priešgaisrinių išsipučiančių ir kombinuotų dažų dangų senėjimo įvairiose sąlygose tyrimai

Priešgaisrinės išsipučiančios dažų dangos yra naudojamos įvairiose klimatinėse juostose, tačiau informacijos apie šių dangų ilgamžiškumą maža. Pasirinkti keli modeliuoti eksploataciniai sendinimo režimai ir natūrinis sendinimas, kad būtų įvertintas Lietuvos klimatinių sąlygų poveikis dažų dangų atsparumo ugniai rodiklių pokyčiams.

Skyriaus tematika paskelbtas vienas autoriaus straipsnis (Grigonis, Praniauskas, Mačiulaitis, Lipinskas, Jocius, Kuodis 2011).

4.1. Priešgaisrinėmis dažų dangomis padengtų plieninių plokštelių, sendintų pagal I ir II režimą, atsparumas ugniai kaitinant vienpusiai

Pradinis išdžiūvusios priešgaisrinės dangos, įskaičiuojant grunto sluoksnį, storis buvo 450 ± 50 μm . Po bandymų penkiuose taškuose buvo išmatuotas susidariusios putos storis. Visais atvejais po sendinimo ciklą matuojant dangos storį buvo pastebimas nedidelis priešgaisrinių dažų dangos aukščio padidėjimas, lyginant

su pradiniu 38–51 μm . Atlikus dažų sendinimo ciklus pagal I režimą pastebėjome, kad dangų paviršiuje atsirado pakitimai.

Didžiausi pakitimai pastebėti ant plokštelių, kai pagrindinė priešgaisrinė danga buvo „Char 21“, o papildoma ADD, paviršiuje (4.1 pav.). Šių plokštelių paviršiuje atsirado nelygumai bei matomi korozijos požymiai. Po dažų danga susidarė oro tuštumos. Po 60 sendinimo ciklų pagal I režimą dvisluksnė priešgaisrinė danga vietomis atsilupo nuo grunto (4.1 pav.).

4.1 pav. Plokštelių padengtų priešgaisrine danga „Char 21“ ir ADD vaizdas po sendinimo: a – po 15 sendinimo ciklų pagal I režimą; b – po 45 sendinimo ciklų pagal I režimą; c – po 60 sendinimo ciklų pagal I režimą

Fig. 4.1. Plates coated with fire intumescent fire protective coating “Char 21” and top coat ADD image of aging: a – after 15 aging cycles of treatment according to I mode; b – after 45 aging cycles of treatment according to I mode; c – after 60 aging cycles of treatment according to I mode

Bandinių paviršius dirbtinio sendinimo ciklų procese pagal II režimą taip pat pakinta, kai paviršiai apsaugoti priešgaisrine išsipučiančia dažų danga „Steelguard FM585“. Pakitimai dangų paviršiuje atsiranda ir vystosi didėjant ciklų skaičiui (susidaro ir plėtojasi maži įtrūkimai bei pūslelės). Paveiksle 4.2 pateikti minėtos dangos bandinių sendinant pagal II režimą paviršiai.

Bandinius kaitinant vienpusiu kaitinimo metodu pagal standarto LST EN 1363-1:1999 reikalavimus, kai plieninė plokštelė neapsaugota priešgaisriniais išsipučiančiais dažais, kritinė temperatūra (500 $^{\circ}\text{C}$) pasiekama 9 min (4.3 pav.). Kai yra bandomos plokštelės padengtos priešgaisrinėmis dažų dangomis „АгниТерм М“ su ADD, „Char 21“ su ADD, „Steelguard FM585“ su ADD ir „Steelguard FM550“ situacija iš esmės pakinta (4.3 pav.). Krosnies viduje pradėjus kilti temperatūrai pirmieji dažų veikimo požymiai (pūtimasis) pastebimi, kai bandinio temperatūra pasiekia 200 $^{\circ}\text{C}$. Amonio polifosfato skilimo temperatūra yra 250 $^{\circ}\text{C}$ (Duquesne *et al.* 2002; Almeras *et al.* 2002).

4.2 pav. Plokštelių padengtų priešgaisrine danga „Steelguard FM585“ vaizdas po dirbtinio senėjimo ciklų: a – po 15 senėjimo ciklų pagal II režimą; b – po 30 senėjimo ciklų pagal II režimą; c – po 60 senėjimo ciklų pagal II režimą

Fig. 4.2. View of plates coated with intumescent fire protective coatings “Steelguard FM585” after artificial aging cycles: a – after 15 aging cycles of treatment according to II mode; b – after 30 aging cycles of treatment according to II mode; c – after 60 aging cycles of treatment according to II mode

4.3 pav. Plieninės plokštelės be dangos (kontrolinės) ir plokštelių, padengtų priešgaisrinėmis dažų dangomis „АгниТерм М“ ADD, „Char 21“ su ADD, „Steelguard FM585“ su ADD ir „Steelguard FM550“, atsparumo ugniai bandymai naudojant vienusį kaitinimą krosnyje pagal LST EN 1363-1:1999 standarto reikalavimus

Fig. 4.3. Steel sheets and plates in the control plates coated with fire paint coatings “АгниТерм М” with top coat ADD, “Char 21” with top coat ADD, “Steelguard FM585” with top coat ADD and “Steelguard FM550” fire resistance tests using a one-sided heating furnace according to LST EN 1363–1:1999 requirements

Temperatūros kilimo sulėtėjimas bandinių paviršiuje stebimas iki 300 °C, kuomet skyla melaminas ir išsiskiria H₂O ir N₂ dujos (Andersson *et al.* 2007). Taip susidaro puiki termoizoliacinės medžiagos puta (Duquesne *et al.* 2002; Almeras *et al.* 2002). Iš 4.3 paveikslo matome, kad bandinių paviršiams pasiekus 270 °C temperatūrą, vėliau ji didėja pastoviu greičiu. Plieninių plokštelių, apsaugotų priešgaisrinių išsipučiančios dažų dangomis, kritinės temperatūros pasiekimo laikai išsidėsto taip: po 48 min perskaista „АгниТерм М“, po 51 min „Char 21“, po 52 min „Steelguard FM550“, o danga „Steelguard FM585“ – po 55 min. Visos dangos užtikrina gerą pirminę apsaugą nuo ugnies poveikio ir apie 5,7 karto prailgina kritinės temperatūros pasiekimo laiką, palyginus su neapsaugota plienine plokšte, kuri 500 °C temperatūrą pasiekia per 9 min (4.3 pav.).

Paveiksle 4.4 pateikti bandinių su skirtingomis priešgaisrinėmis dangomis sendintų 15 ciklų pagal I režimą atsparumo ugniai bandymų rezultatai.

4.4 pav. Plieninių plokštelių padengtų priešgaisrinėmis dažų dangomis „АгниТерм М“ su ADD, „Char 21“ su ADD, „Steelguard FM585“ su ADD ir „Steelguard FM550“ atsparumo ugniai bandymai po 15 ciklų sendinimo pagal I režimą, naudojant vienpusį kaitinimą krosnyje pagal LST EN 1363-1:1999 standarto reikalavimus.

Fig. 4.4. Steel plates without coating and control plates coated with intumescent fire protective coatings “АгниТерм М” with top coat ADD, “Char 21” with top coat ADD, “Steelguard FM585” with top coat ADD and “Steelguard FM550” fire resistance using one-sided heating furnace according to LST EN 1363-1:1999 after 15 cycles of treatment according I aging mode

Bandymo pradžioje stebimas pakankamai greitas temperatūros kilimas. Bandinių apsaugotą dangą „Steelguard FM550“ kilimo temperatūra yra, kur kas lėtesnė nei kitų bandinių. Tai pradeda ryškėti jau nuo 6 min. Tokių temperatūros kilimo sulėtėjimą galima paaiškinti dangos paviršiuje susidarančio kitokių sluoksnio formavimusi ir putos oksidavimusi, kuris pristabdo temperatūros kilimą. Tuo tarpu bandinių papildomai padengtų ADD, (4.4 pav.) temperatūra kyla tolygiai, tačiau intervale 430–460 °C vyksta temperatūros augimo sulėtėjimas. Tai rodo dėl dangos destrukcijos susidarančius pokyčius putos formavimesi ir termoizoliacinių savybių pakitime.

Atlikus 30 dirbtinių sendinimo ciklų pagal I režimą, visų dangų temperatūrų kilimo kinetika supanašėja (4.5 pav.), o kritinė 500 °C temperatūra pasiekama jau per 30–42 min. Geriausius rezultatus 42 min parodė priešgaistrinė išsipučianti dažų danga „Steelguard FM585“ su ADD, o blogiausius 30 min priešgaistrinė išsipučianti danga „АгниТерм М“ su ADD. Tai patvirtina gilėjantį destrukcijos procesą didėjant ciklų skaičiui.

4.5 pav. Plieninių plokštelių padengtų priešgaistrinėmis dažų dangomis „АгниТерм М“ su ADD, „Char 21“ su ADD, „Steelguard FM585“ su ADD ir „Steelguard FM550“ atsparumo ugniai bandymai po 30 ciklų sendinimo pagal I režimą, naudojant vienpusį kaitinimą krosnyje pagal LST EN 1363-1:1999 standarto reikalavimus.

Fig. 4.5. Steel plates without coating and control plates coated with intumescent fire protective coatings “АгниТерм М” with top coat ADD, “Char 21” with top coat ADD, “Steelguard FM585” with top coat ADD and “Steelguard FM550” fire resistance using one-sided heating furnace according to LST EN 1363-1:1999 after 30 cycles of treatment according I aging mode

Po 45 sendinimo ciklų pagal I režimą bandinių dangų atsparumas ugniai sutrumpėjo keletą minučių lyginant su 30 sendinimo ciklų pagal I režimą: priešgaisrinės išsipučiančios dažų dangos „Steelguard FM585“ su ADD iki 37 min (4.6 pav.). Dėl to galime teigti, kad ir šioje dangoje įvyko žymių pakitimų, kurie ženkliai sumažino jos atsparumą ugniai ir priartėjus prie kitų dangų kritinės temperatūros pasiekimo laiko. Konkrečiai: dažų „АгниТерм М“ su ADD iki 29 min, „Char 21“ su ADD – 30 min, „Steelguard FM550“ – 34 min. Ryškus temperatūros kilimo lėtėjimas pasiekus 370 °C pastebimas dangoje „Steelguard FM550“. Kitose dangose jis nėra toks ryškus. Manome, kad tai vyksta dėl antipireninių medžiagų, kurios vis dar dominuoja apsauginės termoizoliacinės putos formavimesi (4.6 pav.).

4.6 pav. Plieninių plokštelių padengtų priešgaisrinėmis dažų dangomis „АгниТерм М“ su ADD, „Char 21“ su ADD, „Steelguard FM585“ su ADD ir „Steelguard FM550“ atsparumo ugniai bandymai po 45 ciklų sendinimo pagal I režimą, naudojant vienpusį kaitinimą krosnyje pagal LST EN 1363-1:1999 standarto reikalavimus.

Fig. 4.6. Steel plates without coating and control plates coated with intumescent fire protective coatings “АгниТерм М” with top coat ADD, “Char 21” with top coat ADD, “Steelguard FM585” with top coat ADD and “Steelguard FM550” fire resistance using one-sided heating furnace according to LST EN 1363-1:1999 after 45 cycles of treatment according I aging mode

Atlikus didžiausią kiekį dirbtinių sendinimo ciklų (60) pagal I režimą, stebimi ypač ryškūs temperatūros kilimo kinetikos skirtumai tarp dangų. Bandinių, apsaugotų priešgaisrinėmis išsipučiančiomis dangos „Steelguard FM585“ su ADD ir priešgaisrine išsipučiančia danga „Steelguard FM550“, 250–270 °C temperatūrų intervale stebimas temperatūros kilimo sulėtėjimas, kurį galima

paiškinti apsauginės dangos paviršiuje susidarančio sluoksnio formavimusi ir putos oksidavimusi. Tai ir pristabdo temperatūros kilimą (4.7 pav.).

Kai pirmą dangą yra „АгниТерм М“ su ADD ir „Char 21“ su ADD, temperatūros kilimo sulėtėjimas nestebimas. Be to, „АгниТерм М“ su ADD, ir „Char 21“ su ADD, jau 4 min pasiekiami 300 °C temperatūra, o 400 °C pasiekiami per 10 min (4.7 pav.). Tuo tarpu bandinių apsaugotų priešgaisrinėmis išsipučiančiomis dangomis „Steelguard FM585“ su ADD ir priešgaisrine išsipučiančia danga „Steelguard FM550“, 300 °C temperatūra pasiekiami 8 min., o 400 °C pasiekiami 18 min (4.7 pav.). Toks didelis atsparumo ugniai rodiklių verčių skirtumas palyginus su pradinėmis vertėmis (4.4 pav.), yra sąlygotas dangų destrukcijos procesų ir sudėties pokyčių.

4.7 pav. Plieninių plokštelių padengtų priešgaisrinėmis dažų dangomis „АгниТерм М“ su ADD, „Char 21“ su ADD, „Steelguard FM585“ su ADD ir „Steelguard FM550“ atsparumo ugniai bandymai po 60 ciklų sendinimo pagal I režimą, naudojant vienus kaitinimą krosnyje pagal LST EN 1363-1:1999 standarto reikalavimus.

Fig. 4.7. Steel plates without coating and control plates coated with intumescent fire protective coatings “АгниТерм М” with top coat ADD, “Char 21” with top coat ADD, “Steelguard FM585” with top coat ADD and “Steelguard FM550” fire resistance using one-sided heating furnace according to LST EN 1363-1:1999 after 60 cycles of treatment according I aging mode

Trumpiausias priešgaisrinių išsipučiančių dažų dangų atsparumo ugniai laikas fiksuojamas, kai atliekama 60 sendinimo ciklų pagal II režimą (4.8 pav.). Dangomis apsaugotų plieninių plokštelių temperatūros kilimas iki kritinės 500 °C temperatūros pakankamai intensyvus ir vidutiniškai siekia 0,27 °C /s.

Išsiskiria tik priešgaisrine išsipučiančia danga „Steelguard FM550“ apsaugotų bandinių temperatūros kilimo greitis, kuris siekia $0,11\text{ }^{\circ}\text{C/s}$. Šios dangos perkaitimo kinetinėje kreivėje temperatūrų $250\text{--}280\text{ }^{\circ}\text{C}$ intervale matomas temperatūros kilimo sulėtėjimas. Tuo metu formuojasi termoizoliacinė puta, sulėtindama bandinio perkaitimą. Priešgaisrinės išsipučiančios dangos „Steelguard FM585“ su ADD temperatūros kreivėje prie $390\text{ }^{\circ}\text{C}$ taip pat stebimas temperatūros kilimo sulėtėjimas, kuris tęsiasi 3 min (4.8 pav.).

4.8 pav. Plieninių plokštelių padengtų priešgaisrinėmis dažų dangomis „АgniТерм М“ su ADD, „Char 21“ su ADD, „Steelguard FM585“ su ADD ir „Steelguard FM550“ atsparumo ugniai bandymai po 60 ciklų sendinimo pagal II režimą, naudojant vienpusį kaitinimą krosnyje pagal LST EN 1363-1:1999 standarto reikalavimus.

Fig. 4.8. Steel plates without coating and control plates coated with intumescent fire protective coatings “АgniТерм М” with top coat ADD, “Char 21” with top coat ADD, “Steelguard FM585” with top coat ADD and “Steelguard FM550” fire resistance using one-sided heating furnace according to LST EN 1363-1:1999 after 60 cycles of treatment according II aging mode

Apibendrinus visų sendintų bandinių atsparumo ugniai bandymų rezultatus matome, kad 60 ciklų sendintų pagal II režimą bandinių kritinės temperatūros pasiekimo laikas, palyginus su kontrolinių bandinių, sumažėjo maždaug per pusę (4.9 pav.). Tai yra ganėtinai daug atsižvelgus į tokį mažą sendinimo ciklų skaičių. Modeliuoti bandinių sendinimo ciklai pagal I režimą daro žymią įtaką dangos apsauginėms termoizoliacinėms savybėms. Dažų („АgniТерм М“, „Char 21“), kurių sudedamosios dalys yra disperguotos vandenyje senėjimo procesas vyksta sparčiausiai, o priešgaisrinės išsipučiančios dažų dangos

„Steelguard FM585“ su ADD lėčiausiai. Taip savybės kinta mažiausiai, net ir sendinant dangą „Steelguard FM585“ su ADD pagal II režimą išsaugoma 60 % pradinio atsparumo ugniai laiko minutėmis. Tuo tarpu kai dangų: „АгниТерм М“ su ADD – 42 %, „Char 21“ su ADD – 46 %, ir „Steelguard FM585“ su ADD – 52 %. Toks skirtumas tarp vandenyje disperguotų dangų sudėčių gali būti įtakotas rišiklio tvirtumo.

4.9 pav. Plieninių plokštelių padengtų priešgaisrinėmis dažų dangomis „АгниТерм М“ su ADD, „Char 21“ su ADD, „Steelguard FM585“ su ADD ir „Steelguard FM550“ atsparumo ugniai bandymų rezultatai po skirtingo skaičiaus sendinimo ciklų pagal I režimą ir po 60 sendinimo ciklų pagal II režimą, naudojant vienpusį kaitinimą krosnyje pagal LST EN 1363-1:1999 standarto reikalavimus.

Fig. 4.9. Steel plates without coating and control plates coated with intumescent fire protective coatings “АгниТерм М” with top coat ADD, “Char 21” with top coat ADD, “Steelguard FM585” with top coat ADD and “Steelguard FM550” fire resistance test results using one-sided heating furnace according to LST EN 1363-1:1999 after different cycles of treatment according I aging mode and after 60 cycles of treatment according II aging mode

Apskaičiuota, kad sendinant priešgaisrines išsipučiančias dangas pagal II režimą lyginant su sendinimu pagal I režimą dangų atsparumas ugniai vidutiniškai sumažėja 11 %, o priešgaisrinių dangų „АгниТерм М“ su ADD – 21 %; „Char 21“ su ADD – 12 %; „Steelguard FM585“ su ADD – 5 %; „Steelguard FM550“ – 6%. Todėl galime teigti, kad dirbtinis sendinimas pagal II režimą yra 5–21 % agresyvesnis už I režimą. Atlikus regresinę analizę nustatyta, kad yra stipri tiesinė priklausomybė tarp kontrolinių bandinių ir sendintų pagal I režimą 60 ciklų atsparumo ugniai rodiklių verčių (determinacijos koeficientas $R^2 = 0,915$, koreliacijos koeficientas $R = 0,956$). Tarp sendintų dangų pagal I režimą ir sendintų pagal II režimą po 60 ciklų atsparumo ugniai rodiklių verčių ryšys yra dar stipresnis (determinacijos koeficientas $R^2 = 0,998$, koreliacijos

koeficientas $R = 0,999$). Lygtis 4.1 tinka patikimai prognozuoti priešgaisrinių išsipučiančių dangų atsparumą ugniai dirbtinai sendinant pagal I režimą, kai pradinis dangos atsparumas ugniai yra nuo 47 min iki 56 min. Galima daryti išvadą, kad pasirinktas modelis teisingas ir yra didelė parametų tarpusavio priklausomybė (Rudskienė, Kulvietienė 1995) gautos tokios lygtys:

$$t_{fr} = 1,94 t_{am1} - 70,1, \quad (4.1)$$

$$t_{am1} = 6,46 t_{am2} + 0,86, \quad (4.2)$$

čia: t_{fr} – kritinės 500 °C temperatūros pasiekimo laikas, min; t_{am1} – atsparumas ugniai po 60 ciklų pagal I režimą, min; t_{am2} – atsparumas ugniai po 60 ciklų pagal II režimą, min.

4.10 pav. Bandinių atsparumo ugniai laiko po sendinimo pagal I režimą, priklausomybė nuo dirbtinio sendinimo pagal II režimą

Fig. 4.10. Sample fire resistance after aging by the mode I the dependence on artificial aging mode II

Iš 4.10 paveikslo ir lygties 4.2 matome, kad ir apskritai II režimas yra agresyvesnis, nes tų pačių dangų kritinės temperatūros yra pasiekiamos greičiau. Be to, pagal II režimą gautas atsparumas ugniai gali būti perskaičiuojamas, norint gauti sendinimo rezultatų skaitines vertes pagal I režimą ir kurį techniškai realizuoti paprasčiau. Paveiksle pateikta susidariusios termoizoliacinės putos mažėjimo tendencija (4.11 pav.).

4.11 pav. Susidariusios priešgaistrinių išsipučiančių dažų dangų termoizoliacinės putos storio priklausomybė nuo dirbtinių senėjimo ciklų pagal I režimą skaičiaus po atsparumo ugniai bandymų

Fig. 4.11. Intumescent fire protective coating sweled insulation foam thickness dependence on artificial aging cycles according to the mode number after the fire test

Po priešgaistrinių išsipučiančių dažų dangų „АгниТерм М“ su ADD, „Char 21“ su ADD, „Steelguard FM585“ su ADD ir „Steelguard FM550“ atsparumo ugniai bandymų, naudojant vienpusį kaitinimą krosnyje pagal LST EN 1363-1:1999, išmatavus susidariusios kontrolinių ir sendintų pagal I režimą bandinių termoizoliacinės putos storius ir apdorojus rezultatus, sudaryta lygtis (4.3) (determinacijos koeficientas $R^2 = 0,675$, koreliacijos koeficientas $R = 0,821$):

$$h_f = 63,1 - 0,49 n_{aml}, \quad (4.3)$$

čia: h_f – susidariusios termoizoliacinės putos storis, mm; n_{aml} – dirbtinių sendinimo ciklų pagal I režimą skaičius. Ši lygtis tinka prognozuoti susidarančios termoizoliacinės putos storį priklausomai nuo dirbtinio sendinimo pagal I režimą ciklų skaičiaus, kai kontrolinių bandinių susidaręs termoizoliacinis putos storis kinta nuo 50 mm iki 80 mm.

Aukštos temperatūros paveiktas antikorozinis gruntas AG praranda sukibimą su plieninės plokštelės paviršiumi (4.12 pav. a). Antikorozinis gruntas EDG atsparesnis aukštai temperatūrai ir nepraranda sukibimo su plokštelės paviršiumi (4.12 pav. b).

4.12 pav. Bandinių paviršiaus apsaugotų antikorozinė danga, priešingos bandomajai pusės vaizdas 30-tą bandymo minutę: a – gruntas AG; b – gruntas EDG

Fig. 4.12. Sample surface protected anti-corrosion coating, the opposite side of the test image on the 30 minute test: a – primer AG; b – primer EDG

Didėjant dirbtinių sendinimo ciklų skaičiui kritinės temperatūros pasiekimo laikas mažėja ganėtinai tolygiai visais bandinių atvejais. Taip pat mažėja susidariusios termoizoliacinės putos storis, kuris, kaip parodė atlikti tyrimai, taip pat įtakoja kritinės temperatūros pasiekimo laiką. Todėl įvertinti atsparumo ugniai laiką krosnyje kaitinant vienpusiai pagal standartą LST EN 1363-1:1999 pasirinkta, apdorojant duomenis, priklausomybė nuo dirbtinių sendinimo ciklų skaičiaus ir susidarančios putos storio.

Atlikus regresinę analizę visoms tirtoms dangoms, gauta bendra empirinė lygtis (4.4), kurios koreliacijos koeficientas $R = 0,829$:

$$t_{fr} = 3,36 n_{aml} + 9,10 h_f - 0,013 n_{aml}^2 - 0,058 n_{aml} h_f - 0,075 h_f^2 - 223, \quad (4.4)$$

čia: t_{fr} – kritinės 500 °C temperatūros pasiekimo laikas, min; h_f – susidariusios termoizoliacinės putos storis, mm; n_{aml} – dirbtinių sendinimo ciklų skaičius pagal I režimą.

Visų bandymų metu gauti rezultatai, t.y. kritinės temperatūros pasiekimo laikas, susidariusios termoizoliacinės putos storis, pateikti 4.13 paveiksle. Didėjant dirbtinio sendinimo ciklų skaičiui, mažėja susidariusios termoizoliacinės putos storis ir trumpėja atsparumo ugniai laikas.

4.13 pav. Dangos kritinės temperatūros pasiekimo laikas, priklausomai nuo sendinimo ciklų skaičiaus pagal I režimą ir susidariusios dangos storio

Fig. 4.13. Critical temperature achieving time, depending on the number of aging cycles of treatment according I mode and swelled foam thickness

Gauta bendroji regresijos lygtis gali būti taikoma prognozuoti priešgaisrinių dangų kritinės temperatūros pasiekimo laiko bendroms tendencijoms.

4.2. Natūraliai ir dirbtinai pagal I režimą sendintų plieninių dvitėjų, padengtų priešgaisrinėmis dangomis, atsparumas ugniai kaitinant tūriškai

Galutinai išdžiuvus bandiniams, IPE 120 profiliams, padengtiems priešgaisrinėmis išsipučiančiomis dangomis, buvo išmatuotas bandinių sausos dangos storis, pritvirtintos termoporos ir atlikti tūriniai atsparumo ugniai bandymai kaitinant plokšteles krosnyje pagal standarto LST EN 1363-1:1999

reikalavimus. Antrajai bandinių serijai atlikta 60 dirbtinių sendinimo ciklų pagal I režimą ir tada nustatytas jų atsparumas ugniai, o trečioji bandinių serija sendinama natūraliai 12 mėn. laikant atviroje lauko patalpoje (pastogėje). Oro temperatūros ir drėgmės pokyčiai pateikti 2.2.4 skyriaus 2.4 lentelėje. Bandinių sudedamųjų dangų kombinacijos pateiktos 2.1.3 skyriaus 2.2 lentelėje.

Po 60 dirbtinių sendinimo ciklų atlikus pakartotinius dangos storio matavimus, pastebėtas dangos suminkštėjimas, nes pridėjus prie bandinio paviršiaus „MegaCheck“ dangos storio matavimo prietaisą, likdavo įspaudas dangos paviršiuje. Išmatavus storį, fiksuotas akivaizdus dažų dangų storio padidėjimas, kuris pateiktas 4.14 paveiksle. Dažų dangų „Char 21“ ir „Steelguard FM585“ storis padidėjo vidutiniškai 13,97 %, o dangos „Steelguard FM550“ – tik 8,3 %. Šį reiškinį galime paaiškinti tuo, kad vandeniu skiedžiamų rišiklių suformuotas plėvėdaris, kuris naudojamas priešgaisrinėse išsipučiančiose dažų dangose („Steelguard FM585“ ir „Char 21“), turi silpnesnį atsparumą drėgmės ardančiam poveikiui ir labiau brinksta, palyginus su organiniame tirpiklyje ištirpdytais priešgaisriniais išsipučiančiais dažais („Steelguard FM550“).

4.14 pav. Bandinių pradinis sausos ir sendintos pagal I režimą 60 ciklų vidutinis dangos storis

Fig 4.14. Dry film thickness of the samples change after 60 cycles of aging according I mode

Po dirbtinių sendinimo ciklų pagal I režimą atliekant vizualią bandinių apžiūrą pastebėti dangų pažeidimai. A serijos bandinių, kai buvo naudojama priešgaisrinė išsipučiančių dažų danga „Steelguard FM550“, paviršiuje atsiranda įtrūkimai ir danga atsilupusi (4.15 pav. a).

SDD danga apsaugotų bandinių didžiausi pažeidimai nėra tokie ženkliūs, tačiau dangoje yra įtrūkimų bei paviršiuje atsiradę baltos medžiagos ploteliai (4.15 pav. b). Tikriausiai, tai yra iš priešgaisrinės išsipučiančios dažų dangos difundavę komponentai (vandeniui išgaruojant išsiskyrusios medžiagos).

4.15 pav. A serijos bandinių paviršiaus dangos vaizdas po 60 sendinimų ciklų pagal I režimą: a – padengtų priešgaisrine išsipučiančia dažų danga „Steelguard FM550“; b – padengtų priešgaisrine išsipučiančia dažų danga „Steelguard FM550“ su SDD. Destrucijos požymiai: A – įtrūkimai ir/ar atsilupimai, B – paviršiuje susidariusios medžiagos

Fig. 4.15. A series of samples covering the surface image of aging after 60 cycles according i mode: A – coated intumescent fire coating “Steelguard FM550”, b – coated intumescent fire coating “Steelguard FM550” with SDD. Signs of destruction: A – crack and / or delamination, B – on the surface of the substances

4.16 pav. A serijos bandinių, padengtų priešgaisrine išsipučiančia dažų danga „Steelguard FM550“ su ADD, paviršiaus dangos vaizdas po 60 sendinimų ciklų pagal I režimą po sendinimo. Destrucijos požymiai: B – baltos medžiagos dariniai

Fig. 4.16. A series of samples covered with intumescent fire coating “Steelguard FM550” with ADD, coating image after 60 aging cycles of treatment followed by aging. Signs of destruction: B – white matter structures

Pažeidimai A bandinių serijoje „Steelguard FM550“ su ADD nėra akivaizdūs, kaip prieš tai nagrinėtuose bandiniuose (nėra įtrūkimų ar dangos atsilupimo požymių), tačiau paviršiuje vietomis pastebimos baltos medžiagos dalelių sankaupos, kurių skersmuo 2–3 mm, kaip spėjama, jos taip pat susidarė iš dangos garuojant vandeniui (4.16 pav.). B serijos bandiniai buvo padengti priešgaisrine išsipučiančia dažų danga „Steelguard FM585“ be papildomos apsauginės dangos bandinių paviršiuje. Po 60 dirbtinių sendinimų ciklų pagal I režimą pastebėti bandinio korozijos požymiai – 0,25 cm² ploteliai ir baltos medžiagos dariniai, kurių didžiosios kraštinės ilgis siekė 2,7 cm (4.17 pav. a), o bandinių, padengtų papildomomis apsauginėmis dangomis ADD ir SDD, paviršiuje taip pat susidariusios baltos medžiagos sankaupos, tačiau įtrūkimų dangos paviršiuje nepastebėta (4.17 pav. b).

4.17 pav. B serijos bandinių paviršiaus dangos vaizdas po 60 sendinimų ciklų pagal I režimą: a – padengtų priešgaisrine išsipučiančia dažų danga „Steelguard FM585“; b – padengtų priešgaisrine išsipučiančia dažų danga „Steelguard FM585“ su SDD.

Destrukcijos požymiai: B – medžiagos sankaupos, C – korozijos pažeista danga

Fig. 4.17 B series of samples covering the surface image of aging after 60 cycles of treatment by: a – coated intumescent fire coating “Steelguard FM585” b – coated intumescent fire coating “Steelguard FM585” with SDD. Signs of destruction: B – material accumulation, C – corroded surface

C serijos bandinių dangų paviršiaus pažeidimai panašūs kaip ir B serijos (korozijos požymiai, baltos medžiagos sankaupos), bet dangos įtrūkimų ir atsilupimų nepastebėta. Bandiniai, su kuriais atliktas natūralus sendinimas, buvo apžiūrėti ir pažeidimai užfiksuoti išlaikius juos 6 mėn. ir 12 mėn. Bandinių serijoje A, kai panaudota tik priešgaisrinė išsipučianti dažų danga „Steelguard FM 550“, po 6 mėn. dangos sluoksnyje aptikta susidariusių pūslelių ir įtrūkimų (4.18 pav. a), o tą pačią vietą patikrinus po 12 mėn. pastebėta, kad įtrūkimai padidėjo, atsidengė bandinio paviršius. Tačiau antikorozinė danga nebuvo pažeista (4.18 pav.b).

4.18 pav. A serijos bandinių, padengtų priešgaisrine išsipučiančia dažų danga „Steelguard FM550“, paviršiaus dangos vaizdo pokytis po natūralaus sendinimo: a – po 6 mėn.; b – po 12 mėn. Destrukcijos požymiai:

A – įtrūkimai medžiagos paviršiuje

Fig. 4.18. A series of samples covered with intumescent fire coating “Steelguard FM550”, surface coatings change the image of natural aging: a – after 6 months; b – after 12 months. Signs of destruction: A – cracks in the surface material

4.19 pav. A serijos bandinių, padengtų priešgaisrine išsipučiančia dažų danga „Steelguard FM550“, paviršiaus dangos vaizdo pokytis atliekant natūralaus 12 mėn. sendinimo : a – dangos „Steelguard FM550“ vaizdas po 6 mėn.; b – dangos „Steelguard FM550“ vaizdas po 12 mėn. Destrukcijos požymiai: A – įtrūkimai medžiagos paviršiuje, B – medžiagos sankaupos

Fig. 4.19. A series of samples covered with intumescent fire coating “Steelguard FM550”, surface coatings change the image of natural aging: a – surface “Steelguard FM550” image after 6 months. b – Coverage “Steelguard FM550” image after 12 months. Signs of destruction: A – cracks in the surface of the material, B – material accumulation

Bandinių paviršiuje nebuvo ir plieninio paviršiaus korozijos požymių. Atliekant bandinių, padengtų ADD danga, paliktų pastato išorėje, kur juos veikė tiek temperatūros, tiek drėgmės pokyčiai bei saulės ultravioletiniai spinduliai, stebėjimus, po 6 mėn. bandinių paviršiuje pastebėti maži įtrūkimai ir kristalinės medžiagos sandėliai (4.19 pav. a), kurie išryškėjo atliekant bandinių apžiūrą po 12 mėn. (4.19 pav. b). A serijos bandinių padengtų ADD, pokyčių po 6 mėn. neužfiksuota, tačiau po 12 mėn. išlaikymo pastebėta, jog paviršiuje formuojasi naujadarai arba iš priešgaisrinės dangos su drėgme išskelavusios medžiagos. Sandėliai retai išsibarsčiusios po visą bandinio paviršių ir yra mažo skersmens 1–2 mm. (4.20 pav.).

4.20 pav. A serijos bandinių, padengtų priešgaisrine išsipučiančia dažų danga „Steelguard FM550“ su ADD, paviršiaus dangos vaizdas po 12 mėn. natūralaus senėjimo. Destrukcijos požymiai: B – baltos medžiagos sandėliai

Fig. 4.20. A series of samples covered with intumescent fire coating “Steelguard FM550” with ADD, surface coatings image at 12 months natural aging. Signs of destruction: B – deposits of white material

B serijos bandiniuose pažeidimai panašūs kaip ir A serijos, tačiau kai naudojamas antikorozinis gruntas AG, dangų paviršiuje jau po 6 mėn. pastebimi pirmi plieninio paviršiaus korozijos požymiai (4.21 pav. a), kurie po 12 mėn. išryškėja (4.21 pav. b). Tikėtina, taip atsitinka todėl, jog B serijos bandiniai padengti priešgaisrine išsipučiančia dažų danga „Steelguard FM 585“, kurios tirpiklis yra vanduo. Todėl paviršiuje susikaupusi drėgmė absorbuojama į dangos vidinius sluoksnius, o antikorozinis gruntas AG neužtikrina tinkamos apsaugos, ir plieninis bandinių paviršius pradeda koroduoti.

4.21 pav. B serijos bandinių, padengtų priešgaisrine išsipučiančia dažų danga „Steelguard FM585“, paviršiaus dangos vaizdas po natūralaus sendinimo: a – po 6 mėn.; b – po 12 mėn. Destrucijos požymiai: C – korozijos pažeista danga

Fig. 4.21. B series of samples covered with intumescent fire coating “Steelguard FM585”, coating the surface image of the natural aging: a – after 6 months, b – after 12 months. Signs of destruction: C – corroded surface

B serijos bandiniai buvo padengti priešgaisrine išsipučiančia dažų danga „Steelguard FM585“, su ADD (4.22 pav.).

4.22 pav. B serijos bandinių, padengtų priešgaisrine išsipučiančia dažų danga „Steelguard FM585“, dangos paviršiaus vaizdas po 12 mėn. natūralaus sendinimo bandymų: a – padengtų priešgaisrine išsipučiančia dažų danga „Steelguard FM585“ su ADD; b – padengtų priešgaisrine išsipučiančia dažų danga „Steelguard FM585“ su SDD. Destrucijos požymiai: B – baltos medžiagos sankaupos; C – korozijos pažeista danga

Fig. 4.22 B series of samples covered with intumescent fire coating “Steelguard FM585”, coating the surface image after 12 months of natural aging test: a – coated intumescent fire coating “Steelguard FM585” with ADD; b – coated intumescent fire coating “Steelguard FM585” with SDD. Signs of destruction: B – accumulations of white material, C – corroded surface

Paviršiuje po 6 mėn pokyčių nepastebėta, o po 12 mėnesių paviršiuje buvo matomos baltos medžiagos sankaupos (4.22 pav. a), nors dangoje įtrūkimų neaptikta. Kai padengimas SDD, po 12 mėnesių paviršiuje keletose vietų stebimi susidarę korozijos židiniai (4.22 pav. b).

C serijos bandiniuose, kai panaudota priešgaisrinė išsipučianti dažų danga „Char 21“, dangos paviršiuje po 6 mėn. pokyčių nepastebėta, o po 12 mėn. pastebėti dangos įtrūkimai.

Prieš atsparumo ugniai bandymus išmatuotas visų dangų storis ir, remiantis prie dažų dangų pridėtais sertifikatų priedais, kuriuose nurodytas dangos storis ir juo pasiekiamas atsparumas ugniai, nustatytas kiekvieno bandinio teorinis atsparumas ugniai minutėmis (4.23 pav.). Dirbtiniai sendinimo ciklai pagal I režimą ženkliai sumažino papildomomis dangomis neapsaugotų bandinių atsparumą ugniai, kuris vidutiniškai sumažėjo net 36,86 %. Šiek tiek geresni rezultatai, kai papildomai naudojama SDD danga, šiais atvejais atsparumas ugniai sumažėja 23,73 %. Priešgaisrinę išsipučiančią dažų dangą padengus apsaugine danga ADD, atsparumas ugniai sumažėja 15,01 % (4.23 pav.).

4.23 pav. A serijos bandinių, padengtų priešgaisrine išsipučiančia dažų danga „Steelguard FM550“, kaitintų laikantis tūrinio kaitinimo metodo pagal standarto LST EN 1363-1:1999 reikalavimus, kritinės temperatūros (500 °C) pasiekimo laikas

Fig. 4.23. A series of samples covered with intumescent fire coating “Steelguard FM550”, heated in accordance with the volumetric heating method according to the standard LST EN 1363-1:1999 requirements, critical temperature (500 °C) rise time

Atsparumo ugniai rezultatai, kai bandiniai 12 mėn. veikiami atmosferos pokyčių, nedžiugina. Tačiau jie yra geresni, nei gauti po 60 dirbtinių senėjimo ciklų pagal I režimą. Tokių bandinių, padengtų danga „Steelguard FM550“, atsparumas ugniai sumažėjo 27,43 %, o apsaugotų SDD – 13,55 %. Tuo tarpu papildoma apsaugine danga ADD apsaugotų bandinių atsparumas ugniai sumažėjo tik 9,99 % (4.23 pav.).

4.24 pav. A serijos bandinių, padengtų priešgaisrine išsipučiančia dažų danga „Steelguard FM550“, su kuriais atlikta 60 senėjimo ciklų pagal I senėjimo režimą, bendras vaizdas po atsparumo ugniai bandymų

Fig. 4.24 A series of samples covered with intumescent fire coating “Steelguard FM550”, who underwent 60 cycles of aging by aging mode I, the overall picture of resistance tests

Stebint bandinius, su kuriais atlikta 60 senėjimo ciklų pagal I senėjimo režimą (bendras vaizdas pateiktas 4.24 paveiksle), matyti, kad termoizoliacinė putų nėra susiformavusi arba jos vietomis tiesiog nėra (apatinėje bandinių dalyje). Taip galėjo atsitikti dėl adhezijos praradimo, nes vizuali bandinių apžiūra parodė, kad kai kurios dangos buvo stipriai pažeistos ir iš dalies praradusios sukibimą su antikorozinės dangos paviršiumi.

Bandiniai, kurie buvo natūraliai seninti 12 mėn., po toliau sekusių atsparumo ugniai bandymų parodė, jog paviršiuje susiformavusi termoizoliacinė putų turėjo dalinių įtrūkimų, tačiau nebuvo atsilupusi ir pilnai susiformavusi (4.25 pav.). Didžiausi susiformavusios putos pažeidimai nustatyti bandinyje Nr. 5, kuris buvo padengtas serijos B priešgaisrine dažų danga „Steelguard FM585“ su papildoma apsaugine SDD danga.

4.25 pav. B serijos bandinių, padengtų priešgaisrine išsipučiančia dažų danga „Steelguard FM585“ ir natūraliai sendintų 12 mėn. paviršiaus dangos vaizdas po atsparumo ugniai bandymų

Fig. 4.25. B series of samples covered with intumescent fire coating “Steelguard FM585” and naturally aged for 12 months. cover image of the surface resistance tests

Atlikus bandymus laikantis tūrinio bandymo metodo pagal standarto LST EN 1363-1:1999 reikalavimus, visų B serijos bandinių rezultatai pateikti 4.26 paveiksle. Kaip matome, geriausi rezultatai gauti, kai naudojami „Steelguard FM585“ priešgaisrine išsipučiančia danga padengti nesendinti bandiniai. Tačiau, kai ji apsaugoma papildomomis dangomis ADD ar SDD, atsparumas ugniai vidutiniškai sumažėja tik 5,3 %. Papildoma apsauginė danga taip pat stabdo termoizoliacinės putos formavimasi, tačiau gauti bandymų rezultatai buvo geresni nei apskaičiuoti teoriškai – 8,65 %. Tai dar kartą patvirtino, kad atliekant priešgaisrinių dangų storio teorinius skaičiavimus skirtingais metodais, kurie pateikti Europos standartuose, galimi skirtingi rezultatai. Šiuo atveju yra gautas didesnis atsparumas ugniai nei tikėtasi, kadangi jo vertės viršija pradines, nustatytas empiriškai (4.26 pav.).

4.26 pav. B serijos bandinių, padengtų priešgaisrine išsipučiančia dažų danga „Steelguard FM585“, kaitintų laikantis tūrinio kaitinimo metodo pagal standarto LST EN 1363-1:1999 reikalavimus kritinės temperatūros (500 °C) pasiekimo laikas

Fig. 4.26. B series of samples covered with intumescent fire coating „Steelguard FM585“, heated in accordance with the volumetric heating method according to the standard LST EN 1363-1:1999 requirements of the critical temperature (500 °C) rise time

Dirbtiniai sendinimo ciklai pagal I režimą ženkliai sumažino papildomomis dangomis neapsaugotų bandinių atsparumą ugniai, kuris vidutiniškai sumažėjo net 57,1 %. Tokį didelį atsparumo ugniai sumažėjimą įtakoja tai, kad „Steelguard FM585“ dažai yra skiedžiami vandeniu, o danga, esant drėgnai aplinkai, absorbuoja vandenį. Apsaugine papildoma danga SDD padengtų bandinių atsparumas ugniai sumažėja 26,04 %. Priešgaisrinę išsipučiančią dažų dangą „Steelguard FM585“ padengus apsaugine danga ADD, atsparumas ugniai sumažėja 25,05 % (4.26 pav.). Bandinių, padengtų danga „Steelguard FM585“, atsparumas ugniai sumažėjo 34,88 %, o apsaugotų papildoma danga SDD – 20,75 %. Tuo tarpu, kai bandiniai buvo padengti papildoma apsaugine danga ADD, atsparumas ugniai sumažėjo tik 15,22 %.

C serijos bandinių, kaitinant tūriniu metodu pagal standarto LST EN 1363-1:1999 reikalavimus, atsparumo ugniai bandymų rezultatai pateikti 4.27 paveiksle.

4.27 pav. C serijos bandinių, padengtų priešgaisrine išsipučiančia dažų danga „Steelguard FM585“, kaitintų laikantis tūrinio kaitinimo metodo pagal standarto LST EN 1363-1:1999 reikalavimus, kritinės temperatūros (500 °C) pasiekimo laikas

Fig. 4.27. C series of samples covered with intumescent fire coating “Steelguard FM585”, heated in accordance with the volumetric heating method according to the standard LST EN 1363-1:1999 requirements, critical temperature (500 °C) rise time

Vidutinis „Char 21“ priešgaisrinės išsipučiančios dangos atsparumas ugniai buvo 25 min 30 s, tačiau, kai ji apsaugoma SDD danga, atsparumas ugniai vidutiniškai sumažėja tik 8,84 %. Tačiau toks atsparumo ugniai sumažėjimas vis dar atitinka atsparumą ugniai, nurodytą produkto atitikties sertifikato priede – t. y. 21 min 30 s.

Dirbtiniai sendinimo ciklai pagal I režimą ženkliai sumažino papildomomis dangomis neapsaugotų bandinių atsparumą ugniai, kuris vidutiniškai sumažėjo 40,47 %. Ši danga taip pat yra pagaminta vandeniu skiedžiamo rišiklio pagrindu, kuris, esant drėgnai aplinkai, absorbuoja vandenį, o vandeniui garuojant vyksta medžiagos plėvelės destruktija. Apsaugine SDD danga padengtų bandinių atsparumas ugniai sumažėjo 25,17 %. Po natūralaus sendinimo bandinių atsparumas ugniai sumažėjo 35,08 %, o apsaugotų SDD danga – 16,05 %.

Atlikti tyrimai parodė, kad kai naudojamos papildomos apsauginės dangos, priešgaisrinių dažų dangų pradinis atsparumas ugniai būna mažesnis, nes šios dangos stabdo termoizoliacinės putos susidarymą. Tačiau tokios papildomos dangos pagerina dažų dangų natūrinę ekspoziciją ir modeliuotą eksploatacinę poveikį pagal I ir II režimą, o tuo pačiu – ir minimalų atsparumo ugniai pokytį. Galima teigti, kad priešgaisrinė išsipučianti dažų danga su viršutine danga yra

patikimesnis apsaugos nuo ugnies būdas, kai galimi pokyčiai aplinkoje, tačiau papildomos dangos įtaka turi būti įvertinta.

Kiekviena priešgaisrinė danga turi skirtingas termoizoliacines savybes, taip pat ir skirtingai reaguoja į temperatūros, drėgmės pokyčius, kurie sukelia destruktijos efektus polimerinėje dangų sudėtyje. Todėl gaunami pakankamai skirtingi atsparumo ugniai bandymų, laikantis tūrinio kaitinimo metodo pagal standarto LST EN 1363-1:1999 reikalavimus, rezultatai (4.28 pav.).

4.28 pav. Bandinių, kurių detali specifikacija pateikta 2.1.2 skyriaus 2.2 lentelėje, kaitintų laikantis tūrinio kaitinimo metodo pagal standarto LST EN 1363-1:1999 reikalavimus, kritinės temperatūros 500 °C pasiekimo laikai

Fig. 4.28. Samples with a detailed specification given in Table 2.1.2, Section 2.2, heated in accordance with the volumetric heating method according to the standard LST EN 1363-1:1999 requirements for the critical temperature of 500 °C reaching times

Didžiausi skirtumai gaunami dirbant su sendintais bandiniais, kurie nebuvo apsaugoti papildoma danga. Šiais atvejais po 60 sendinimo ciklą pagal I režimą gaunami blogesni rezultatai, nei natūraliai sendinant bandinius 12 mėn. Tačiau kritinės temperatūros pasiekimo laikų tendencijos yra panašios, nors akivaizdžiai žymiai mažesnės (4.28 pav.).

Nustatyta, kad po 12 mėn. natūralaus sendinimo priešgaisrinių išsipučiančių dažų dangų atsparumas sumažėjo nuo 16,14 % iki 39,97 %, tuo tarpu po 60 dirbtinio sendinimo ciklą pagal I režimą atsparumas ugniai sumažėjo nuo 14,06 % iki 60,46 %, todėl galime teigti, kad šios dangos nėra ilgalaikės veikiant jas temperatūros ir drėgmės pokyčiams, dirbtinio sendinimo metodika

pagal I režimą atitinka natūralų senėjimą, tačiau priklausomai nuo skirtingų dangų sudėčių, tarp jų ir rišiklio, kinta skirtingai (4.28 pav.).

Atlikus regresinę analizę nustatyta, jog galioja tiesinė priklausomybė tarp bandinių atsparumo ugniai laiko, po natūraliai sendintų 12 mėn. ir bandinių, sendintų pagal I režimą 60 ciklų, atsparumo ugniai laiko kaitinant tūriniai pagal standartą LST EN 1363-1:1999, $R^2 = 0,8529$, $R = 0,9235$:

$$t_{fran} = 8,15 + 0,606 t_{amI}, \quad (4.5)$$

čia: t_{fran} – atsparumas ugniai po 12 mėn. natūralaus sendinimo, min; t_{amI} – atsparumas ugniai po 60 ciklų pagal I režimą, min;

4.29 pav. Bandinių atsparumo ugniai laiko po natūralaus 12 mėn. sendinimo priklausomybė nuo dirbtinio sendinimo pagal I režimą

Fig. 4.29. Sample resistance as the natural 12 months. aging, addition to artificial aging under mode I

Remiantis 4.29 paveiksle pavaizduota tiesė ir formule 4.5 galime prognozuoti priešgaistrinių išsipučiančių dažų dangų atsparumą ugniai po 12 mėn. naudojant dirbtinį sendinimą pagal I režimą, kai bandinių atsparumas ugniai kinta nuo 8 min iki 20 min. Tai rodo, kad minėtų bandymo metu (12 mėn.) natūrinis poveikis buvo silpnesnis už 60 ciklų dirbtinio sendinimo pagal I režimą poveikį.

4.3. Priešgaisrinių išsipučiančių ir kombinuotų dažų dangų degumo ir toksiškumo tyrimų rezultatai

4.3.1. Priešgaisrinių išsipučiančių dažų dangų degumo savybės

Priešgaisrinių išsipučiančių dangų degumo charakteristikoms nustatyti buvo paruošta 12 bandinių. Bandinio montavimas VDO bandymų stende parodytas 4.30 paveiksle.

4.30 pav. Bandinys padengtas „Steelguard FM550“ priešgaisrine išsipučiančia danga, pateiktas bandymų stende

Fig. 4.30. The sample covered intumescent fire coating “Steelguard FM550” in the test stand

Priešgaisrinė išsipučianti dažų danga „Steelguard FM550“ organinio tirpiklio pagrindu susidaro išgaruojant tirpikliui. Džiovinimo trukmę labiausiai sąlygoja temperatūra ir oro judėjimas. Džiovininti rekomenduojama ne žemesnėje kaip $+3\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūroje. Procesas vyksta ir žemesnėje temperatūroje, bet gerokai lėčiau. Priešgaisriniai išsipučiantys dažai „Char 21“ yra disperguoti vandenyje. Šių dažų danga susidaro išgaruojant vandeniui ir sulimpant vandenyje dis-

perguotam rišikliui. Procesas negrįžtamas, t.y. šios rūšies sausa danga negali būti vėl disperguota vandenyje. Tokių dažų džiovinimo trukmę labiausiai sąlygoja oro judėjimas, santykinis drėgnis ir temperatūra. Džiovinimas gali vykti ne žemesnėje kaip plius 3 °C temperatūroje (Hill 1993). Ši danga yra mažiau atsparesnė išoriniam aplinkos poveikiui, nei dažų „Steelguard FM550“. Norint ją naudoti agresyvesnėmis aplinkos sąlygomis, yra būtinas tokios dangos padengimas papildoma viršutine danga, apsaugančia nuo išorinio poveikio. Bandymų metu užfiksuoti tokie parametrai, kaip liepsnos didėjimo greitis, šilumos išsiskyrimo greitis, dūmų kiekio didėjimas ir dūmų susidarymo greitis, kurie naudojami įvertinant išbandyto gaminio degumo klasę. Duomenys apdoroti naudojant STATISTICA 6.0 (Sakalauskas 2003; Čekanavičius, Murauskas 2000) kompiuterinę programą ir pateikti žemiau. Bandymo pradžioje liepsna plito bandinio paviršiumi (4.31 pav.).

4.31 pav. Degumo nustatymo įrangoje (SBI) bandinio, padengto danga „Steelguard FM550“ su ADD, bendras vaizdas bandymo metu

Fig. 4.31. Fire detection equipment (SBI) of the sample, coated “Steelguard FM550” with ADD, the overall picture during the test

Stebint bandymą, buvo akivaizdžiai matyti pasikartojantys aukšti liepsnos liežuviai. Bandymo pradžioje apie 6–7 minutę liepsnos liežuviai gaubė visą bandinį (liepsnos aukštis siekė 1,5 m). Taip vyko todėl, kad paveikus paviršių aukšta temperatūra, kartu su dūmais išsiskyrė ir degūs dangų destrukcijos dujiniai komponentai.

Iš 4.32 paveikslo matyti, kad didžiausias šilumos išsiskyrimo greitis yra naudojant dažus organinio skiediklio pagrindu „Steelguard FM550“ su ADD. Didžiausias šilumos išsiskyrimo greitis priešgaisrinės dangos „Steelguard FM550“ su ADD pasiekiamas 7 minutę nuo bandymo pradžios, kai $HRR = 28 \text{ kW}$. Po 10 minučių išsiskiriančios šilumos greitis sumažėja iki $HRR = 2,5 \text{ kW}$, o 25 bandymo minutę lieka mažiausias lyginant su kitomis priešgaisrinėmis dangomis ir tesiekia $HRR = 0,5 \text{ kW}$ (4.32).

4.32 pav. Bandinių, padengtų dangomis „Char 21“, „Steelguard FM550“, „Char 21“ su ADD ir „Steelguard FM550“ su ADD, šilumos išsiskyrimo greičio HRR vertės priklausomai nuo laiko

Fig. 4.32. Specimens coated with coating “Char 21”, “Steelguard FM550”, “Char 21” with ADD and “Steelguard FM550” with ADD, the heat release rate HRR values depending on the time

Priešgaisrinės išsipučiančios dažų dangos „Steelguard FM550“ didžiausias šilumos išsiskyrimo greitis $HRR = 5,5 \text{ kW}$ pasiektas iki 7 bandymo minutės, o vėliau pradeda mažėti iki $HRR = 2,5 \text{ kW}$ 10 minutę, ir toks šilumos išsiskyrimas išlieka visą bandymo laiką (4.32 pav.).

Bandinių, padengtų „Char 21“ priešgaisrine išsipučiančia dažų danga, maksimalus šilumos išsiskyrimo greitis yra $HRR = 6 \text{ kW}$, o su ADD $HRR = 8 \text{ kW}$. Čia taip pat yra skirtumas tarp šilumos išsiskyrimo greičio, tačiau jau tik $HRR = 2 \text{ kW}$. Kai naudota papildoma danga ADD, bandymo pabaigoje išsiskiriančios šilumos greitis abiem atvejais 0,2–0,1 kW, o kai nepanaudota papildoma danga 1,5–1,9 kW (4.32 pav.). Šilumos išsiskyrimo greitis bandymo pabaigoje degant dangoms „Steelguard FM550“ ir „Char 21“ yra kur kas didesnis, nes susidariusiame termoizoliaciniame sluoksnyje toliau vyksta esančių polimerinių medžiagų degimas. Dėl papildomos apsauginės dangos degimo pradžioje susiformavęs kokso sluoksnis galutiniame etape dega lėčiau (4.32 pav.).

Gauti išsiskyrusios šilumos kiekio rezultatai rodo (4.33 pav.), kad priešgaisrinės dangos „Steelguard FM550“ su ADD visas išsiskyrusios šilumos kiekis $THR = 3,6 \text{ MJ}$, o šiluma, išskirta iš bandinio per 10 min nuo jo veikimo pagrindinio degiklio liepsna pradžios, $THR_{600} = 3,4 \text{ MJ}$. Per 10 min nuo bandinio veikimo pagrindiniu degikliu pradžios išsiskyrė apie 94,4 % visos išskirtos šilumos, o per likusias 10 min – apie 5,6 % visos išskirtos šilumos. Iš pasirinktų bandinių būtent šios dangos pasiekia didžiausią šilumos vertę, taip pat šios dangos pasižymi ir didžiausiu išsiskiriančios šilumos greičiu: ($HRR = 28 \text{ kW}$) pasiektas 7 min (4.33 pav.). Tai įrodo, kad šios dangos bandymo pradžioje vyksta spartus dangos paviršiaus degimas, kurio metu išsiskiria šiluma. Priešgaisrinė išsipučianti danga „Steelguard FM550“ išsiskyrė mažiau šilumos $THR = 2,7 \text{ MJ}$, tuo tarpu per 600 s nuo pagrindinio degiklio veikimo liepsna pradžios $THR_{600} = 1,6 \text{ MJ}$. Per 10 min nuo bandinio veikimo pagrindiniu degikliu pradžios išsiskyrė apie 59 % visos išskirtos šilumos, o per likusias 10 min – apie 41 % visos išskirtos šilumos. Priešgaisrinės išsipučiančios dangos „Char 21“ su papildoma danga ADD išskirta šiluma per 600 s nuo pagrindinio degiklio veikimo liepsna pradžios $THR_{600} = 2,1 \text{ MJ}$, o tai sudaro 84 % visos išskirtos šilumos $THR = 2,55 \text{ MJ}$. Mažiausiai šilumos išsiskyrė priešgaisrinė išsipučianti danga „Char 21“ $THR = 2,49 \text{ MJ}$, o $THR_{600} = 1,8 \text{ MJ}$, per pirmasias 10 min išsiskiria 72 % visos išskirtos šilumos. Didelis šilumos kiekio išsiskyrimas bandymo pradžioje vyksta dėl polimerinių medžiagų intensyvaus degimo (4.33 pav.).

Bandinių, padengtų priešgaisrine išsipučiančia danga „Steelguard FM550“, degumo klasė – B, o bandinių padengtų priešgaisrine išsipučiančia danga „Steelguard FM550“ su ADD, degumo savybės pablogėja, t. y. labiau degi, ir degumo klasė – D.

4.33 pav. Bandinių, padengtų dangomis „Char 21“, „Steelguard FM550“, „Char 21“ su ADD ir „Steelguard FM550“ su ADD suminės išsiskyrusios šilumos THR vertės priklausomai nuo laiko

Fig. 4.33. Specimens coated with coating “Char 21”, “Steelguard FM550”, “Char 21” with ADD and “Steelguard FM550” with ADD total heat released THR values depending on the time

Bandinių, padengtų priešgaisrine išsipučiančia danga „Char 21“, degumo klasė – B, ir net papildomai padengus apsaugine danga, degumo klasė išlieka ta pati. Iš dūmų susidarymo greičio priklausomybės nuo laiko, pateiktos 4.34 paveiksle, matyti, kad priešgaisrinė išsipučianti danga „Steelguard FM550“ abiem atvejais pirmomis bandymo minutėmis išskyrė daugiausia dūmų, „Steelguard FM550“ $SPR = 0,17 \text{ m}^2/\text{s}$, o „Steelguard FM550“ su ADD $SPR = 0,41 \text{ m}^2/\text{s}$. Papildomos dangos kiekis padidino išsiskiriančių dūmų greitį $SPR = 0,24 \text{ m}^2/\text{s}$. Šį veiksmą galima paaiškinti šilumos išsiskyrimu, kuo didesnis šilumos išsiskyrimas, tuo didesnis išskiriamų dūmų susidarymo greitis. Danga „Steelguard FM550“ anksčiau pasiekia maksimalų dūmų susidarymo greitį $SPR = 0,41 \text{ m}^2/\text{s}$, todėl galima teigti, jog dėl polimerų sudėtyje esančių anglies ir vandenilio atomų šios dangos sudaro pakankamai degią sistemą. Kaip ir

ankstesniuose bandymuose, pradėjus formuotis putų sluoksniui, dūmų išsiskyrimo greitis mažėja. Priešgaisrinės išsipučiančios dangos „Char 21“ su papildoma danga ADD dūmų susidarymo maksimalus greitis abejais atvejais buvo pasiektas 8 min ir $SPR = 0,12 \text{ m}^2/\text{s}$. Tuo tarpu dangos „Char 21“ $SPR = 0,08 \text{ m}^2/\text{s}$ nuo 16 min susilygino. Abiem atvejais $SPR = 0,05 \text{ m}^2/\text{s}$, o tai įrodo, kad danga tolygiai išskiria dūmus, t.y. toliau vyksta polimerų degimas (4.34 pav.).

4.34 pav. Bandinių, padengtų dangomis „Char 21“, „Steelguard FM550“, „Char 21“ su ADD ir „Steelguard FM550“ su ADD, dūmų susidarymo greičio SPR vertės priklausomai nuo laiko

Fig. 4.34. Specimens coated with coating “Char 21”, “Steelguard FM550”, “Char 21” with ADD and “Steelguard FM550” with ADD, smoke generation rate depending on the value of SPR time

Paveiksle 4.35 kreivės atspindi suminį dūmų išsiskyrimo kiekio priklausomumą nuo laiko panaudojus skirtingas priešgaisrines išsipučiančias dangas. „Steelguard FM550“ su ADD išskyrė didžiausią dūmų kiekį. Pirmomis

minutėmis dominavo didžiausias dūmų išskyrimo greitis, o po kelių minučių jis pasiekė mažiausią dūmų išskyrimo greitį (4.34 pav.). Didžiausias skirtumas tarp skirtingų dažų suminio dūmų kiekio yra bandymų pradžioje (6–10) min (4.35 pav.). Bandymo metu iš dangos „Steelguard FM550“ su ADD TSP = 110 m² dūmų, tuo tarpu danga „Steelguard FM550“ išskyrė 10 % mažiau dūmų.

4.35 pav. Bandinių, padengtų dangomis „Char 21“, „Steelguard FM550“, „Char 21“ su ADD ir „Steelguard FM550“ su ADD suminio bandinio dūmų kiekio vertės priklausomai nuo laiko nuo laiko TSP

Fig. 4.35. Specimens coated with coating “Char 21”, “Steelguard FM550”, “Char 21” with ADD and “Steelguard FM550” with ADD total sample volume of smoke from time to time depending on the value of the time the TSP

Priešgaisrinė išsipučianti danga „Char 21“ su ADD TSP = 72 m² dūmų, o danga „Char 21“ 11 % mažiau. Abiem atvejais papildoma danga ADD išsiskiriančių dūmų kiekį padidino 10–11 %. Degant priešgaisrinei išsipučiančiai danga „Steelguard FM550“, kurios tirpiklis yra ksilenas bei didelį kiekį sudėties sudaro organinės lakiosios medžiagos, dūmų išsiskiria 24 % daugiau, nei stebint

priešgaisrinę išsipučiančią dangą „Char 21“, o padengus papildoma apsaugine danga – net 34,5 %, ir esminis skirtumas stebimas pirmomis degimo minutėmis. Šios pirmosios minutės yra svarbios evakuojant žmones iš pastato.

Bandinių, padengtų priešgaisrine išsipučiančia danga „Char 21“ dūmų klasė – s1, d0, tačiau padengus papildoma apsaugine danga ADD – s2 d0. Bandinių, padengtų priešgaisrine išsipučiančia danga „Steelguard FM550“, dūmų klasė abejais atvejais – s2 d0.

4.3.2. Priešgaisrinių išsipučiančių dažų dangų aukštoje temperatūroje išskiriamų dujų toksiškumo vertinimas

Priešgaisrines išsipučiančias dangas pradėjus veikti pagrindinio degiklio liepsna (bandant VDO stende) CO₂ išsiskyrimas yra pasiekiamas 0,16 % (4.36 pav.).

4.36 pav. Bandinių, padengtų dangomis, CO₂ išsiskyrimas priklausomai nuo laiko bandymo metu, čia: I – „CHAR 21“, II – „Steelguard FM550“, III – „Char 21“ su papildoma danga ADD, IV – „Steelguard FM550“ su ADD

Fig. 4.36. Specimens coated CO₂ emissions depending on the time during the test, here: I – “Char 21”, II – “Steelguard FM550”, III, “Char 21” coat with ADD, IV – “Steelguard FM550” with an additional coating ADD

Praėjus 3 min nuo bandymo pradžios CO₂ išsiskyrimas pradeda ženkliai augti visų dangų atvejais. Degant maksimali CO₂ koncentracija 0,36 % pasiekama 4 priešgaisrinės išsipučiančios dangos „Steelguard FM550“ su ADD bandymo minutę. Tačiau jau 7 min koncentracija sumažėja iki 0,18 %, o bandymo pabaigoje siekia 0,16 %. Palyginus, priešgaisrinę išsipučianti danga „Steelguard FM550“ po 3 min bandymo maksimaliai išskiria tik 0,2 % CO₂. Priešgaisrinės išsipučiančios dangos „Char 21“ su papildoma danga ADD CO₂ išsiskyrimas pradeda augti taip pat nuo 3 min, o maksimali koncentracija 0,24 % pasiekama

3 min po 20 s. Bandymo pabaigoje iš dangų išsiskiria 0,16 % CO₂. Priešgaistrinė išsipučianti danga „Char 21“ daugiausia išskyrė 0,2 % CO₂ 4 min. Visas atvejais CO₂ išsiskyrimas pradeda didėti 3–4 min paveikus bandinius pagrindinio degiklio liepsna ir kinta nuo 0,2 % iki 0,36 %. Tačiau po 3–4 min CO₂ koncentracija pradeda mažėti, ir likusį laiką išsiskiria beveik pastovus CO₂ kiekis. Tai sąlygoja dangos paviršiuje susiformuojantis termoizoliacinis putos sluoksnis, o iš giliau esančių sluoksnių CO₂ išsiskyrimo procesas vyksta lėtai.

4.4 Ketvirtojo skyriaus išvados

1. Priešgaistrinės išsipučiančios dažų dangos bandinių po 60 dirbtinių sendinimo ciklų pagal I ir II režimus kritinės temperatūros bandant vienpusiu kaitinimu pagal standarto LST EN 1363-1:1999 reikalavimus pasiekimo laikas palyginus su kontrolinių bandinių rezultatais atitinkamai sumažėjo: „АгниТерм М“ su ADD – 52,09 % ir 60,41 % (blogiausias rezultatas), „Char 21“ su ADD – 47,06 % ir 52,92%, „Steelguard FM550“ – 36,53 % ir 40,38 %, „Steelguard FM585“ su ADD – 34,54 % ir 38,18 % (geriausias rezultatas). Akivaizdu, kad dirbtinis sendinimas pagal II režimą, kai atitirpinimo metu papildomai naudojamas ultravioletinis apšvitinimas ir beveik maksimali santykinė drėgmė, yra agresyvesnis lyginant su I režimu, kai tik aplinkos santykinė drėgmė yra žymiai mažesnė. Tai patvirtina sudarytos empirinės lygtys.
2. Pagal išvestą lygtį galima prognozuoti atsparumo ugniai laiką po 12 mėn. dangos eksploatavimo lauko patalpoje (kintant tik santykiniai drėgmei ir temperatūrai) pagal priešgaistrinių išsipučiančių dangų atsparumo ugniai rezultatus po 60 dirbtinių sendinimo ciklų pagal I režimą. Tai taip pat rodo, kad 12 mėn. natūrinis poveikis yra silpnesnis už 60 dirbtinių sendinimo ciklų pagal I režimą.
3. 12 mėn. išlaikytų bandinių modeliuotose eksploatacijos sąlygose, kai tūriniu kaitinimo metodu pagal standarto LST EN 1363-1:1999 reikalavimus įvertinamas atsparumas ugniai, padengtų A serijos danga „Steelguard FM550“, atsparumas ugniai sumažėjo 27,43%, o apsaugotų papildoma danga SDD – 13,55 %, tuo tarpu papildoma ADD danga sumažėjo tik 9,99 %. Analoginiai, padengtų B serijos danga „Steelguard FM585“, atsparumas ugniai sumažėjo 34,88%, o apsaugotų papildoma danga SDD – 20,75 %, tuo tarpu papildoma apsaugine ADD danga sumažėjo tik 15,22 %. Tapačiai, padengtų priešgaistrine išsipučiančia C serijos danga „Char 21“ atsparumas ugniai sumažėjo 35,08 %, o apsaugant papildoma danga SDD vidutiniškai sumažėja tik 8,84 %. Todėl papildomos apsauginės dangos tinkamos priešgaistrinių išsipučiančių dažų apsaugai nuo atmosferos poveikių.

4. Atlikus atsparumo ugniai bandymus kaitinant vienpusiai pagal standartą LST EN 1363-1:1999 su sendintais pagal I režimą bandiniais iš susidarančios termoizoliacinės putos storio kinetikos akivaizdžiai matosi, kad priešgaisrinėse dangose vyksta pokyčiai, nes susidariusios putos storis pradeda mažėti jau po 15 ciklų. Gauta lygtis prognozuoti susidarančios termoizoliacinės putos storiui priklausomai nuo dirbtinio sendinimo pagal I režimą ciklų skaičiaus, kai kontrolinių bandinių susidaręs termoizoliacinis putos storis kinta nuo 50 mm iki 80 mm.
5. Nustatyta, kad kritinės temperatūros pasiekimo laikas priklauso nuo dirbtinių sendinimo ciklų skaičiaus ir susidariusios termoizoliacinės putos storio, kai atsparumo ugniai laikas įvertinamas kaitinant vienpusiai pagal standartą LST EN 1363-1:1999. Atlikus regresinę analizę visoms tirtoms dangoms gauta bendra empirinė lygtis, kur funkcija yra priešgaisrinės išsipučiančios dangos atsparumas ugniai (min), o argumentai atitinkamai susidariusios termoizoliacinės putos storis (mm) ir dirbtinių sendinimo ciklų skaičius pagal I režimą.
6. Bandinių, padengtų priešgaisrine išsipučiančia danga „Steelguard FM550“, degumo klasė – B, o dūmų klasė s2, d0. Bandinių, padengtų priešgaisrine išsipučiančia danga „Steelguard FM550“ ir papildoma danga ADD, degumo savybės pablogėja, t.y. danga tampa labiau degi ir degumo klasė – D, dūmų klasė s2, d0. Bandinių, padengtų priešgaisrine išsipučiančia danga „Char 21“, degumo klasė – B, o dūmų klasė s1, d0, tačiau juos padengus papildoma ADD danga, apsaugančia nuo išorinio poveikio, degumo klasė – B, dūmų klasė s2, d0 pablogėja.
7. Maksimali CO₂ koncentracija 0,36 % pasiekama deginant priešgaisrinės išsipučiančios dangos bandinius „Steelguard FM550“ su ADD danga, o priešgaisrinė išsipučianti danga „Steelguard FM550“ maksimaliai išskiria tik 0,2 % CO₂. Deginant priešgaisrinės išsipučiančios dangos „Char 21“ su papildoma danga ADD bandinius, išskiria 0,24 % CO₂, o priešgaisrinės išsipučianti dangos „Char 21“ daugiausia išskyrė 0,2 % CO₂. Galima teigti, kad papildoma apsauginė danga ADD degant padidina CO₂ kiekį.

Priešgaisrinių išsipučiančių ir kombinuotų dažų dangų suirimo mechanizmas

Priešgaisrinės išsipučiančios dažų dangos yra gaminamos iš įvairių polimerinių medžiagų, kurių savybės kinta veikiant aplinkos poveikiams.

Skyriaus tematika paskelbti du autoriaus straipsniai (Grigonis, Demidova-Buizininė 2008; Grigonis, Mačiulaitis, Praniauskas 2012).

5.1. Skirtingų priešgaisrinių išsipučiančių ir kombinuotų dangų paviršių analizė

Po 12 mėn. natūralaus sendinimo, taip pat po 15, 30, 45 ir 60 dirbtinio sendinimo ciklų pagal I režimą ir II režimą atlikus dirbtinius sendinimo ciklus su plieninėmis plokštelėmis padengtomis dažų dangomis, buvo paimti mėginiai, kad nustatytume paviršiaus pokyčius sendinimo metu. Priešgaisrinės išsipučiančios dažų dangos mėginiai buvo tiriami skenuojančiu elektroniniu mikroskopu dangai visiškai išdžiūvus. Išdžiūvusių kontrolinių priešgaisrinių išsipučiančių dažų dangų paviršiai yra pakankamai lygūs (5.1 pav.).

5.1 pav. Išdžiuvusios nesendintos dažų „Steelguard FM550“ dangos paviršius
Fig. 5.1. Dry coating “Steelguard FM550” surface

5.2 pav. Dažų „Steelguard FM550“ dangos paviršius po 12 mėn. natūralaus sendinimo paviršiuje susidarę: 1 – nuosėdos; 2 – ertmės

Fig. 5.2. “Steelguard FM550” coating surface after 12 months. Natural aging:
 1 – precipitate, 2 – cavity

Kaip matome 5.2 paveiksle, „Steelguard FM550“ paviršiuje yra susiformavusios ertmės, kurių skersmuo svyruoja nuo $0,35\ \mu\text{m}$ iki $0,8\ \mu\text{m}$, ir susidariusios medžiagos – nuosėdos, kurių nebuvo ant išdžiūvusios (kontrolinės) dangos paviršiaus. Padidinus vaizdą matyti, kad naujadaro viduryje yra ertmė,

kurios skersmuo $1,3\ \mu\text{m}$. Tikėtina, kad pakraščiuose matomi greičiausiai kristaliniai naujadarai ar nuosėdos, gali būti išplauti iš dangos ertmių ar kaip medžiagos išsiskyrusios iš paviršiaus sluoksnių (5.3 pav.). Tai galima traktuoti, kaip ertmių formavimosi pradžią dėl dažų masės nehomogeniškumo.

5.3 pav. Dažų „Steelguard FM550“ dangos paviršiuje po 12 mėn. natūralaus sendinimo susidariusi ertmė ir nuosėdos aplink ją

Fig. 5.3. Paint “Steelguard FM550” coating on the surface after 12 months natural aging cavity formed in and around the precipitate

5.4 pav. Dažų „Steelguard FM550“ dangos ADD paviršius po 12 mėn. natūralaus sendinimo: 1 – įtrūkimai, atsilupimai, atsisluoksniavimai

Fig. 5.4. Paint “Steelguard FM550” ADD coating surface after 12 months natural aging: 1 – cracks, delamination, delamination

Priešgaisrinės dažų dangos „Steelguard FM550“ su ADD paviršiuje dominuoja kitokio pobūdžio defektai. Tai lemia būtent apsauginės dangos sluoksnis. Paviršiuje pilna įvairaus pobūdžio pažeidimų: įtrūkimai, atsilupimai, atsisluoksniavimai (5.4 pav.).

Naudojant papildomą SDD dangą, kad apsaugotume priešgaisrinę dažų dangą „Steelguard FM550“, 5.5 paveiksle matoma labai didelė apsauginės dangos paviršiaus destruktija – plyšiai. Taip pat paviršiuje susidaręs gilesnių įtrūkimų tinklas. Kai kur pažeidimų plotis siekia iki 5 μm . Iš to galime spręsti, kad papildoma apsauginė danga yra apirusi ir pilnai nebeatlieka apsauginės funkcijos. Formuojantis tokiems defektams buvo labiau paveiktas drėgmės ir apatinis priešgaisrinės išsipučiančios dangos sluoksnis.

5.5 pav. Dažų „Steelguard FM550“ dangos su SDD paviršius po 12 mėn. natūralaus senėjimo: 1 – plyšiai

Fig. 5.5. Paint “Steelguard FM550” coatings with an additional protective coating SDD surface after 12 months natural aging: 1 – pavement cracks

Išdžiuvusios priešgaisrinės išsipučiančios dažų dangos „Steelguard FM585“ paviršius taip pat yra pakankamai lygus (5.6 pav.), nėra jokių nelygumų ar plyšių.

5.6 pav. Išdžiuvusios dažų „Steelguard FM585“ dangos paviršius
Fig. 5.6. Dry paint “Steelguard FM585” surface coating

Dažų „Steelguard FM 585“ dangos paviršiuje po 15 sendinimo ciklų pagal I režimą jau buvo pastebėti nežymūs pakitimai, atsiradusios ertmės bei nuosėdos (5.7 pav.). Iš esmės, paviršius dar yra pakankamai lygus, tačiau vietomis matomi skirtumai, lyginant su kontrolinio bandinio paviršiumi.

5.7 pav. Dažų „Steelguard FM 585“ dangos paviršius po 15 sendinimų ciklų pagal I režimą: 1 – ertmės, 3 – nuosėdos
Fig. 5.7. Paint “Steelguard FM 585” surface of aging after 15 cycles of treatment under I mode: 1 – cavity coating, 3 – precipitate

Tapačių dažų bandinių, su kuriais buvo atlikta 30 sendinimo ciklų, paviršiuje pastebimas didesnis kiekis pažeidimų bei nuosėdų, nei po 15

sendinimo ciklą. Bandinių paviršiuje stebime naujadarus, mikroįtrūkimus ir ertmes, kurių skersmuo iki $1,6\ \mu\text{m}$ (5.8 pav.).

5.8 pav. Dažų „Steelguard FM 585“ dangos paviršius po 30 sendinimų ciklų pagal I režimą: 1 – ertmės, 2 – įtrūkimai, 3 – nuosėdos

Fig. 5.8. Paint “Steelguard FM 585” surface of aging after 30 cycles of treatment under I mode: 1–cavity, 2 – cracks, 3 – precipitate

Bandiniuose, su kuriais buvo atlikta 45 dirbtinio sendinimo ciklai, pastebėtas žymus ertmių vystymasis ir didėjantys nuosėdų kiekiai (5.9 pav.).

5.9 pav. Dažų „Steelguard FM 585“ dangos paviršius po 45 sendinimų ciklų pagal I režimą: 1 – ertmės, 3 – nuosėdos

Fig. 5.9. Paint “Steelguard FM 585” surface of aging after 45 cycles of treatment under I mode: 1 – cracks, 3 – precipitate

Tapačių bandinių paviršius susidaro po 60 dirbtinių sendinimo ciklų, vystosi dar didesnis kiekis ertmių, kurių skersmuo siekia iki 7 μm (5.10 pav.). Taip pat susidaro didesni naujadarų kiekiai.

5.10 pav. Dažų „Steelguard FM 585“ dangos paviršius po 60 sendinimų ciklų pagal I režimą: 1 – ertmės, 3 – nuosėdos

Fig. 5.10. Paint “Steelguard FM 585” surface of aging after 60 cycles of treatment under I mode: 1 – cavity, 3 – precipitate

Vykdamas sendinimo bandymus, pažeidimus dažų dangų paviršiuje sąlygoja atmosferinė drėgmė ir temperatūrų kaita. Išėmus sušaldytus bandinius iš šaldymo kameros ir sudėjus į eksikatorių atšildymui, ant dažų dangos paviršiaus kondensuojasi ore esanti drėgmė, nes rasos taškas atsiranda ant plieno plokštelės paviršiaus. Bandiniui atšilus vanduo brinkina ir dažų dangą, o vėliau migruoja į vidinius dangos sluoksnius. Čia palaipsniui tirpsta arba disperguojasi vandenyje tirpūs ar skiedžiami dangos komponentai. Iš literatūros žinoma, kad amonio polifosfatas, pentaeritritas ir melaminas yra daugiau ar mažiau vandenyje tirpios ir su juo sąveikaujančios medžiagos (Большой энциклопедический словарь 2000). Priešgaisrinių išsipučiančių dangų komponentai – mono amonio fosfatų junginiai, kontaktuodami su vandeniu, pasišalina iš dangos (Hill 1993). Bandinį sugrąžinus atgal į šaldymo kamerą kitam šaldymui, vanduo, įsiskverbęs brinkimo metu į dangoje susidariusias mikroporas ir kapiliarus, juose užšala ir dėl besikristalizuojančio vandens plėtos bei tolesnės vandens migracijos procesų išsivysto viršslėgis ir vyksta laipsniškas dangos struktūros ardymas. Dalis vandens tirpalo migruoja į dangos paviršių, sublimaciniai džiūsta, o ištirpę komponentai rekristalizuojasi ir/ar amorfizuoja. Taip susidaro ertmės, o aplink jas kristalai ar amorfinės nuosėdos. Tai patvirtina ir faktas, kad didėjant

sendinimo ciklų skaičiui, atsiranda vis didesnės ertmės, vystosi įtrūkimų tinklas ir auga nuosėdų kiekis. Vandenyje brinkstantys ir tirpūs dažų komponentai, kurie kaupiasi dangos paviršiuje, potencialiai gali reaguoti, pavyzdžiui, su ore esančiu CO_2 , sudarydami karbonatų kristalus, ar reaguoti su kitais oro komponentais. Panašūs procesai vyksta su keraminėmis plytomis ir blokeliais nustatant gaminių atsparumą šalčiui mūre vienpusio šaldymo ir atšildymo būdu modeliuotose eksploatacijos sąlygose (Mačiulaitis 1997). Mūsų atveju, analogiškas poveikis gaunamas ir sendinant dažų dangas 12 mėn., veikiant svarbiausiems natūriniams veiksniams. Taigi nuosėdos ant dangų paviršių susidaro dėl masės ir šilumos mainų procesų, kai dažų sudėtiniai komponentai, sąveikaujantys su vandeniu ir tirpstantys jame bei reguliuojantys išsipučiančių dangų susidarymą, dėl blogo pasiskirstymo ar per mažo dispersiškumo dažų dangose, yra išplaunami į paviršių ir palikdami dangose ertmes, plyšius, suskilimus, nebeatieka savo svarbiausios funkcijos. Pagaliau, vis didinant dirbtinių ar natūrinių ciklų skaičių, dangos paviršius iš esmės suardomas, todėl degimo metu žymiai sumažėja besiformuojančios putos storis, o dėl šios priežasties ir atsparumas ugniai. Žinoma, kai tokie komponentai tolygiai pasiskirtę dažuose ir dangoje, kaitinant nesendintas priešgaisrinių išsipučiančių dažų dangas yra užtikrinamas reikiamas atsprumas ugniai. Ir priešingai, priešgaisrinių dažų dangos ciklinio sendinimo metu absorbuoja vis didesnius vandens kiekius ir į paviršių vis labiau išplaunami pagrindiniai komponentai (amonio polifosfatas, pentaeritritas ir melaminas), putinantys dangą ir didinantys anglies liekaną. Tai patvirtina pakartotiniai dangų storio matavimai, kai užfiksuotas jų storio padidėjimas (4.14 pav.). Be to, atliekant bandymus kai kurių dažų dangų sendinimo metu buvo organoleptiškai jaučiamas amoniako kvapas.

5.2. Priešgaisrinių išsipučiančių dažų dangų terminė analizė

Atlikus termogravimetrinius tyrimus su „АгниТерм М“ priešgaisrine išsipučiančia danga, jos termogramoje (5.11 pav.) aiškiai matomi keturi masės praradimo etapai (11,3 %, 32,8 %, 7,5 % ir 19,7 %), kurių minimumai pasireiškė pasiekus 237 °C, 320 °C, 437 °C ir 990 °C temperatūrą. Šie etapai – tai dažų dangų sudedamųjų komponentų skilimas tam tikroje temperatūroje. Liekamoji masė bandymo pabaigoje sudaro 28,7 %. Pirmajame etape prarandama 11,3 % masės, įskaitant dangos absorbuotą vandenį, kai temperatūra kito nuo 20 °C iki 270 °C. Antrojo masės praradimo metu užfiksuota didžiausia masės netektis 32,8 %, kai temperatūra kito nuo 270 °C iki 425 °C. Trečiajame etape, esant temperatūrai nuo 425 °C iki 480 °C, masės netektis sudarė 7,5 %. Ketvirtajame

etape, esant temperatūrai nuo 480 °C iki 990 °C, masės netektis sudarė 19,7 %, kuriame, tikėtina, jau dominavo anglėjimo procesas.

5. 11 pav. TG, DTG kreivės priešgaistrinės išsipučiančios dažų dangos „АгниТерм М“ azoto aplinkoje

Fig. 5.11. TG, DTG curves fire intumescent paint “АгниТерм М” under nitrogen

Pentaeritritas pradeda skilti esant 185 °C, o užsiliepsnoja viršijus 450 °C. Melaminas sublimuotis ir skilti pradeda nuo 280 °C, o jo virimo temperatūra 350 °C (Andersson *et al.* 2007; Jimenez *et al.* 2006). Amonio polifosfatas pradeda skilti nuo 250 °C (Guoxin 2007). Žinant šių komponentų skilimo temperatūras, galima nustatyti, kokia medžiaga suskilo pasiekus tam tikrą temperatūrą (endoterminis efektas, *DTA*). Anot Camino (Camino *et al.* 1989), kai panaudotos kelios panašiose temperatūrose skylančios medžiagos, jų skilimo temperatūros gali persidengti ir pasikeisti.

Priešgaistrinės išsipučiančios dangos „Char 21“ termogramose (5.12 pav., 5.13 pav. ir 5.14 pav.) aiškiai matomi keturi masės praradimo etapai. Palyginus *DTA* kreives minėtuose paveiksluose galima teigti, kad dirbtiniai sendinimo ciklai pagal I ir II režimus paveikė priešgaistrinės išsipučiančios dangos sudėtį.

Nesendintos priešgaistrinės išsipučiančios dangos „Char 21“ *DTA* kreivėje matomi šeši endoterminiai efektai esant temperatūroms 71,7 °C, 118 °C, 185,5 °C, 230,5 °C, 310 °C ir 322 °C, kurių minimumai yra pakankamai ryškūs (5.12 pav.).

5.12 pav. TG, DTG kreivės nesendintos priešgaistrinės „Char 21“ dangos, bandytos azoto terpėje

Fig. 5.12. TG and DTG curves unaged fire “Char 21” coating tested nitrogen

5.13 pav. TG, DTA kreivės priešgaistrinės „Char 21“ sendintos 60 ciklų pagal I režimą dangos bandytos azoto terpėje

Fig. 5.13. TG and DTA curves of fire “Char 21” aged under 60 cycles of treatment coatings tested nitrogen

Pagal I režimą 60 ciklų sendintos dangos „Char 21“ terminė analizė parodė, jog endoterminių efektų lokalizacija pakito (5.13 pav.). Pirmasis endoeфекtas 80–90 °C aiškintinas vykstančiu vandens garavimu. Antrasis endoeфекtas, kurio minimumas pasireiškia esant 124,9 °C temperatūrai, taip pat susietas su vandens pašalinimu iš dangos, tikėtina, fizikiniu būdu surišto jos kapiliaruose. Trečiojo endoeфекto temperatūrinis poslinkį palyginus su nesendinta dangos nuo 185,6 °C, kai turėtų skilti pentaeritritolis, su temperatūriniu poslinkiu esant 180,3 °C, gaunamas rezultatas – 5,3 °C. Žinoma, šiuo atveju temperatūros skirtumas susidaro lyginant su nesendinta danga, ir tai būtų galima susieti su pentaeritritolio skilimu tiktai esant jo mažesniai kiekiui ar/ir nežymiai kokybiškai pakitus. Tai galioja ir ketvirtajam endoeфекtui, kai galimai pasireiškia amonio polifosfato skilimas 229,7 °C, o temperatūrinis pokytis yra gana ryškus +2,4 °C, tik temperatūros didėjimo linkme palyginus su nesendinta „Char 21“ danga. Nėra abejonės, jog penktasis ir šeštasis endoeфекtas, greičiausiai, yra susieti su melamino ir jo darinių destrukcija, kuri „Char 21“ nesendintoje dangoje bandant azoto terpėje prasideda jau pasiekus 310,3 °C temperatūrą, o kitas sekantis šeštasis endoeфекtas pasireiškia esant 322,0 °C. Pagal I režimą „Char 21“ sendintoje dangoje vietoje dviejų stebime ganėtinai ryškius tris endoeфекtus, pasiekus 278,0 °C, 290,0 °C ir 342,9 °C temperatūrą (5.13 pav.).

Pagal II režimą „Char 21“ sendintoje dangoje taip pat stebime svarbius pokyčius. Pirmasis endoeфекtas 80–90 °C taip pat aiškintinas vykstančiu nesurišto vandens garavimu (5.14 pav.), o antras endoeфекtas pasiekus 125,3 °C, tikėtina, fizikiniu būdu surišto dangos kapiliaruose vandens eliminavimu. Temperatūros aspektu tas ryšys truputį stipresnis palyginus su danga, sendinta pagal I režimą. Trečiojo endoeфекto temperatūrinis poslinkis, palyginus su nesendinta danga, esant 185,6 °C, kai turėtų skilti pentaeritritas (5.12 pav.), gaunamas su žymiu temperatūriniu poslinkiu esant 178,7 °C (5.14 pav.), lygiu net – 6,9 °C. Tai reikštų, jog UV spinduliuotė kartu su maksimaliai padidinta santykinė drėgme intensyviau ardo priešgaisrinę dangą. Ketvirtajam endoeфекtui, kai galimai pasireiškia amonio polifosfato skilimas esant 230,6 °C, o sendintoje pagal II režimą „Char 21“ dangoje tik esant 229,7 °C, temperatūrinis pokytis yra gana mažas ir neigiamas – 0,9 °C. Tai galimai rodo, jog šitam komponentui didesnę įtaką turi UV spinduliuotė. Pagal II režimą „Char 21“ sendintoje dangoje susieti su melamino ir jo darinių destrukcija, kaip ir sendintoje pagal I režimą, *DTG* kreivėje pasireiškia ganėtinai ryškūs trys endoeфекtai: pasiekus 278,0 °C, 290,0 °C ir 342,9 °C temperatūrą (5.14 pav.).

5.14 pav. TG, DTA kreivės sendintos 60 ciklų pagal II režimą priešgaisrinės „Char 21“ dangos, bandytos azoto terpėje

Fig. 5.14. TG and DTA curves aged 60 cycles of treatment pursuant to the fire “Char 21” coating tested nitrogen

5.1 lentelė. Medžiagų virsmo ir skilimo temperatūros

Table 5.1. Materials decomposition temperature

Nr.	Medžiaga	Virsmo ir/ar skilimo temperatūra pagal literatūrą, °C	Endoterminio efekto temperatūra, °C		
			Nesendinta danga	Sendinta danga pagal I režimą	Sendinta danga pagal II režimą
1.	Vanduo	100	71,7; 118	80–90; 124	79,4–95; 125,3
2.	Pentaeritritas	186 (Lydosi 260,5) (Užsiliepsnoja <450)	185,6	180,3	178,7
3.	Amonio polifosfatas	250 (>200 skyla)	230,6	228,2–235	229,7
4.	Melaminas	280 (354 skyla)	310–322	278–295	272–295, 330–342,5

Bandinių sudedamųjų medžiagų skilimo ir fazinio virsmo temperatūros pagal literatūrą (Andersson *et al.* 2007; Jimenez *et al.* 2006; Guoxin 2007, Большой энциклопедический словарь 2000) ir priešgaisrinių išsipučiančių dažų dangų endoterminių efektų temperatūrų suvestinė pateikta 5.1 lentelėje.

Atlikus termografinius tyrimus su priešgaisrinėmis išsipučiančiomis dangomis „Char 21“, „Steelguard FM 585“ ir „Steelguard FM550“, nustatytas bendras masės nuostolis iki 600 °C temperatūros pateiktas 5.2 lentelėje. Termogravimetrinės analizės rezultatai akivaizdžiai parodė skirtumus tarp nesendintų ir dirbtinai sendintų dangų. Šie tyrimai dar kartą patvirtino, kad laikui bėgant priešgaisrinės dažų dangos praranda savo termoizoliacines savybes, dėl kurių sumažėja atsparumo ugniai laikas.

5.2 lentelė. Įvairių priešgaisrinių išsipučiančių dažų dangų masės nuostoliai kaitinant azoto terpėje iki 600 °C

Table 5.2. Various intumescent fire protection coatings mass losses under nitrogen at heating up to 600 °C

Priešgaisrinės išsipučiančios dažų dangos pavadinimas	Bandinių masės nuostolis, %		
	Kontrolinis	Sendinta pagal I režimą	Sendinta pagal II režimą
Char 21	47,17	57,90	58,88
Steelguard FM585	47,34	51,77	52,73
Steelguard FM550	54,95	60,38	63,63

Kaip matome iš bandinių masės nuostolių, didžiausi masės nuostoliai nustatyti bandiniuose, sendintuose 60 ciklų pagal II režimą, tačiau skirtumas lyginant su sendintais pagal I režimą svyruoja nuo 0,98 % iki 3,25 %, tai rodo kad dirbtinio sendinimo režimai pakankamai stipriai įtakojo dangų termines savybes.

5.3. Priešgaisrinių išsipučiančių dažų dangų Furjė infraraudonųjų spindulių spektroskopinė analizė

Bandymo metu buvo atlikta dažų „Char 21“ nesendintos dangos terminė FT-IR analizė (5.15 pav.). Matome, jog viso bandymo metu iš dangos išsiskyrė įvairios dujos. Temperatūrai bandymo metu pradėjus kilti ir pasiekus 200 °C iš dangos dujos pradeda intensyviai skirtis. Tai tęsiasi tol, kol dangos temperatūra pasiekia 450 °C. Tuo metu vyksta ir didžiausias masės praradimas.

5.15pav. 3D vaizdas visų aptiktų infraraudonųjų spektrų, gautų išsiskiriančių dujų iš „Char 21“ kontrolinių dažų dangos terminės analizės metu kintant temperatūrai

Fig. 5.15. 3D view of all detected infrared spectra obtained by gas leaking from “Char 21” thermal analysis, surface temperature variations

Palyginus išsiskiriančių dujų spektrus su kontroliniais dujų spektrais nustatyta, kad esant 234 °C temperatūrai iš dangos išsiskiria anglies dioksidas (CO_2) ir amoniakas (NH_3) (5.16 pav.).

Amoniaکو dujos išsiskiria sklyant amonio polifosfatui ir melaminui (Andersson *et al.* 2007; Jimenez *et al.* 2006), o šios medžiagos sudaro didžiąją dalį priešgaisrinių išsipučiančių dažų dangos sudėties (Wainwright, Evans 1994).

Priešgaisrinėse išsipučiančiose dažų dangose „Steelguard FM550“, kai temperatūra kito nuo 250 °C iki 375 °C buvo didžiausias masės praradimas. Buvo nustatyta, kad išsiskiria CO , CO_2 ir H_2O (5.17 pav.).

5.16 pav. Iš „Char 21“ dangos išsiskiriančių dujų IR spektro palyginimas su amoniako ir anglies dioksido dujų spektrais esant 234 °C azoto aplinkoje

Fig. 5.16. The comparison of “Char 21” off-gas surface and the spectrum of ammonia and carbon dioxide gas spectra at 234 °C

5.17 pav. Iš priešgaisrinės išsipučiančios dažų dangos „Steelguard FM 550“ išsiskiriančių dujų IR spektrais esant maksimaliam masės praradimui temperatūroje nuo 250 °C iki 375 °C azoto terpėje

Fig. 5.17. The intumescent fire coating “Steelguard FM550” off-gas IR spectra at the maximum mass loss at temperature from 250 °C up to 375 °C.

Remiantis patentiniais šaltiniais (Deogon 1991; Green, Darysl 2005) nustatyta, kad amonio polifosfatas ir melaminas gali sudaryti nuo 20 % iki 40 % bendros dažų dangos masės, jie kylant temperatūrai suskyla į dujas (Jimenez *et al.* 2006; Andersson *et al.* 2007). Todėl 5.14 paveiksle ir 5.2 lentelėje fiksuojamas stiprus masės sumažėjimas. Tuo momentu išsiskiriančių dujų IR spektrai fiksuoja NH_3 , CO , CO_2 , H_2O dujas ir/ar garus (5.15–5.17 pav.). Melaminas ir amonio polifosfatas veikia kaip kildančioji medžiaga, iš dangos išskirdama dujas ir garus ji formuoja (putina) dangą, taip sudarydama termoizoliacinį sluoksnį iš termiškai atsparių anglies liekanų. Tačiau, degant priešgaisrinėms išsipučiančioms ir kombinuotoms dažų dangoms, išsiskiriančios dujos ir garai, išskyrus H_2O , yra pavojingi žmogaus gyvybei (Žukas *et al.* 2005; Darginavičienė, Drungilienė 2008).

Sausų priešgaisrinių išsipučiančių dažų dangų „Char 21“, „Steelguard FM585“ ir „Steelguard FM550“ cheminė sudėtis buvo nustatoma pagal IR spektrus.

Remiantis Buika, kuris teigia, kad bangos skaičiui $3650 \div 3200 \text{ cm}^{-1}$ spektre plačios vidutinio ir didelio intensyvumo absorbcijos smailės nurodo apie OH arba NH ryšių buvimą. $2700 \div 2000 \text{ cm}^{-1}$ plačių absorbcijos juostų buvimas nurodo į NH grupių buvimą. $3000 \div 2700 \text{ cm}^{-1}$ smailės atitinka valentinių C–H ryšių virpesius CH, CH_2 , CH_3 grupėse. Šių smailių intensyvumas gali būti orientaciniu rodikliu, rodančiu šių grupių kiekį junginyje esant bangos skaičiui $1600 \div 1500 \text{ cm}^{-1}$. Žymiai mažesnio intensyvumo absorbcijos juostų buvimas $1200 \div 1000 \text{ cm}^{-1}$ srities dalyje identifikuoja C=C, C=N arba NH_2 , NH virpesius (Buika *et al.* 2007). Ši sritis yra dalis „pirštų antspaudų“ srities ir čia yra bene vienintelė absorbcijos smailė, kurią galima individualiai identifikuoti $1000 \div 635 \text{ cm}^{-1}$. Kadangi IR spektras yra labai sudėtingas, tai nėra universalios metodikos jo interpretacijai (Buika *et al.* 2007).

Kaip kontroliniai pasirinkti išdžiūvusių dangų spektrai, kurie buvo lyginami su spektrais gautais bandinius sendinant 60 ciklų pagal I režimą ir pagal II režimą. Kad galėtume identifikuoti medžiagos pakitimus, užrašyti melamino (toliau – MEL), amonio polifosfato (toliau – APP) ir pentaeritrito (toliau – PEN) bangų skaičiai, kurie pateikti 5.3 lentelėje.

Atlikus FT-IR tyrimus su priešgaisrine išsipučiančia dažų danga „Steelguard FM 550“ padengtais bandiniais užrašyti bangų skaičiai pateikti 5.18 paveiksle. Lyginant kontrolinio bandinio ekstremumus su sendintų pagal skirtingus I ir II režimus bandinių matome, kad sumažėja kelių ekstremumų dydžių intensyvumas 3348 cm^{-1} , 1559 cm^{-1} , 1164 cm^{-1} , 813 cm^{-1} . Visi šie ekstremumai priklauso melamino junginiui, todėl galime teigti, kad įvyko pokyčiai melamino molekulinėje struktūroje.

5.3 lentelė. Priešgaisrinių išsipučiančių dažų dangų pagrindinių komponentų bangų skaičiai

Table 5.3. The number of waves of intumescent fire protective coatings the main components

Medžiaga	Bangos skaičius, cm ⁻¹										
APP	3729	3215	3062	1776	1702	1444	1254	1138	1070	1024	896
	800	762	682	646							
MEL	3348	2956	1559	1506	1358	1164	1116	1014	898	813	743
PEN	3342	2956	2887	2799	2652	2529	2049	1476	1452	1408	1383
	1277	1231	1130	1208	1008	874	667

5.18 pav. Priešgaisrinės išsipučiančios dangos „Steelguard FM 550“ bandinių FT-IR spektrai: FM550 kontrolinis – kai danga nebuvo sendinta, FM550 I – sendinta pagal I režimą, FM550 II – sendinta pagal II režimą

Fig. 5.18. Intumescent fire protective coating “Steelguard FM550” samples of FT-IR spectra, Steelguard FM550 benchmark – the coating was not aged, Steelguard FM550 I – I aged by mode, Steelguard FM550 II – II, aged by mode

Didžiausi pokyčiai spektruose priešgaisrinių išsipučiančių dažų dangų „Char 21“ ir „Steelguard FM 585“, kurių polimeriniai rišikliai yra disperguoti vandenyje. 5.19 paveiksle pateikti dangos „Char 21“ spektrai ir matome, kad jau

po dirbtinio sendinimo 60 ciklų pagal I režimą sumažėja smailių intensyvumas 3470 cm^{-1} , 3419 cm^{-1} , 3196 cm^{-1} , 1547 cm^{-1} , 1435 cm^{-1} , 803 cm^{-1} , 677 cm^{-1} ir atsiranda naujos smailės 1331 cm^{-1} , 1166 cm^{-1} . Po dirbtinio sendinimo 60 ciklų pagal II režimą dingsta smailės 3470 cm^{-1} , 3419 cm^{-1} , 2955 cm^{-1} , 1613 cm^{-1} , 1547 cm^{-1} . Kaip matome sumažėjo jungtis indentifikuojantys virpesiai, ir dauguma melamine bei pentaeritrite, todėl galime teigti, jog šiuose komponentuose įvyko pakitimai.

5.19 pav. Priešgaistrinės išsipučiančios dangos „Char 21“ bandinių FT-IR spektrai, Char 21 kontrolinis – kai danga nebuvo sendinta, Char 21 I - sendinta pagal I režimą, Char 21 II – sendinta pagal II režimą

Fig. 5.19. Intumescent fire protective coating “Char 21” samples of FT-IR spectra, Char 21 benchmark - the coating was not aged Char 21 I - I aged by mode, Char 21 II - II, aged by mode

Atlikus visų sendintų abiem režimais ir nesendintų (kontrolinių) „Char 21“, „Steelguard FM 585“ ir „Steelguard FM 550“ dangų FT-IR tyrimus, smailių bangų skaičiai surašyti 5.4 lentelėje. Iš 5.4 lentelės matosi, kad smailių kiekis atspindintis jungtis, labiausiai sumažėja, kai bandiniai buvo sendinti 60 ciklų

pagal II režimą. Pavyzdžiui, smailės indentifikuojančios NH_2 grupės virpesius išnyksta ($813, 814, 1543$ ir 1547 cm^{-1}), todėl galime teigti, kad melamino junginys jau yra pakitęs, jo nebuvimas taip pat įrodo ir mažesnę susidarančios termoizoliacinės putos aukštą didelėse temperatūrose.

5.4 lentelė. Priešgaisrinių išsipučiančių dangų „Char 21“, „Steelguard FM 585“ ir „Steelguard FM 550“ bangų skaičiai

Table 5.4. Intumescent fire protective coatings “Char 21”, “Steelguard FM585” and “Steelguard FM550” frequencies characteristic

Smailės Nr.	Bangos skaičius, cm^{-1}												
	Steelguard FM-550 (kontrolinis)	Sendintas pagal I rež. Steelguard FM-550	Sendintas pagal II rež. Steelguard FM-550	Steelguard FM-585 (kontrolinis)	Sendintas pagal I rež. Steelguard FM-585	Naujos jungys	Sendintas pagal II rež. Steelguard FM-585	Naujos jungys	Char 21 (kontrolinis)	Sendintas pagal I rež. Char 21	Naujos jungys	Sendintas pagal I rež. Char 21	Naujos jungys
1	3470	3470	3470	3696	3696	Nėra	3695	Nėra	3470	3470	Nėra	x	Nėra
2	3419	3419	3419	3621	3621	Nėra	3620	3651	3419	3414	Nėra	x	Nėra
3	3323	3309	3316	3470	3470	Nėra	x	Nėra	3314	3324	Nėra	x	Nėra
4	3198	3207	3132	3420	3419	Nėra	x	Nėra	3196	3193	Nėra	3191	Nėra
5	3132	3132	3027	3199	3206	Nėra	3200	Nėra	3077	3077	Nėra	3077	Nėra
6	2958	2957	2958	3138	3137	3077	x	3076	2955	2957	Nėra	x	Nėra
7	2889	2889	2889	2955	2958	Nėra	2955	Nėra	2883	2883	Nėra	2878	Nėra
8	1725	1724	1726	2889	2883	Nėra	2889	Nėra	1737	1738	Nėra	1738	Nėra
9	1649	1650	1652	1739	1739	Nėra	1736	Nėra	1655	1664	Nėra	1673	1610
10	1548	1549	1549	1655	1658	Nėra	1675	1613	1547	1547	Nėra	x	Nėra
11	1491	1489	1491	1549	1543	Nėra	x	1500	1500	1502	Nėra	1497	Nėra
12	1464	1464	1467	1436	1436	Nėra	1444	Nėra	1435	1434	Nėra	1437	Nėra
13	1436	1436	1436	1382	1382	Nėra	1376	1333	1382	1382	Nėra	1375	Nėra
14	1383	1383	1383	1248	1249	Nėra	1249	Nėra	1247	1246	1334	1250	1334
15	1271	1271	1271	1168	1168	Nėra	1168	Nėra	1166	1168	1127	1168	1138
16	1251	1251	1250	1068	1069	Nėra	1084	Nėra	1081	1082	Nėra	1082	Nėra
17	1196	1197	1199	1020	1017	Nėra	1022	Nėra	1020	1018	Nėra	1021	972
18	1171	1171	1174	897	896	Nėra	899	Nėra	899	899	873	898	Nėra
19	1128	1127	1127	876	873	Nėra	x	Nėra	814	813	Nėra	x	Nėra
20	1072	1072	1072	814	x	Nėra	x	Nėra	803	802	Nėra	802	Nėra
21	1016	1016	1015	803	803	Nėra	802	Nėra	776	778	Nėra	779	Nėra
22	874	874	874	762	760	779	x	779	763	x	Nėra	x	Nėra
23	814	813	814	675	677	Nėra	677	Nėra	677	674	Nėra	682	Nėra
24	801	801	803	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
25	761	762	761	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
26	699	699	699	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
27	675	676	672	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Pastaba: x - bangos skaičius nenustatytas

Taip pat nustatytos naujos jungtys ($1334, 1127 \text{ cm}^{-1}$) ir kt. FT-IR mikroskopijos analizė patvirtino, kad priešgaisrinės išsipučiančios dangos nėra

labai atsparūs junginiai, o jų ilgaamžiškumas priklauso nuo panaudoto rišiklio. Šiuo atveju mažiausiai pakitimų fiksuota „Steelguard FM 550“ dangoje, kurioje yra 13% akrilstireno kopolimero be aptartų komponentų. Dangose „Char 21“ ir „Steelguard FM 585“ (polivinilacetatinės dervos pagrindu: atitinkamai 28 % ir 20 %) pakitimai sendinant gaunasi dideli. Atsižvelgiant į bangų skaičiaus pokyčius, sumažėja smailių kiekis ir atsiranda naujos smailės, charakterizuojančios naujus junginius. Tuomet pagrindinės ir lemiančios termoizoliacinės putos aukštį medžiagos, tokios, kaip pentaeritritolis, melaminas ir amonio polifosfatas, nuo kurių ir priklauso dangos efektyvumas (atsparumas ugniai), po sendinimo būna iš esmės pakitusios ar eliminuotos iš dangos.

5.4. Penktojo skyriaus išvados

1. Atlikus priešgaisrinių išsipučiančių ir kombinuotų dažų dangų SEM analizę nustatyta, kad didėjant dirbtinių sendinimo pagal I režimą ciklų skaičiui didėja paviršiaus pažeidimų kiekis ir jų įvairovė. Dominuojantys paviršiaus defektai yra: ertmės, plyšiai, įtrūkimai, atsilupimai, atsisluoksniavimai ir naujadarai – nuosėdų pavidalu. Panašūs mikrodefektai atsiranda sendinant dangas 12 mėnesių natūroje – lauko patalpoje su stogu. Nuosėdos ant dangų paviršių susidaro dėl masės ir šilumos mainų procesų, kai dažų sudėtiniai komponentai sąveikauja su vandeniu, tačiau komponentai, reguliuojantys išsipučiančių dangų susidarymą, tokie kaip amonio polifosfatas, melaminas ir pentaeritritolis, dėl blogo pasiskirstymo ar per mažo smulkumo dangose yra išplaunami iš paviršių palikdami dangose ertmes ir plyšius ir nebeatiekia savo funkcijos.
2. Terminė analizė parodė, kad priešgaisrinėse išsipučiančiose dangose dirbtinai sendintose 60 ciklų pagal I ir II režimus, palyginus su nesendintomis, masės nuostoliai ženkliai padidėja žemų temperatūrų intervale nuo 20 °C iki 600 °C ir daugiau pagal II nei I režimą. Nesendintos priešgaisrinės išsipučiančios dangos „Char 21“ DTA kreivėje ryškūs šeši endoterminiai efektai esant temperatūroms 71,7 °C, 118 °C, 185,5 °C, 230 °C, 310 °C ir 322 °C. Tapačiose dirbtinai pagal I ir II režimus sendintose dangose taip pat būdingi šeši endoterminiai efektai, tačiau skiriasi temperatūros smailių lokalizacija. Šie pokyčiai patvirtina minėtų komponentų išplovimą ar jų galimus cheminius pokyčius.
3. FT-IR mikroskopijos dūmų sudėties analizė parodė, kad kaitinant nesendintas dangas vyksta dangas formuojančių ir chemiškai pakitusių komponentų skilimas. Iš amonio polifosfato, melamino, pentaeritritolio ir jų pakitusių po sendinimo darinių dūmų sudėtyje randamos tokios dujos ar garai, kaip NH₃, CO, CO₂, H₂O.

4. FT-IR mikroskopijos cheminės sudėties analizė parodė, kad po dirbtinių sendinimo ciklų pagal I ir II režimus visais atvejais lyginant su kontroliniais bandiniais fiksuojame cheminių medžiagų pokyčius. Sendintuose bandiniuose sprendžiant pagal bangos skaičių ir smailių intensyvumą vienos naujos jungtys atsiranda, o kitos pakinta ar išnyksta. Tai rodo vieno junginių susidarymą, o kitų junginių pokyčius arba skilimą veikiant aplinkos veiksniams (temperatūros ir drėgmės svyravimams).

Bendrosios išvados

1. Atliekant vienpusį kaitinimą pagal standartą LST EN 1363-1:1999 ir GTC/GBM 2 metodą modeliuojamas sieninės laikančios konstrukcijos elgseną gaisro metu, kai ugnis veikia iš vienos pusės, o didesniu poveikiu pasižymi tūriniai metodai, kai ji yra veikiama ugnies iš visų pusių. Nustatyta, kad priešgaisrinio gipso atsparumas ugniai bandant pagal standarto LST EN 1363-1:1991 reikalavimus vienpusiu kaitinimu buvo iki 58 min, o tūriniu tik 20 min. Analogiškai, priešgaisrinė vata 30 min ir 19 min, o priešgaisrinių išsipučiančių dažų 51 min ir 15 min.
2. Įvairių rūšių priešgaisrinių išsipučiančių dažų dangų (kuriose naudojami skirtingi tirpikliai: vanduo, ksilenas, toluolas, vaitspiritas) tyrimais, kai kaitinama vienpusiai pagal GTC/GBM 2 metodiką nustatyta, kad didėjant išputintos dangos storiui tiesiškai didėja ir plieno konstrukcijos atsparumo ugniai laikas. Plieninės konstrukcijos atsparumo ugniai didėjimą, kai priešgaisrinių išsipučiančių dažų danga yra polivinilacetatinės dervos pagrindu („АгниТерм М“), pirminės dangos storio didėjimą geriausiai aprašo empirinė eksponentinė lygtis.
3. Priešgaisrinės išsipučiančios dažų dangos bandinių po 60 dirbtinių sendinimo ciklų pagal I režimą, kai kinta temperatūra ir drėgmė, bei pagal II režimą, kai papildomai naudojamas ultravioletinis švytinimas, bandant vienpusiu kaitinimu pagal standarto LST EN 1363-1:1999 reikalavimus, atsparumas

ugniai, palyginti su kontrolinių bandinių rezultatais, atitinkamai sumažėjo: „АгниТерм М“ dažų dangos polivinilacetatinės dervos pagrindu su papildoma akrilo polimerine danga (toliau – ADD) – 52,09 % ir 60,41 %; „Char 21“ dažų dangos polivinilacetatinės dervos pagrindu su ADD – 47,06 % ir 52,92 %; „Steelguard FM550“ dažų dangos akrilstireno kopolimerinės dervos pagrindu – 36,53 % ir 40,38 %; „Steelguard FM 585“ dažų dangos polivinilacetatinės dervos su ADD – 34,54 % ir 38,18 %.

4. 12 mėn. natūraliai sendintų bandinių, kaitinant tūriniu metodu pagal standarto LST EN 1363-1:1999 reikalavimus, padengtų priešgaisrinių išsipučiančių dažų dangomis polivinilacetatinės dervos pagrindu atsparumas ugniai sumažėjo atitinkamai 35,08 %, o apsaugotų papildomomis nepriešgaisrinėmis dangomis silikono dervos ir akrilo polimero dervos pagrindu atitinkamai – 8,84 % ir 15,22 %. Dažų dangos akrilstireno kopolimero dervos pagrindu atsparumas ugniai sumažėjo 27,43 %, o apsaugotų papildomomis nepriešgaisrinėmis dangomis silikono dervos ir akrilo polimero dervos atitinkamai 9,99 % ir 13,55 %. Papildomos nepriešgaisrinės dangos silikono dervos ir akrilo polimero dervos pagrindu apsaugo priešgaisrines išsipučiančias dangas nuo temperatūros ir drėgmės pokyčių, bei ultravioletinių spindulių neigiamo poveikio.

5. Pagal išvestas empirines lygtis seka, jog iš sumodeliuotų sendinimo režimų II sendinimo režimas yra agresyvesnis už I režimą, o 12 mėn. natūrinis poveikis yra silpnesnis už 60 dirbtinių sendinimo ciklų pagal I režimą. Be to didėjant dirbtinių sendinimo ciklų skaičiui pagal I režimą mažėja susidariusios termoizoliacinės putos storis ir atsparumas ugniai.

6. Bandinius padengus priešgaisrinėmis išsipučiančiomis dangomis pasiekiamas degumo klasė – B, s2, d0 ir CO₂ koncentracija svyruoja 0,2 – 0,24 % intervale, o papildoma danga padidina dangos degumą iki – D, s2, d0 ir CO₂ koncentraciją iki 0,36 %.

7. Atlikus priešgaisrinių išsipučiančių ir kombinuotų dažų dangų analizę skanuojančiu elektroniniu mikroskopu nustatyta, kad didėjant dirbtinių sendinimo pagal I režimą ciklų skaičiui daugėja ir dominuojančių paviršiaus defektų: ertmių, plyšių, įtrūkimų, atsilupimų, atsisluoksniavimų ir nuosėdų kiekis. Natūraliomis sąlygomis panašūs defektai atsiranda po 12 mėnesių. Nuosėdos ant dangų paviršių susidaro dėl masės ir šilumos mainų procesų, kai dažų sudėtiniai komponentai sąveikaujantys su vandeniu, tačiau reguliuojantys išsipučiančių dangų susidarymą, tokie kaip amonio polifosfatas, melaminas ir pentaeritritolis, dėl blogo pasiskirstymo ar per mažo smulkumo dangose yra išplaunami į paviršių ir nebeatlieka savo funkcijos.

8. Terminė analizė parodė, kad priešgaisrinėse išsipučiančiose dangose dirbtinai sendintose 60 ciklų pagal I ir II režimus, palyginus su nesendintomis, masės nuostoliai gerokai padidėja, mažiau pagal I nei pagal II režimą. Šie

pokyčiai patvirtina dangų sudėtyje esančių komponentų išplovimą, jų galimus cheminius pokyčius. FT-IR mikroskopijos dūmų sudėties analizė parodė, kad kaitinant nesendintas dangas vyksta jas formuojančių cheminių komponentų skilimas, išsiskiriant NH_3 , CO , CO_2 dujoms ir H_2O garams. Nesendintų ir sendintų pagal I ir II režimus priešgaisrinių išsipučiančių dažų dangų FT-IR cheminės sudėties analizė parodė, kad po dirbtinių sendinimo ciklų fiksuojame cheminių medžiagų pokyčius: pagal bangos skaičių ir smailių intensyvumą, vienos jungtys atsiranda, o kitos pakinta ar išnyksta, tai taip pat patvirtina dangos pokyčius.

Literatūra ir šaltiniai

Agunloye, F. F.; Staphenson, J. R.; Williams C. M. 1994. Improved intumescent flame retardant systems for polyolefins. *Proceeding of Flame Retardants '94*, 109-116 p.

Almeras, X.; Dabrowski, F.; Le Bras, M.; Delobel, R.; Bourbigot, S.; Marosi, G.; Anna, P. 2002. Using polyamide 6 as charring agent in intumescent polypropylene formulations II. Thermal degradation. *Polymer Degradation and Stability* 77: 315–323.

Andersson, A.; Lundmark, S.; H. J. Maurer, F. 2007. Evaluation and Characterization of Ammoniumpolyphosphate-Pentaerythritol-Based Systems for Intumescent Coatings. *Journal of Applied Polymer Science*, 104(2): 748–753.

ASTM E 119 – 12 Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Materials. American Society for Testing and Materials (ASTM) 1995 34 p.

Babrauskas, V.; Williamson, R. B. 1978. The historical basis of fire resistance testing, Part I, *Fire technology*, 14: 184–194.

Babrauskas, V.; Williamson, R. B. 1978. The historical basis of fire resistance testing, Part II, *Fire technology*, 14: 304–316.

Bailey, C.; Ian, K. B.; John, B.; Brian, D.; Joel, K. The behaviour of multi-storey steel framed buildings in fire. British Steel plc. Swinden Technology Center. Rotherham: 1999. 73 p.

Bayer Aktiengesellschat, 23 July 1991. *Fire protectants*. Wulf von Bonin. *United States Patent*, Patent number 5,034,056.

Balabanovich, Al. 2005. Thermal decomposition study of intumescent additives, pentaerythritol phosphate and its blend with melamine phosphate. *Thermochimica Acta*, 435(2): 188–96.

Barkauskas, V. 2001. Aktyviojo išorinio paviršiaus patvarumo aplinkos poveikiams turinys. *Statyba*. VII(1): 56–59.

Barkauskas, V., ir kt. 1977. *Statybinė fizika*. Vilnius; Mokslas. 310 p.

Barkauskas, V.; Stankevičius, V. 2000. Pastatų atitvarų šiluminė varža. Kaunas, Technologija. 289 p.

Bodzey, B.; Bocz, K.; Bárkai, Zs.; Marosi, Gy. 2011. Influence of rheological additives on char formation and fire resistance of intumescent coatings, *Polymer Degradation and Stability*, 96(3): 355–362.

Bouillette, JP. 1971. A building with water cooled structures in Marseille, *Acier/Stahl/Steel*, CBLIA, Brussels, 254–256.

Bowman, J. O.; Taylor, R. 10 January 2002. *Fire resistant material*. United States Patent Application Publication. No. US 2002/0004127 A1.

Brushlinsky, N. N.; Hall, J. R.; Sokolov, S. V.; Wagner, P. 2008. World fire statistics. CTIF International association of fire and rescue service. 542 p.

BS 476: Part 20:1987. Fire Tests on Building Materials and Structures. Part 20. Method for Determination of the Fire Resistance of Elements of Construction (General Principles) British Standards Institution., London, 1987:42 p.

Buika, G.; Getautis, V.; Martynaitis, V.; Rutkauskas, K. 2007. Organinių Junginių spektroskopija. *Vitae Litera*. 299 p.

Camino, G.; Costa, L.; Marinasso, G. 1989. Intumescent fire-retardant systems. *Polymer Degrad Stability* 23(4): 359–76.

Camino, G.; Costa, L.; Trossarelli, L. 1984. Study of the mechanism of intumescence in fire retardant polymers. Part II. Mechanism of action in polypropyleneammonium polyphosphate-pentaerythritol mixtures. *Polymer Degradation and Stability*, 7(1): 25–31.

CAN/ULC S101-07 Standard Methods of Fire Endurance Tests of Building Construction and Materials. Edition: 4th Underwriters Laboratories of Canada. 2007, 85 p.

Climatic and air pollution effects on materials and equipment. CEEES WG climatic and air pollution effects, Publication Nr. 2, 1999. 246 p.

Code of practice for the specification & on-site installation of intumescent coatings. Association for Specialist Fire Protection Technical Guidance Note 008:2008. Aldershot, United Kingdom. 2008. 47 p.

Council Directive 1999/13/EC on the limitation of emissions of volatile organic compounds due to the use of organic solvents in certain activities and installations. Official Journal L85, 22 p.

Cramer, S. M.; Friday, O. M.; White, R. H.; Sriprutkiat, G. *Mechanical properties of gypsum board at elevated temperatures*. Proceedings of the Fire and Materials 2003 Conference „Fire and Materials 2003“ Hyatt Hotel Fisherman's Wharf, San Francisco, California, USA 27–28 January 2003. 27–42.

Čekanavičius, V.; Murauskas, G. 2000. Statistika ir jos taikymai. I knyga. TEV. 240 p.

Čyras, P.; Šukys, R. 1997. Gaisrinės saugos pagrindai. Mokomoji knygelė. Vilnius: Technika, 47 p.

Darginavičienė, R.; Drungilienė, D. 2008. Slaugytojų emocinė būseną slaugant mirštančiuosius. *Sveikatos mokslai* 6(4): 2084–2089.

Delobel, Re.; Jama, C. Polimer binder for intumescent coatings. World intellectual property organization. WO 2004/061020 PCT/IB2003/006398.

Deogon, M. 1991. Intumescent fire protection compositions. World intellectual property organization. C09K 21/02, WO 91/11498.

Dimanshteyn, F. A.; Barone, R. J. 2006. Intumescent materials. World intellectual property organization. WO 2006/039275 A2.

Dodds, N.; Gibson, A.G.; Dewhurst, D.; Davies, J. M. 2000. Fire behaviour of composite laminates, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, *Composites: Part A* 31(7): 689–702.

Duquesne, S.; Delobel, R.; Le Bras, M.; Camino, G. 2002. A comparative study of the mechanism of action of ammonium polyphosphate and expandable graphite in polyurethane. *Polymer Degradation and Stability* 77: 333–44.

Duquesne, S.; Magnet, S.; Jama, C.; Delobel, R. 2004. Intumescent paints: fire protective coatings for metallic substrates. *Surface and Coatings Technology* 180 – 181: 302–307.

Duquesne, S.; Magnet, S.; Jama, C.; Delobel, R. 2005. Thermoplastic resins for thin film intumescent coatings towards a better understanding of their effect on intumescence efficiency. *Polymer Degradation and Stability*, 88: 63–69.

EN 10034:1993. *Structural steel I and H sections. Tolerances on shape and dimensions. General requirements*. 2000. 5 p.

EN 1363-1:1999. *Fire resistance tests. Part 1: General requirements*. 1999, 49 p.

ENV 13381-4:2002. *Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members – Part 4: Applied protection to steel members*. 2003, 76 p.

Fessler, R. G.; Tredinnick, B. C. 1975, Intumescent coating compositions containing crystalline melamine pyrophosphate. United States Patent 3,914,193.

- Fire design of steel structures. Corus construction and Industrial. Corus: 2007. 26 p.
- Fire Guidelines 2006. Specification and Guidelines for Testing of Passive Fire Protection for Concrete Tunnels Linings. EFNARC, 27 p.
- Fire protection for structural steel in buildings. 4th Edition. ASFP: 2007. 86 p.
- Fire resistance of Steel framed Buildings. Corus Construction & Industrial, 2006. 39 p.
- Fire resistance of steel-framed buildings. Edition 6. Corus Construction & Industrial. 2006. p. 39.
- Fires in Transport Tunnels: Report on full-scale tests, EUREKA–Project EU499. Fire-tun, Studiengesellschaft Stahlanwendung eIV. D-40213 Dusseldorf, 1995. 10 p.
- Gailius, A.; Vėjelis, S. 2009. *Termoizoliacinės medžiagos ir jų gaminiai*. Vilnius: Technika. 247 p.
- Gatti, P. L. 2005. Probability theory and mathematical statistics for engineers. London: Spon Press. 356 p.
- Gibson, A. G. 2003. The cost effective use of fibrereinforced composites offshore. Research report 039, Centre for Composite Materials Engineering University of Newcastle Upon Tyne. Health & Safety Executive, 140 p.
- Darysl, G. J.; William, A. 2005. Intumescent coating compositions. WO 2005/000975.
- GTC/GBM 2:1999. Priešgaisrinių metalo dangų termoizoliacinių savybių nustatymas. Priešgaisrinės apsaugos ir gelbėjimo departamento prie VRM Gaisrinių tyrimų centras. 2002. 10 p.
- Gu, J.; Zhang, G.; Dong, S.; Zhang, Q.; Kong, J. 2007. Study on preparation and fire-retardant mechanism analysis of intumescent flame-retardant coatings. *Surface & Coatings Technology* 201: 7835–7841
- Guoxin, L.; Guozheng, L.; Tingshu, H.; Qinli, Y.; Xuefeng, S. 2007. Effects of EG and MoSi₂ on thermal degradation of intumescent coating. *Polymer Degradation and Stability* 92(4): 569–579.
- Hairston, G.; Burns, J.; Stidham, W.; Van Voorhis, K. 2006. Intumescent flame retardant compositions. World intellectual property organization. WO 2006/017814 A1.
- Hanafin, J.; Bertrand, D. 1998, Low density, light weight intumescent coating. WO 98/12270.
- Harden, A., Velin, P. E. 2006. Intumescent Coating and Use Thereof. WO 2006/096112 A1.
- Harmathy, T. Z.; Sultan, M. A.; Mac. Laurin, J.W. 1987. Comparison of Severity of Exposure in ASTM E 119 and ISO 834 Fire Resistance Tests. *Journal of Testing and Evaluation*. JTEVA, 15(6): 371–375.

Hastings, O. H. Intumescent fire-retardant coating material. World intellectual property organization. WO 90/10668

Hill, J. E. Intumescent coating and method of manufacture. 1993, WO93/20156.

Husted, B.; Westerman, D. 2005. Building component exposure feature in Argos. DBI, Denmark, 19 p.

Ingason, H.; Lönnemark, A. *Recent achievements regarding measuring of time-heat and time-temperature development in tunnels*, Safe & Reliable Tunnels. Innovative European Achievements, First International Symposium, Prague 2004, 87–96 p.

Intumescent coatings. World intellectual property organization. WO 02/0966996 A1.

ISO 834:1975. *Fire-resistance tests – Elements of building products*. 1975, 25 p.

ISO/TR 3956 *Principles of structural fire-engineering design with special regard to the connection between real fire and the heating conditions of the standard fire-resistance test (ISO 834)*. 1973, 23 p.

Yew, M. C.; Ramli Sulong, N. H. 2012. Fire-resistive performance of intumescent flame-retardant coatings for steel. *Materials & Design*, 34: 719–724.

Jackman, P. E. Intumescent Materials – Ancient Technology, Modern Application, Part I The Technology, *Fire Engineers Journal*, May 1998 v. 58 (194) 34–38.

Jimenez, M.; Duquesne, S.; Bourbigot, S. 2006. Characterization of the performance of an intumescent fire protective coating. *Surface and Coatings Technology* 201 (4): 979–987.

John, O.; Bowman, R. T. 10 January 2002. *Fire resistant material*. United States Patent Application Publication. No. US 2002/0004127 A1.

Karlsson, B.; Quintiere, J. G. 1999. Enclosure Fire Dynamics. Dept. of Fire Safety Engineering, Lund University. 327 p.

Karpovič, Z. 2009. Lietuvoje sertifikuotų antipireninių tirpalų efektyvumo tyrimas. *Konferencija „Statybinės konstrukcijos“*. 67–72.

Karpovič, Z.; Šukys, R. 2009. Pušies medienos ir kamštinio ąžuolo pavojeingumas smilkimo metu. *Sveikatos mokslai* 19(3): 2425–2429.

Karpovič, Z.; Jaskolowski, W.; Mačiulaitis, R.; Praniauskas, V. 2010. Studies on combustibility of treated wood with fire retardant and antiseptic solutions. *Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW Forestry and Wood Technology* 71: 342–346.

Kasiulevicius, V.; Denapienė, G. 2008. Statistikos taikymas moksliniu tyrimu analizėje, *Gerontologija* 9(3): 176–180.

Kawagoe, K. 1957. Experimental fires in lightweight steel construction. Tokyo BRI, 38 p.

Khan, A.; Nebesnak, E.; De Souto, M. 2005. Intumescent coatings. World intellectual property organization. WO 2005/067470 A2.

Kodur, V. K. R. 2007. Fire Engineering of Steel Structures, *International Journal of Steel Structures*, 7(3): 153–237.

Kodur, V. K. R., 2007. Guidelines for fire resistant design of concrete-filled steel HSS columns – State-of-the-art and research needs, *International Journal of Steel Structures*, 7(3): 173–182.

Kodur, V. R.; Latour, J. C. 2005. Experimental studies on the fire resistance of hollow steel columns filled with high-strength concrete. Research Report, Institute for Research in Construction, National Research Council Canada, RR 215. 59 p.

Konstrukcijų, padengtų priešgaisrinėmis dangomis, atsparumo ugniai patikrinimo tvarkos aprašas. Priešgaisrinės apsaugos ir gelbėjimo departamento prie Vidaus reikalų ministerijos direktoriaus 2010 m. kovo 31 d. įsakymu Nr. 1–106.

Lipinskas, D.; Mačiulaitis, R. 2005. Further effort unities for development of the method for fire origin prognosis, *Journal of Civil Engineering and Management*, XI(4): 299–307.

Liu, M. T. Fire protection coating composition. 2003. WO 2004/050760 A1.

Liukaitis, J.; Kleveckas, T. 2006. Medžiagu tyrimo pagrindai. Kaunas: Technologija. 76 p.

LST EN 13381-8:2010. Bandymo metodai nustatyti konstrukcinių elementų poveikį atsparumui ugniai. 8 dalis. Plieninių elementų reaktyvioji apsauginė danga. 2010, 80 p.

LST EN 13501-2:2007+A1:2009. Fire classification of construction products and building elements – Part 2: Classification using data from fire resistance tests, excluding ventilation services. 2009, 80 p.

LST EN 1363-1:2000. Atsparumo ugniai bandymai. 1 dalis. Bendrieji reikalavimai. 2000, 49 p.

LST EN 1363-2:1999. Fire resistance tests. Part 2: Alternative and additional procedures. 1999, 16 p.

LST EN 13823:2010. Statybinių gaminių reakcijos į ugnį bandymai. Statybiniai gaminiai, išskyrus grindų dangas, kuriuos veikia vieno degančio objekto šiluma. 2010. 97 p.

LST EN 1991-1-2. Eurokodas 1. Poveikiai konstrukcijoms. 1–2 dalis. Gaisro poveikiai konstrukcijoms. 1991, 58 p.

LST EN ISO 11357-1:2010 Plastikai. Skirtuminė žvalgomoji kalorimetrija (DSC). 1 dalis. Bendrieji principai. 2010. 34 p.

LST EN ISO 11358:2001 Plastikai. Polimerų termogravimetrija (TG). Bendrieji principai. 2001. 11 p.

LST EN ISO 12944-2:2000. Dažai ir lakai. Plieninių konstrukcijų apsauga nuo korozijos apsauginėmis dažų sistemomis. 2 dalis. Aplinkos klasifikacija. 2000. 12p.

LST EN ISO 12944-5:2007. Dažai ir lakai. Plieninių konstrukcijų apsauga nuo korozijos apsauginėmis dažų sistemomis. 5 dalis. Apsauginės dažų sistemos. 2007. 31 p.

LST EN ISO 2808: 2007. Dažai ir lakai. Plėvelės storio nustatymas. 2007. 40 p.

LST ISO 5725-1+AC:2002 Matavimo metodų tikslumas (teisingumas ir glaudumas) ir įvertinimo rezultatai. 1 dalis. Bendrieji principai ir apibrėžimai. 2002. 22 p.

LST ISO 834 Fire – resistance tests – Elements of building construction. 1997. 29 p.

LST L ENV 13381-4:2003. Bandyto metodai nustatyti konstrukcinių elementų įtaką atsparumui ugniai. 4 dalis. Plieniniams elementams taikoma apsauga. 2003. 76 p.

LST L ENV 1993-1-2 Eurokodas 3. Plieninių konstrukcijų projektavimas. 1–2 dalis. Bendrosios taisyklės. Konstrukcijų gaisrinės saugos projektavimas. 1995, 64 p.

Lukošius, K.; Mačiulaitis, R. 2002. Statybinių medžiagų temperatūros laidumo koeficiento nustatymas imituoto gaisro sąlygomis. *Medžiagotyra*, 8(1): 100–104.

Mačiulaitis R. 1997. Frost Resistance and Durability of Ceramic Façade Products. Vilnius, Technika. 308 p.

Mačiulaitis, R.; Lukošius, K. 2006. Medžiagų gaisro ir sprogimo pavojaus įvertinimas. Mokomoji knyga. Vilnius: Technika. 96 p.

Martinėnas, B. 2004. Eksperimento duomenų statistinė analizė. Mokomoji knyga 2–asis pataisytas ir papildytas leidimas. Vilnius: Technika. 101 p.

McGinniss, V. D.; Dick, R. J.; Russell, R. E.; Rogers, S. D. 1999. Thermally-protective intumescent coating. World intellectual property organization. PCT/US95/009761. Patent WO 96/03854.

Miniotaitė, R. 1999. Compatibility of finishing layer and external surface of buildings' walls from the standpoint of durability. Summary of the Thesis for a doctor's degree. Kaunas, Lithuania. 47 p.

Miniotaitė, R. 2005. Destructive Factors Causing Deterioration of Silicate Paints on Building Walls. In: *Proceedings of the 7th Symposium on Building Physics in the Nordic Countries.* (2): 586–593.

Miniotaitė, R. 1998. The durability of finish layers of external walls of buildings. In *Proc. Conference on the subject of Construction and Architecture, Kaunas University of Technology, Institute of Architecture and Construction.* Lithuania, Kaunas: Technology. 248–253.

Miniotaitė, R.; Stankevičius, V. 2001. Pastatų sienų dažytų paviršių ilgaamžiškumas. Monografija. Kaunas: Technologija. 175 p.

Mitkus, S. Statybos teisės terminų žodynas. Vilnius: Eugrimas, 2006. 125 p.

- Nyderis, A.; Mačiulaitis R. 1999. Putų polistirenu apšiltintų fasado fragmentų gaisriniai bandymai. *Journal of Civil Engineering and Management*. V(5): 340–346.
- O'Brien, P.; Schofield, C. Fire & Vision Limited. Fire protection. 2000. WO 00/14167.
- Olcese, T.; Pagella, C. 1999. Vitreous fillers in intumescent coatings. *Progress in Organic Coatings* 36: 231–241.
- Parkinson, D.; Kodur, V. K. R.; Sullivan, P. 2009. Performance based design of structural steel for fire conditions – A calculation Methodology, ASCE Manual and Reports on Engineering Practice, American Society of Civil Engineers, No. 114. 136 p.
- Paukštys, V.; Stankevičius, V.; Bliūdžius, R. 2001. Lietaus ir vėjo poveikis pastatų sienų drėgminei būsenai. Kaunas, Technologija. 76 p.
- Pikutis, R. 1991. Pastatų sienos. Vilnius. 76 p.
- Ramukevičius, D. 2008. Statybos pagrindai. Mokomoji knyga. LŽŪU. Kaunas: Ardiva. 49 p.
- Roberts, T.A.; Shirvill, L. C.; Waterton, K.; Buckland, I. 2010. Fire resistance of passive fire protection coatings after long-term weathering. *Process Safety and Environmental Protection* 88: 1–19.
- Sakalauskas, V. 2003. Duomenų analizė su STATISTICA. Vilnius, Margi raštai. 236 p.
- Schaumann, P.; Kodur, V. R.; Bahr, O. 2006. Fire resistance of high-strength concrete-filled steel columns", *Proceedings, Fourth International Workshop: Structures in Fire*, 2: 837–848.
- Seigel, L. G. 1970. Designing for fire safety with exposed structural steel, *Fire Technology*, 6(4): 269–278.
- Seigel, LG. 1969. Design of Liquid filled structural members for fire resistance, *Acier/Stahl/Steel*, CBLIA, Brussels. 266–270.
- Shipp, M.; Spearpoint, M. 1995. Measurements of the Severity of Fires Involving Private Motor Vehicles, *Fire and Materials*, 19: 143–151.
- Stankevičius, V. 1997. Pastatų atitvarų drėgmėnė būseną ir atsparumas šalčiui. Monografija. Kaunas: Technologija. 142 p.
- Steinert, C. Smoke and Heat Production in Tunnel Fires , *Proceedings of the International Conference on Fires in Tunnels*, held on October 10–11th, 1994 at the Swedish National Testing and Research Institute (SP), Borås, Sweden. 123–137.
- Stoye, D.; Freitag, W. 1998. Paints, coatings and solvents. 414 p.
- STR 2.01.01(2):1999 Esminiai statinio reikalavimai. Gaisrinė sauga. Vilnius: Aplinkos ministerija, 2000. 45 p.
- Ščemeliovas, V. Lietuvos TSR orų metinė eiga, LTSR MA mokslo darbai. I t., V. 1962.

Šukys, R.; Karpovič, Z. 2010. Research on the toxicity of pine timber treated and non-treated with fire retardants. *The 10th international conference „Modern Buildings Materials, Structures and Techniques“*. Vilnius: Technika, 2: 1306–1313.

Taylor, H. F. W., 1990. *Cement Chemistry*, Academic Press. 491 p.

Tall Buildings – Performance of Passive Fire Protection in Extreme Loading Events – An Initial Scoping Study. Department for Communities and Local Government. Crown, 2009. 65 p.

Trebilcock, P.; Lawson, R. M. 2004. Architectural design in steel. Taylor & Francis. 225 p.

UL 263. 2003. Fire Tests of Building Construction and Materials. Thirteenth Edition. American National Standards Institute. 40 p.

Vassart, O.; Cajot, L. G.; Brasseur, M. 2005. *Thermal and mechanical actions. Part 1*. VGTU, Vilnius. 34 p.

Wainwright, R.; Evans, K. A. Intumescent compositions. World intellectual property organization. WO 94/02545.

Wang, D.; Liu, Y.; Wang, Y. C.; Artiles, P.; Hull, T. R.; Price, D. 2007. Fire retardancy of a reactively extruded intumescent flame retardant polyethylene system enhanced by metal chelates. *Polymer Degradation and Stability* 92: 1592–1598

Wang, G.; Yang, J. 2012. Influences of molecular weight of epoxy binder on fire protection of waterborne intumescent fire resistive coating. *Surface and Coatings Technology*, 206(8–9): 2146–2151.

Wang, Z.; Han, E.; Liu, F.; Ke, W. 2010. Fire and Corrosion Resistances of Intumescent Nano-coating Containing Nano-SiO₂ in Salt Spray Condition. *J. Mater. Sci. Technol.* 26(1): 75–81.

Wastney, C. 2002. Performance of unprotected steel and composite steel frames exposed to fire. New Zealand: Department of Civil Engineering University of Canterbury Christchurch. 171 p.

Witte, H. 1981. Water-cooled steel constructions Final report. Study. Project 86. Germany. 192 p.

Zhenyu, W.; Enhou, H.; Wei, K. 2006. An investigation into fire protection and water resistance of intumescent nano-coatings. *Surface and coatings technology* 201(3–4): 1528–1535.

Zhou, S.; Song, L.; Wang, Z.; Hu, Y.; Xing, W. 2008. Flame retardation and char formation mechanism of intumescent flame retarded polypropylene composites containing melamine phosphate and pentaerythritol phosphate. *Polymer Degradation and Stability* (93): 1799–1806.

Žukas, A.; Mačiulaitis, R.; Šukys, R. 2007. Statybos produktų panaudojimo gaisrinė sauga. Vilnius: Technika. 111 p.

Астапенко, В. М.; Кошмаров, Ю. А.; Молчадский, И. С.; Шевляков, А. Н. 1988. Термогазодинамика пожаров в помещениях. Москва: Стройиздат. 448 с.

Барамов, А. Н.; Пчелинцев, В. А. 1997. Пожарная безопасность. Москва. 169 с.

Бартелеми, Б.; Крюпа, Ж. 1985. Огнестойкость строительных конструкций. Москва: Стройиздат. 213 с.

Большой энциклопедический словарь. Химия. Гл. ред. Ил. Кнунянц, 2000. Науч. издат. „Большая Российская энциклопедия“, Москва. 792 с.

Бушев, В. П.; Пчелинцев, В. А.; Федоренко, В. С.; Яковлев, А. И. 1970. Огнестойкость зданий. Москва: Стройиздат. 281 с.

Горлов, Ю. П.; Меркин, А. П.; Устенко, А. А. 1980. Технология теплоизоляционных материалов. Москва: Стройиздат. 399 с.

Драйздеил, Д. 1990. Введение в динамику пожаров. Москва: Стройиздат. 423 с.

Иванов, В. П.; Касатов, Б. К.; Красавина, Т. Н. 1974. Термический анализ минералов и горных пород,- Л.: Недра. 399 с.

Комиссаров, Е. П.; Пчелинцев, В. А.; Ройтман, М. Я. 1970. Пожарная профилактика. Часть 1 – пожарная профилактика в строительстве. Москва: СИ. 430 с.

Машляковский, Л. Н.; Лыков, А. Д.; Репкин, В. Ю. 1989. Органические покрытие пониженной горючести. Ленинград: Химия. 184 с.

Хлевчук, В. Р.; Артыкпаев, Е. Т. 1973. Огнезащита металлических конструкций зданий. Москва: Стройиздат. 97 с.

Чешко, И. Д. 2002. *Технический основы расследования пожаров. Методическое пособие.* Москва: ВНИИПО. 329 с.

Чешко, И. Д.; Галишев, М. А.; Шарапов, С. В.; Кривых, Н. Н. 2002. *Техническое обеспечение расследования поджогов, совершенных с применением инициаторов горения: Учебно-методическое пособие.* Москва: ВНИИПО. 120 с.

Autoriaus publikacijų disertacijos tema sąrašas

Straipsniai recenzuojamuose mokslo žurnaluose

Grigonis, M.; Mačiulaitis, R.; Lipinskas, D. 2011. Fire resistance tests of various fire protective coatings, *Materials Science [Medžiagotyra]* 17(1): 93–98. (Thomson ISI Web of Science).

Podolski, D.; Grigonis, M. 2011. Metalinių konstrukcijų, apsaugotų įvairiomis priešgaisrinėmis medžiagomis, atsparumo ugniai įvertinimas skirtingomis bandymų sąlygomis, *Mokslas – Lietuvos ateitis*. Vilnius: Technika, 3(2): 91–96. ISSN 2029-2341 (Index Copernicus).

Grigonis, M.; Praniauskas, V.; Mačiulaitis, R.; Lipinskas, D.; Jocius, V.; Kuodis, Ž. 2011. Priešgaisrinių dangų skirtų plieninių ir medinių konstrukcijų apsaugai nuo ugnies nuodingų dūmų susidarymo tyrimai, *Sveikatos mokslai*, 21(5): 60–65. ISSN 1392-6373 (Index Copernicus).

Grigonis, M.; Praniauskas, V.; Mačiulaitis, R. 2012. Ageing of Fire Coatings, *International Review of Civil Engineering*, 3 (1): 72–78. ISSN 2036-9913 (Index Copernicus).

Straipsniai kituose leidiniuose

Grigonis, M.; Lipinskas, D.; Mačiulaitis, R.; Jocius, V. 2010. Fire resistance and reaction to fire tests of buildings constructions, *The 10th International Conference "Modern building materials, structures and techniques" held of May 19–21, 2010*. Vilnius: Technika, 1218–1224. ISBN 978-9955-28-593-9.

Grigonis, M.; Demidova-Buizininė, I. 2008. Priešgaisrinių dangų efektyvumą įtakojančios komponentai, iš *11-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“ pranešimų medžiaga*. Vilnius: Technika, 38–45.

Grigonis, M. 2008. Priešgaisrinių dangų atsparumo ugniai bandymų metodikų analizė, iš *11-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“ pranešimų medžiaga*. Vilnius: Technika, 47–55.

Priedas. Gaisrinio bandymo metodikos

GAISRINIO BANDYMO METODIKA**GTC/GBM 21:2011**

2011 gruodis

Raktiniai žodžiai: priešgaisrinės dangos, terminė analizė, masės nuostolis.

**Statybos produktų ir kitų medžiagų identifikavimas terminės
analizės metodais**

Visą metodiką arba jo dalis jokiais formomis ir priemonėmis (elektroninėmis, mechaninėmis, įskaitant fotokopijavimą ir mikrofilmavimą) negalima dauginti, perspausdinti ar platinti be raštiško Gaisrinių tyrimų centro leidimo.

<p>PRIEŠGAISRINĖS APSAUGOS IR GELBĖJIMO DEPARTAMENTO PRIE VRM GAISRINIŲ TYRIMŲ CENTRAS Švitrigailos g. 18, LT-2600 Vilnius Tel. (8 5) 249 1313, faks. (8 5) 233 9878, el. paštas gtc@vpgt.lt interneto tinklalapis www.gtcentras.lt</p>	<p>Nuorodinis žymuo: GTC/GBM 21:2011 lt</p>
---	---	--

GAISRINIO BANDYMO METODIKA

GTC/GBM-22:2011

2011 gruodis

Raktiniai žodžiai: priešgaisrinės išsipučiančios dangos, priežiūra, patikra, atsparumas ugniai.

**Priešgaisrinių išsipučiančių dangų parinkimo, padengimo,
priežiūros rekomendacijos ir kokybės įvertinimo metodiniai
nurodymai**

Visą metodiką arba jo dalis jokiais formomis ir priemonėmis (elektroninėmis, mechaninėmis, įskaitant fotokopijavimą ir mikrofilmavimą) negalima dauginti, perspausdinti ar platinti be raštinio Gaisrinių tyrimų centro leidimo.

<p>PRIEŠGAISRINĖS APSAUGOS IR GELBĖJIMO DEPARTAMENTO PRIE VRM GAISRINIŲ TYRIMŲ CENTRAS Švitrigailos g. 18, LT-2600 Vilnius Tel. (8 5) 249 1313, faks. (8 5) 233 9878, el. paštas gtc@vpgt.lt interneto tinklalapis www.gtcentras.lt</p>	<p>Nuorodinis žymuo: GTC/GBM- 22:2011 lt</p>
---	---	--

GTC/GBM 21:2011 metodika reglamentuoja statybos produktų (priešgaisrinių išsipučiančių dangų, antipirenais impregnuotų gaminių) ir ne statybos produktų (plastmasių, ir kt. polimerinių gaminių) terminų charakteristikų įvertinimą ir jo tapatumo nustatymą. Ši metodika susideda iš 21 puslapio ir ją sudaro:

- pratarinė;
- turinys;
- taikymo sritis;
- terminai ir apibrėžimai;
- identifikavimo metodai;
- bandinių paruošimas;
- bandymo įranga;
- bandymo eiga;
- terminės analizės charakteristikos;
- tyrimų rezultatų apdorojimas;
- priedas A. Terminės analizės bandymų protokolai;
- priedas B. Identifikavimui naudojamam prietaisui keliami reikalavimai;
- priedas B. Terminės analizės charakteristikų nustatymo schema.

GTC/GBM-22:2011 metodinėje rekomendacijoje pateikiamos rekomendacijos, kaip statybvietėse turi būti naudojamos priešgaisrinės išsipučiančios dangos, plieninių konstrukcijų dengimo šiomis medžiagomis ypatumai, dangų suderinamumo principai, darbų eiga, jų kokybės įvertinimas, taip pat šių dangų priežiūra bei remontas. Ši metodika taikytina, kadangi dėl naudojamuose pastatuose vykusio gaisro gali sutrumpėti jų eksploatavimo laikas, yra gyvybiškai svarbu, kad visos gaisrinės saugos priemonės būtų įrengtos taip, kad garantuotų veikimo efektyvumą ir užtikrintų reikiamą veikimą gaisro atveju. Šiose rekomendacijose nagrinėjamas visas priešgaisrinės apsaugos procesas, kurio metu naudojamos priešgaisrinės išsipučiančios dengimo medžiagos, tačiau svarbiausias rekomendacijų tikslas – sukurti priešgaisrinių išsipučiančių dengimo medžiagų specifikacijų rengimo, padengimo ir kontrolės statybvietėse procedūras. Šios procedūros ne tik užtikrina, kad statiniui būtų suteiktas reikiamas priešgaisrinės apsaugos lygis, pagal jas taip pat turėtų būti pateikta įrodymų, kad dažymo darbai buvo atlikti teisingai. Ją sudaro 43 puslapiai ir ji susideda iš šių pagrindinių dalių:

- įvadas;
- rekomendacijos priešgaisrinių išsipučiančių dengimo medžiagų specifikacijų rengėjams;
- padengimo priešgaisrine išsipučiančia dengimo medžiaga statybvietėje rekomendacijos;

- padengimo darbų atlikimo statybvietėje kontrolė;
- įrašai ir ataskaitos;
- priedai.

Pastaba: Su metodikomis galima susipažinti Priešgaisrinės apsaugos ir gelbėjimo departamento prie Vidaus reikalų ministerijos Gaisrinių tyrimų centre.

Mindaugas GRIGONIS

PLIENINIŲ KONSTRUKCIJŲ PRIEŠGAISRINIŲ DANGŲ
ATSPARUMO UGNIAI TYRIMAI

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai, Medžiagų inžinerija (08T)

Mindaugas GRIGONIS

FIRE RESISTANCE RESEARCHES OF FIRE PROTECTIVE
COATINGS FOR STEEL CONSTRUCTIONS

Doctoral Dissertation

Technological Sciences,

MATERIALS ENGINEERING (08T)

2012 11 13. 13,75 sp. l. Tiražas 20 egz.
Vilniaus Gedimino technikos universiteto
leidykla „Technika“,
Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius,
<http://leidykla.vgtu.lt>
Spausdino UAB „Ciklonas“
J. Jasinskio g. 15, 01111 Vilnius