

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Jelena ŠKAMAT

VIBRACINIO APDOROJIMO POVEIKIS
PURKŠTŲJŲ NIKELIO PAGRINDO DANGŲ
STRUKTŪRAI IR SAVYBĖMS

DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,
MEDŽIAGŲ INŽINERIJA (08T)



LEIDYKLA
Vilnius TECHNIKA 2013

Disertacija rengta 2008–2013 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.

Mokslinis vadovas

prof. habil. dr. Algirdas Vaclovas VALIULIS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, medžiagų inžinerija – 08T).

VGTU leidyklos TECHNIKA 2175-M mokslo literatūros knyga
<http://leidykla.vgtu.lt>

ISBN 978-609-457-576-1

© VGTU leidykla TECHNIKA, 2013

© Jelena Škamat, 2013

jelena.skamat@vgtu.lt

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Jelena ŠKAMAT

EFFECT OF VIBRATORY TREATMENT
ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES
OF NICKEL BASED THERMALLY SPRAYED
COATINGS

DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,
MATERIALS ENGINEERING (08T)



LEIDYKLA
Vilnius TECHNIKA 2013

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2008–2013.

Scientific Supervisor

Prof Dr Habil Algirdas Vaclovas VALIULIS (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Materials Engineering – 08T).

Reziumė

Disertacijoje nagrinėjamas vibracinio apdorojimo poveikis terminio purškimo dangų struktūrai ir savybėms. Eksperimentiniai tyrimai atliekami su apsauginėmis kompleksinių savybių nikelio pagrindo dangomis, kurios gaminamos taikant dviejų pakopų technologiją – miltelių terminį purškimą ir užpurkšto sluoksnio perlydymą. Perlydymo metu susiformuojanti struktūra lemia gaunamų dangų eksploatacines savybes. Šio tipo dangų savybėms ir kokybei gerinti taikomos struktūros optimizavimo ir modifikavimo priemonės. Specialių metodų, tokių kaip vibracinis apdorojimas, taikymas struktūrai kryptingai veikti kristalizacijos metu dar nepakankamai ištirtas. Disertacijos tikslas – nustatyti, kokią poveikį gaunamų dangų struktūrai ir savybėms gali turėti perlydymo stadijoje taikomas vibracinis apdorojimas ir kokia yra vibracinio apdorojimo parametrų (krypties, dažnio, amplitudės) svarba.

Darbe sprendžiami šie pagrindiniai uždaviniai: taikant šiuolaikinius metodus ištirti dangų mikrostruktūrą ir savybes po vibracinio perlydymo; įvertinti dangų struktūrinius pokyčius ir nustatyti dangų kokybinių charakteristikų priklausomybes nuo vibracinio apdorojimo parametrų.

Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai, rezultatų apibendrinimas, naudotos literatūros ir autoriaus publikacijų disertacijos tema sąrašai ir trys priedai.

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

Pirmajame skyriuje apžvelgiamos terminio purškimo ir vibracinio apdorojimo technologijos, analizuojama įvairių veiksnių įtaka Ni pagrindo dangų sandarai ir galimybė pritaikyti vibracinį apdorojimą termiškai purkštų dangų perlydymo metu. Skyriaus pabaigoje formuluojamos išvados ir tikslinami disertacijos uždaviniai. Antrajame skyriuje pateikiama vibracinio perlydymo eksperimentinių tyrimų metodika, aprašomos tyrimui naudojamos medžiagos ir įrenginiai, pateikiami purškimui naudojamų miltelių tyrimų rezultatai ir darbe taikomi medžiagų ir jų savybių tyrimo metodai. Trečiajame skyriuje pateikiami ir analizuojami nikelio pagrindo dangų, perlydytų taikant vibracinį apdorojimą, tyrimų rezultatai.

Disertacijos medžiaga pristatyta 5 moksliniuose straipsniuose: du iš jų – ISI Web of Science duomenų bazės leidiniuose. Tyrimų rezultatai taip pat paskelbti 8 mokslinėse konferencijose Lietuvoje ir užsienyje.

Abstract

This dissertation presents the research on influences of a vibratory treatment on the structure and properties of thermally sprayed coatings. The research mainly concentrates on protective multifunction Ni-based coatings, which are produced by a two-step technological process where the powder is first deposited by a thermal spray and further the as-sprayed layer is remelted. Such sequence determines the final microstructure of the coatings after remelting. The coating features are largely determined by the obtained microstructure, thus an introduction of optimizations and modification of structure may lead to a significant improvement of the coating performance and quality. The use of specific structure affecting methods, such as vibratory treatment, during the solidification has not been studied adequately in the field of thermal spray technology. Therefore, the main objective of the presented work to establish what kind of effects may be obtained by the application of vibratory treatment during remelting of as-sprayed coatings and, also, to estimate the actual role of each of vibrational parameters.

The final objective has been reached by solving such major tasks as the analysis of the obtained coatings microstructure and their properties with use of advanced materials research methods; the establishing of the main changes, produced by vibratory treatment in alloy structure, and further determining the dependences between the vibrations parameters and coatings properties.

The dissertation consists of four parts which include Introduction, 3 chapters, Conclusions, References, and 3 Annexes.

The introduction reveals the investigation problem, the object of research and also describes the objective and the tasks of the paper, the research methodology, the scientific novelty, the practical significance of the results examined in the paper and defended the statements. The introduction is finalized by presenting the author's publications in the field of the dissertation, offering the material of the provided presentations in conferences and defining dissertation structure.

Chapter 1 includes review of thermal spray technology and vibratory treatment. The influence of different factors on the formation of reusable coatings is discussed and the possibility of the vibratory treatment application during coatings remelting is analysed. Chapter 2 describes the methodology of vibrational remelting experiments, materials and equipment used for experiment, presents results of analysis of spraying powders and describes research methods used in dissertation. Chapter 3 includes the results of the investigations of coatings, remelted under vibratory treatment, and results discussions.

5 articles on the subject of the discussed dissertation have been published: two of them in Thomson ISI database. The results of research have been presented in 8 conferences at national and international level.

Žymėjimai

Simboliai

A_{NV} – nevibruota A danga

A_{200_25} – A danga, vibruota 200 Hz dažniu ir 25 μm amplitude

B_{NV} – nevibruota B danga

B_{200_25} – B danga, vibruota 200 Hz dažniu ir 25 μm amplitude

G – temperatūros gradientas;

HK – kietumas pagal *Knopq*;

HK(L) – kietumas pagal *Knopq*, išmatuotas lygiagrečiai substratui;

HK(S) – kietumas pagal *Knopq*, išmatuotas statmenai substratui;

HK 0,01 – kietumas pagal *Knopq*, esant 0,01 kg apkrovai ir 10 s išlaikymui, HK;

HV – kietumas pagal *Vickersq*;

HV 0,01 – kietumas pagal *Vickersq*, esant 0,01 kg apkrovai ir 10 s išlaikymui, HV;

n – imties dydis;

n_c – dilimo ciklą skaičius;

R^2 – determinacijos koeficientas;

Ra – paviršiaus šiurkščio parametras, vidutinis aritmetinis profilio nuokrypis, μm ;

$\bar{x}$ – imties vidurkis;

V – kristalizacijos greitis;

Δm – dangos svorio praradimas dilimo bandymo metu, $\text{g}\cdot\text{mm}^{-2}$;

Δt – dilimo bandymo metu pašalinto dangos sluoksnio storis, μm ;

σ – standartinis nuokrypis.

Santrumpos

ATVP – apvirinimas tiesioginio veikimo plazma (*angl. plasma transferred arc welding*);

BSE – atspindėti elektronai (*angl. backscattered electrons*);

DTA – diferencinė terminė analizė;

EDS – energijos dispersijos spektrometras;

GVK – grūdelių vidutinis kiekis;

GPLL – galingas puslaidininkinis lazeris (*angl. high power diode laser*);

HVAF – didelio greičio orinis purškimas (*angl. High-Velocity-Air-Fuel*);

HVOF – didelio greičio deguoninis purškimas (*angl. High-Velocity-Oxygen-Fuel*);

KCP gardelė – kubinė centruoto paviršiaus gardelė;

LD – lazerinis dengimas;

LP – liepsninis purškimas;

PL – perlydymas liepsna;

PLz – perlydymas lazeriu (*angl. laser fusing*);

PP – plazminis purškimas;

PPO – plazminis purškimas ore (*angl. air plasma spraying*);

RMA – rentgeno mikroanalizė;

SEM – nuskaitančioji elektroninė mikroskopija (*angl. scanning electron microscopy*);

TPS – terminio poveikio sritis;

TVP – tiesioginio veikimo plazma (*angl. plasma transferred arc*);

WDS – bangos ilgio dispersijos spektrometras (*angl. wavelength dispersive spectrometer*);

XRD – rentgeno spindulių difrakcija (*angl. X-ray diffraction*).

Turinys

IVADAS	1
Problemos formulavimas.....	1
Darbo aktualumas.....	2
Tyrimų objektas.....	3
Darbo tikslas.....	3
Darbo uždaviniai	3
Tyrimų metodika	3
Darbo mokslinis naujumas	4
Darbo rezultatų praktinė reikšmė	4
Ginamieji teiginiai	5
Darbo rezultatų aprobavimas.....	5
Disertacijos struktūra.....	5
 1. TERMINIO PURŠKIMO TECHNOLOGIJOS. VIBRACINIS APDOROJIMAS	
MEDŽIAGŲ INŽINERIJOJE	7
1.1. Terminio purškimo technologijos.....	7
1.1.1. Purškiamųjų dangų formavimo ir struktūros ypatumai	9
1.1.2. Terminio purškimo raida	11
1.1.3. Terminis purškimas su perlydymu	13
1.1.4. Purškiamieji perlydomieji lydiniai	14
1.1.5. Purškiamieji perlydomieji nikelio lydiniai.....	15
1.1.6. Perlydomųjų nikelio pagrindo dangų sandara	17

1.1.7. Įvairių veiksmų poveikis perlydomųjų nikelio pagrindo dangų savybėms ..	17
1.2. Vibracinis apdorojimas medžiagų inžinerijoje	19
1.3. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas	24
2. UŽPURKŠTŲ NIKELINIŲ DANGŲ VIBRACINIO PERLYDYMŲ METODIKA, DARBE TAIKOMI TYRIMO METODAI IR MEDŽIAGOS	25
2.1. Tyrimams naudotos medžiagos	26
2.2. Purškimas ir vibracinio perlydymo bandymai	32
2.3. Darbe taikomi tyrimo metodai	37
2.3.1. Optinė mikroskopija	37
2.3.2. Nuskaitančioji elektroninė mikroskopija ir rentgeno mikroanalizė	38
2.3.3. Rentgeno spindulių difrakcijos analizė	39
2.3.4. Kietumo ir mikrokietumo matavimai	39
2.3.5. Šiurkščio matavimai	40
2.3.6. Dilimo bandymai	40
2.3.7. Korozinio atsparumo bandymai	41
2.4. Antrojo skyriaus išvados	41
3. VIBRACIJŲ POVEIKIO PERLYDOMŲJŲ NIKELIO PAGRINDO DANGŲ STRUKTŪRAI IR SAVYBĖMS TYRIMAI	43
3.1. Vibracijų poveikis A tipo dangų sandarai ir savybėms	43
3.1.1. Vibracijų poveikis perlydytų A dangų fazinei sudėčiai	43
3.1.2. Užpurkštų A dangų mikrostruktūra	45
3.1.3. Perlydytų A dangų mikrostruktūra	47
3.1.4. Vibracijų poveikis perlydytų A dangų mikrostruktūrai	51
3.1.5. Vibracijų poveikis perlydytų A dangų kietumui ir mikrokietumui	58
3.1.6. Vibracijų poveikis perlydytų A dangų nusidėvėjimo atsparumui	62
3.2. Vibracijų poveikis B dangų sandarai ir savybėms	64
3.2.1. Vibracijų poveikis perlydytų B dangų fazinei sudėčiai	64
3.2.2. Perlydytų B dangų mikrostruktūra	66
3.2.3. Vibracijų poveikis perlydytų B dangų mikrostruktūrai	71
3.2.4. Vibracijų poveikis perlydytų B dangų mikrokietumui	73
3.2.5. Vibracijų poveikis perlydytų B dangų koroziniam atsparumui	76
3.3. Vibracijų poveikis perlydytų A ir B dangų paviršiaus šiurkščiui	78
3.4. Trečiojo skyriaus išvados	80
BENDROSIOS IŠVADOS	83
LITERATŪRA IR ŠALTINIAI	85
AUTORIAUS MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS	93
PRIEDAI	95
A priedas. Fazės, susidaranti perlydomuosiuose Ni pagrindo lydinuose	95
B priedas. Purškiamų miltelių rentgeno mikroanalizės rezultatai	98
C priedas. Perlydytų dangų difrakcinės kreivės lyginamajai analizei	99

Contents

INTRODUCTION	1
The Investigated Problem	1
Importance of the Thesis	2
The Object of Research	3
The Goal of the Thesis	3
The Tasks of the Thesis	3
Research Methodology	4
Importance of Scientific Novelty	4
Practical Significance of Achieved Results	5
The Defended Statements	5
Approval of the Results	5
Dissertation Structure	6
1. THE OVERVIEW ON THERMAL SPRAY TECHNOLOGY AND VIBRATORY TREATMENT IN MATERIALS ENGINEERING	7
1.1. Thermal Spray Technology	7
1.1.1. The Peculiarities of the Formation of Thermally Sprayed Coatings and Their Structure.....	9
1.1.2. The Development of Thermal Spraying.....	11
1.1.3. The Process of Thermal Spraying and Remelting	14
1.1.4. Refusable Alloys for Spraying	14
1.1.5. Refusable Ni-based Alloys for Spraying	15
1.1.6. The Structure of Refusable Ni-based Coatings	17
1.1.7. The Impact of Various Factors on the Properties of Refusable Ni-based Coatings	18

1.2. Vibratory Treatment in Materials Engineering.....	20
1.3. Conclusions for Chapter 1 and Allocating Tasks for the Dissertation.....	24
2. THE METHODOLOGY OF THE VIBRATIONAL REFUSING OF THE AS-SPRAYED NI-BASED COATINGS, USED RESEARCH METHODS AND MATERIALS	25
2.1. Materials Used for Experiments.....	25
2.2. Spraying and Experiments of Vibrational Refusing	32
2.3. Used Research Methods	37
2.3.1. Optical Microscopy	37
2.3.2. Scanning Electron Microscopy and X-ray Microanalysis.....	38
2.3.3. X-ray Diffraction Analysis	39
2.3.4. Hardness and Microhardness Measurements.....	39
2.3.5. Roughness Measurements.....	40
2.3.6. Wear Tests	40
2.3.7. Corrosion Resistance Tests	41
2.4. Conclusions for Chapter 2	41
3. THE INVESTIGATION OF THE VIBRATIONS INFLUENCE ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF REFUSIBLE NI-BASED COATINGS.....	43
3.1. The Influence of Vibrations on the Structure and Properties of A-type Coatings	43
3.1.1. Vibrations Influence on the Phase Composition of A-type Coatings	43
3.1.2. The Microstructure of As-sprayed A-type Coatings.....	45
3.1.3. The Microstructure of A-type Coatings After Remelting	47
3.1.4. Vibrations Influence on the Microstructure of A-type Coatings	51
3.1.5. Vibrations Influence on the Hardness and Microhardness of Refused A-type Coatings	58
3.1.6. Vibrations Influence on Wear Resistance of Refused A Coatings.....	62
3.2. The Influence of Vibrations on the Structure and Properties of B-type Coatings	64
3.2.1. Vibrations Influence on the Phase Composition of B Coatings.....	64
3.2.2. The Microstructure of B-type Coatings After Remelting.....	66
3.2.3. Vibrations Influence on the Microstructure of B-type Coatings.....	71
3.2.4. Vibrations Influence on Microhardness of Refused B Coatings.....	74
3.2.5. Vibrations Influence on Corrosion Resistance of B-type Coatings	77
3.3. Vibrations Influence on A-type and B-type Coatings Surface Roughness	79
3.4. Conclusions for Chapter 3	81
GENERAL CONCLUSIONS	83
REFERENCES	85
THE LIST OF AUTHOR'S PUBLICATIONS ON THE TOPIC OF DISSERTATION	93
ANNEXES.....	95
Annex A. Phases in Refusable Ni-based Alloys	95
Annex B. The Results of X-ray Analysis of Spraying Powders.	98
Annex C. X-ray Diffraction Patterns of Refused Coatings for Comparative Analysis	99

Įvadas

Problemos formulavimas

Dangų technologijos yra viena iš svarbių sričių medžiagų inžinerijoje. Sparčiai besivystanti pramonė kelia vis didesnius reikalavimus konstrukcinėms medžiagoms, dažnai dirbančioms korozijos, aukštatemperatūros oksidacijos, įvairių trinties ir dilimo rūšių sąlygomis. Apsauginių sluoksnių formavimas yra vienas iš veiksmingiausių metodų apsaugoti detalių paviršius nuo kenksmingų aplinkos veiksnių, sutaupyti brangiai kainuojančius metalus, sumažinti remonto išlaidas, gerokai padidinti gaminių darbinį resursą.

Yra žinoma ir taikoma daug įvairių paviršių dengimo būdų. Atskirą grupę sudaro terminio purškimo technologijos. Šiuo metu terminis purškimas yra labai išsivysčiusi pasaulio ekonomikos šaka su metine apyvarta apie 5 mlrd. JAV dolerių (Kopošov 2010). Terminį purškimą sudaro apie 10 savarankiškų metodų, daugelis iš kurių plačiai taikomas įvairiausiose pramonės srityse.

Gaunamų dangų eksploatacinės savybės didele dalimi priklauso nuo susidarinės struktūros. Todėl struktūros optimizavimas yra viena iš terminio purškimo technologijų vystymo krypčių. Struktūrai turi įtakos purškiamos medžiagos cheminė sudėtis, pasirinktas purškimo būdas ir jo parametrai ir kiti veiksniai. Taikant vienus metodus gaunamos porėtos sluoksninės anizotropinės struktūros, taikant kitus – gaunami monolitiniai sluoksniai su struktūra, artima lieto metalo

struktūrai. Pastaruoju atveju besikeičiantys proceso parametrai ypač turi įtakos tiek fazinei, tiek struktūrinei gaunamų dangų sudėčiai. Toks kristalizacijos proceso kinetikos jautris rodo, kad dangų struktūra gali būti kontroliuojama, kryptingai veikiant jos susidarymą. Specialūs kristalizacijos procesą kontroliuojantys metodai yra gerai žinomi ir taikomi metalurgijoje. Veikiant besikristalizuojančių metalų lydalus magnetinio lauko impulsais, ultragarsu, žemo dažnio vibracijomis, įvedant inokuliatorius ir modifikatorius bei taikant kitus specialius metodus gaunami geresnės struktūros ir savybių lydiniai, metalų ruošiniai ir liejiniai. Vibracinis apdorojimas taip pat sėkmingai naudojamas kaip efektyvi priemonė struktūrai ir savybėms gerinti ir vidiniams įtempiams mažinti. Duomenų apie vibracinio apdorojimo taikymą terminio purškimo technologijose labai mažai ir tai neleidžia spręsti apie jų taikymo naudingumą.

Darbo aktualumas

Darbe tiriamos nikelio pagrindo purkštosios perlydomosios dangos, kurios plačiausiai taikomos chemijos, naftos perdirbimo, stiklo ir kitose pramonės šakose siekiant padidinti paviršių atsparumą dilimui esant korozinei terpei ir aukštatemperatūrei oksidacijai. Šioms dangoms pagaminti taikomas dviejų pakopų procesas: miltelių užpurškimas ant paruošto substrato ir užpurkštos dangos perlydymas. Perlydyti dangas galima įvairiais metodais. Labiausiai paplitęs ekonomiškai ir universalus liepsninis perlydymas. Dėl didelio proceso našumo jis ypač tinkamas didelių matmenų dengiamiems paviršiams, pvz. naftos gręžinių gręžimo įrenginiuose, žemės ūkio technikoje ir pan.

Perlydant užpurkštą dangą medžiaga išslydoma, o aušimo metu susidaro kristalizacijos užuomazgos, vyksta lydinio dezoksidacija, degazacija ir sparti kristalizacija. Šie veiksniai lemia susidarančios dangos struktūrą ir savybes. Antikorozinės dangos savybės užtikrina gausiai legiruota chromu nikelio pagrindo matrica. Mechaninės savybės labiau priklauso nuo kristalizacijos metu susidarančių kietųjų tarpų rūšies ir kiekio. Nikelio dangų kokybė gerinama optimizuojant ir modifikuojant struktūrą. Tai pasiekama dviem pagrindiniais būdais: didinant kietųjų tarpų kiekį dangos sluoksnyje ir formuojant smulkesnę mikrostruktūrą. Daugeliu tyrimų įrodyta, kad vibracijų taikymas lydalų kristalizacijos metu leidžia homogenizuoti ir susmulkinti liejamų gaminių struktūrą, sumažinti porų ir kitų defektų kiekį, tuo pačiu pagerinti mechanines charakteristikas ir specialiąsias savybes, todėl šį būdą tikslinga pritaikyti formuojant perlydomąsias apsaugines dangas.

Šiuo metu trūksta duomenų apie vibracijų poveikį perlydomajai dangai jos kristalizacijos metu, todėl šiame darbe siekiama ištirti žemo dažnio vibracinio apdorojimo poveikį perlydomųjų Ni pagrindo dangų struktūrai ir savybėms.

Tyrimų objektas

Vibracinio apdorojimo poveikis termiškai užpukštų ir taikant vibracinį apdorojimą perlydytų Ni pagrindo dangų struktūrai ir savybėms.

Darbo tikslas

Išaiškinti vibracinio apdorojimo poveikį purkštųjų perlydomųjų Ni pagrindo dangų struktūrai ir savybėms, kai vibracinis apdorojimas taikomas perlydymo metu.

Darbo uždaviniai

Darbo tikslui pasiekti darbe spręsti šie uždaviniai:

1. Ištirti purkštųjų perlydomųjų Ni pagrindo dangų, gautų taikant perlydymo metu įvairių parametru vibracinį apdorojimą, mikrostruktūrą ir savybes.
2. Nustatyti perlydytų dangų kokybinių charakteristikų (mikrostruktūros, kietumo, atsparumo dilimui, atsparumo korozijai, šurkščio) priklausomybes nuo vibracijų parametru.

Tyrimų metodika

Disertacijoje taikomi analitiniai ir eksperimentiniai tyrimo metodai bei lyginamoji analizė.

Darbe buvo tiriamos purkštosios perlydomosios Ni pagrindo dangos, vibruotos perlydymo metu keičiant vibracinio apdorojimo parametrus – kryptį, dažnį ir amplitudę. Eksperimentams naudoti 2 rūšių nikelio pagrindo milteliai. Mažiau legiruoto lydinio milteliuose buvo ~82 % Ni, daugiau legiruoto – ~67 % Ni. Užpurkštos dangos buvo perlydytos be vibracijų ir taikant vibracinį apdorojimą. Dangų struktūra ir savybės buvo tiriamos taikant šiuolaikinius tyrimo metodus: optinę mikroskopiją, nuskaitančiąją elektroninę mikroskopiją, rentgeno mikroanalizę, rentgeno spindulių difrakciją bei diferencinę terminę analizę. Dangų savybės tirtos taip pat atliekant potenciodinaminės poliarizacijos, kietumo, mikrokietumo, paviršiaus šurkštumo matavimus ir dilimo bandymus.

Darbo mokslinis naujumas

Rengiant disertaciją buvo gauti šie medžiagų inžinerijos mokslui nauji rezultatai:

1. Vibracinis apdorojimas panaudotas Ni pagrindo plonų purkštųjų dangų perlydymo metu.
2. Kompleksiškai ištirtos Ni pagrindo dangos, kristalizacijos metu paveiktos mechaninių virpesių. Nustatyta, kad vibracijos turi įtakos dangos mikrostruktūros susidarymui ir savybėms (kietumui, atsparumui dilimui, šiurkštumui). Nustatyta, kad susidarantiems mikrostruktūros ir savybių pokyčiams turi įtakos taikomų vibracijų dažnis, amplitudė ir kryptis.
3. Taikant vibracinį apdorojimą mažiau legiruotoms (~82 % Ni) dangoms su vyraujančia γ -Ni kietojo tirpalo kristalizacija vibracijos smulkina struktūros darinius, tuo pačiu didina dangos kietumą ir gerina atsparumą dilimui.
4. Tiriant struktūros susmulkėjimą dangose nustatyta, kad ženklūs struktūros susmulkėjimo efektai gaunami tam tikrame vibracijų parametrų intervale taikant skirtingus dažnio ir amplitudės derinius.
5. Gausiai legiruotose (~67 % Ni), boridus sudarančiose, perlydomosiose Ni pagrindo dangose vibracinis apdorojimas dangoje sukuria sluoksninę struktūrą su tolydžiu mikrokietumo didėjimu nuo sulydymo linijos link paviršiaus, tuo pačiu didina dangos pagrindinio darbinio sluoksnio kietumą nebloginant antikoroziinių dangos savybių ir mažina gaunamų dangų paviršiaus šiurkštį po perlydymo.
6. Gausiai legiruotų Ni pagrindo dangų sluoksninės struktūros susidarymui ir paviršiaus šiurkštumo sumažėjimui taikomų vibracijų amplitudės didinimas turėjo stipresnę poveikį negu dažnio kitimas.

Darbo rezultatų praktinė reikšmė

Vibracinio apdorojimo procesas yra paprastas bei nebrangus ir gali būti taikomas įvairios formos ir masės detalėms. Darbe gauti rezultatai tiesiogiai susiję su pačių vibracijų dažniu ir amplitude, todėl gali būti pritaikytas bet koks pramoninis vibratorius, leidžiantis gauti darbe apibrėžtus vibracijų parametrus. Tyrimų metu nustatytas vibracinio apdorojimo kompleksinis poveikis. Pritaikius darbe apibrėžtų efektyviausių parametrų vibravimą perlydomosioms dangoms galima gauti glotnesnio paviršiaus, sustiprintos struktūros, atsparesnes dilimui ir korozijai dangas.

Ginamieji teiginiai

1. Žemo dažnio vibracinis apdorojimas, taikomas perlydymo metu, turi įtakos purkštųjų perlydomųjų Ni pagrindo dangų struktūrai ir savybėms, skirtingai veikia skirtingos cheminės sudėties perlydomąsias dangas ir gerina jų savybes.
2. Taikant žemo dažnio vibracinį apdorojimą purkštųjų Ni pagrindo dangų perlydymo metu naujos fazės ar struktūros dariniai nesusidaro.

Darbo rezultatų aprobavimas

Disertacijos tema yra atspausdinti 4 moksliniai straipsniai: vienas – ISI Web of Science duomenų bazės leidinyje (Škamat *et al.* 2010); du – kitų tarptautinių duomenų bazių leidiniuose (Valiulis ir Škamat 2010, Škamat ir Valiulis 2010), vienas – recenzuojamoje konferencijos medžiagoje (Škamat *et al.* 2012). Taip pat vienas straipsnis yra priimtas spaudai ISI Web of Science duomenų bazės leidinyje (Škamat *et al.* 2014).

Disertacijoje atliktų tyrimų rezultatai buvo paskelbti aštuoniose mokslinėse konferencijose Lietuvoje ir užsienyje:

- Jaunųjų mokslininkų konferencijoje „Mokslas – Lietuvos ateitis“ 2009 m., Vilniuje;
- Tarptautinėse konferencijose „Mechatronic Systems and Materials“ 2009 m. ir 2013 m., Vilniuje;
- Tarptautinėje konferencijoje „Vibroengineering“ 2010 m., Kaune;
- Respublikinėse konferencijose „Medžiagų inžinerija“ 2010 m. ir 2012 m., Kaune;
- Jaunųjų mokslininkų konferencijoje „Fizinių ir technologijos mokslų tarpdalykiniai tyrimai“ 2011 m., Vilniuje.
- Tarptautinėje mokslinėje konferencijoje „Science and education as a leading factor in strategy Kazakhstan – 2030“ 2012 m., Karagandoje.

Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai, rezultatų apibendrinimas, literatūros šaltinių ir autoriaus publikacijų sąrašai ir trys priedai.

Darbo apimtis yra 94 puslapiai, neskaitant priedų, tekste panaudotos 3 numeruotos formulės, 46 paveikslai ir 18 lentelių. Rašant disertaciją buvo panaudota 100 literatūros šaltinių.

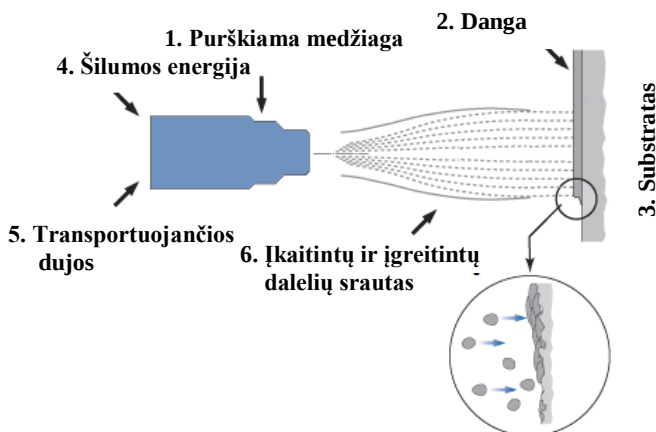
Terminio purškimo technologijos. Vibracinis apdorojimas medžiagų inžinerijoje

Skyriuje apžvelgiamos terminio purškimo technologijos, jų raida ir ypatumai. Detaliau analizuojama perlydomųjų Ni pagrindo dangų sandara, įvairių veiksnių įtaka jos susidarymui. Apžvelgiamos vibracinės technologijos, jų vieta medžiagų inžinerijoje ir analizuojama galimybė pritaikyti vibracinį apdorojimą terminio purškimo dangų perlydymo metu.

Skyriaus tematika paskelbti du autoriaus straipsniai (Škamat ir Valiulis 2010, Valiulis ir Škamat 2010)

1.1. Terminio purškimo technologijos

Dabartiniu metu žinoma daug įvairių paviršiaus padengimo ir modifikavimo būdų. Atskirą grupę sudaro terminio purškimo technologijos, kurių esmė yra susmulkinti metalinę arba nemetalinę medžiagą ir dispersiniu srautu išlydytoje ar pusiau išlydytoje būsenoje užpurkšti ją ant paruošto paviršiaus. Supaprastinta terminio purškimo schema pateikiama 1.1 paveiksle.



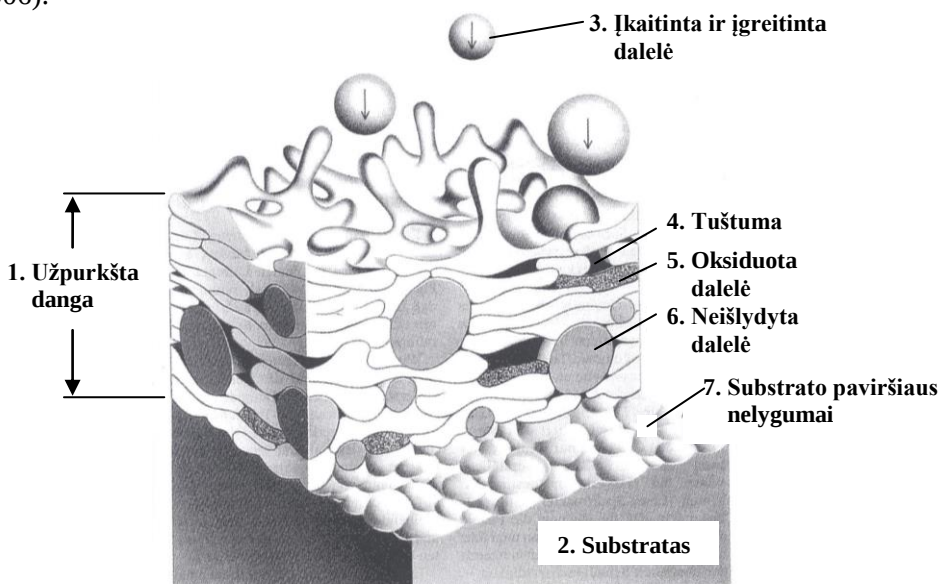
1.1 pav. Terminio purškimo schema

Fig. 1.1. The scheme of thermal spraying: 1 – spraying material, 2 – coating, 3 – substrate, 4 – heat energy, 5 – carrier gas; 6 – flow of heated and accelerated particles

Bendru atveju terminis purškimas charakterizuojamas kaip paprastas, našus, universalus ir palyginti nebrangus būdas, leidžiantis ant įvairių substratų formuoti įvairaus storio, nuo 0,02 mm iki 50 mm (Babiak *et al.* 2006, Grainger and Blunt 1998), dangas iš plataus spektro medžiagų: metalų (Fe, Ni, Co, Cu, Mo, Al, Zn, Sn, Cr ir įvairių lydinų jų pagrindų), polimerų (pvz. poliesterio), keramikos (pvz. Al, Ti, Zr ir Cr oksidų, magnio cirkonato, hidroksilapatito ir t. t.), kompozitų (metalų ir jų lydinų kompozitai su karbidais, boridais, oksidais, grafitu ir kt.) (Babiak *et al.* 2006, Dorfman 2012, Grainger and Blunt 1998, Valiulis 2005). Purškimo procesui naudojamos medžiagos gali būti pilnavidurės arba miltelinės vielos, strypai, milteliai ar skysčiai. Tarp kitų privalumų taip pat pažymima: galimybė atlikti procesą lauko sąlygomis; mažas terminis poveikis substratui (išskyrus purškimo-perlydymo metodą); beveik jokių dydžio ir formos apribojimų dengiamam paviršiui; galimybė padengti tiek visą detalę, tiek atskirą jos paviršiaus vietą. Dėl naudojamų medžiagų įvairovės terminis purškimas taikomas įvairiausiose srityse (Gedzevičius 2005, Valiulis 2005): naftos ir chemijos pramonėje, laivų ir tiltų statyboje, mašinų gamyboje, transporte ir aviacijoje, atominėje energetikoje ir kosminėje pramonėje, medicinoje, elektronikoje ir elektrotechnikoje, maisto pramonėje ir kt. Pagrindinės purkštųjų dangų funkcijos – tai darbinių paviršių restauravimas ir remontas; apsauga nuo korozijos; apsauga nuo abrazyvinio, erozijos, trinties ir kitų nusidėvėjimo formų; termoizoliacija arba terminis laidumas; elektros izoliacija arba laidumas; apsauga nuo aukštatempatūrės korozijos ir oksidacijos; ir t. t. (Dorfman 2012).

1.1.1. Purškiamųjų dangų formavimo ir struktūros ypatumai

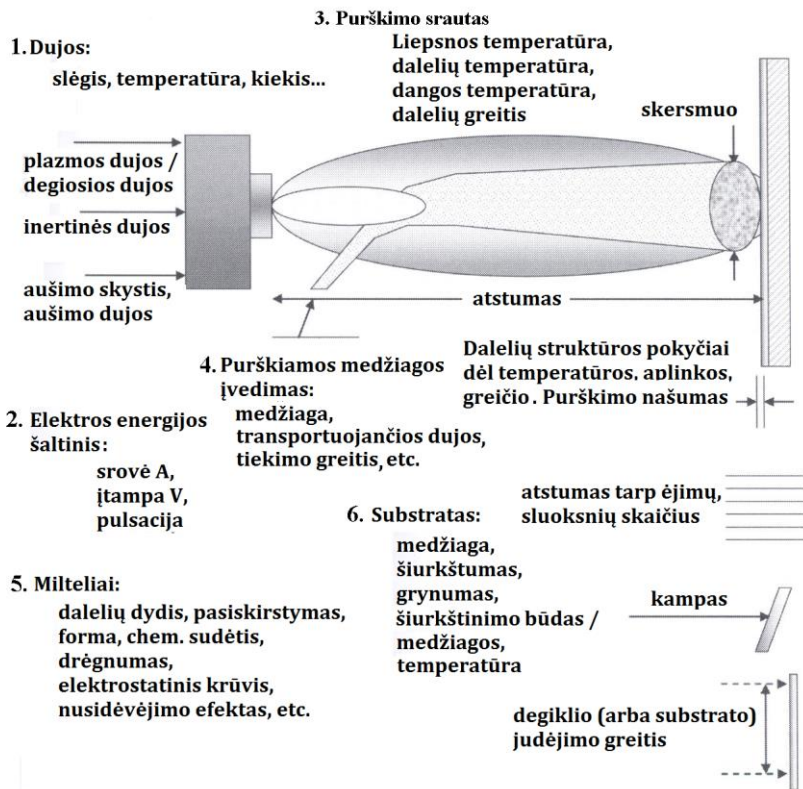
Kiekvienas purškimo būdas yra savitas, tačiau dangos formavimo principas daugumai jų yra panašus. Purškiamoji medžiaga kaitinama energijos šaltinio. Išlydytos purškiamos medžiagos lašeliai įgreitinami transportuojančių dujų srautu ir nukreipiami į dengiamą paviršių. Skriejantys lašeliai kristalizuojasi per labai trumpą laiką, kartais nespėję pasiekti substrato. Susiduriant dalelėms su substratu arba jau užpurkštomis dalelėmis kinetinė energija virsta šilumine, išlydytos medžiagos lašeliai išsitaško ir kristalizuojasi, o skriejimo metu jau susikristalizavusios dalelės susidūrę su paviršiumi tik deformuojasi. Dėl mažų proceso temperatūros ir dalelių skriejimo greičio dalis dalelių gali nusėsti ant paviršiaus net be didelių formos pokyčių, sudarydamos tokiu būdu akytą, su tuštumomis sluoksnį. Dėl koncentruoto šilumos poveikio purškimo metu dalelės gali reaguoti su deguonimi, azotu, vandeniliu; susidaro oksidai, nitridai, hidridai; dalis legiruojančių elementų gali išgaruoti. Tokiu būdu užpurkšta danga paprastai turi sluoksninę (lamelių) heterogeninę anizotropinę struktūrą, kuri, priklausomai nuo taikomo metodo ir medžiagos, charakterizuojama tam tikru akytumu bei oksidų, užterštumų ir kitų defektų kiekiu. Dangos formavimas purškimo metu ir tipinė užpurkšto sluoksnio struktūra parodyta 1.2 paveiksle (Babiak *et al.* 2006).



1.2 pav. Dangos formavimas terminiu purškimu

Fig. 1.2. Formation of thermal spray coating: 1 – as-sprayed layer, 2 – substrate, 3 – heated and accelerated particle, 4 – cavity, 5 – oxide inclusion, 6 – unmelted particle, 7 – rough substrate surface

Purškiamųjų dangu kokybė taip pat įvertinama sukibimo su substratu stiprumu, dažnai dar vadinamu tiesiog adhezija, bei dalelių ir atskirų jų sluoksnių sukibimu tarpusavyje pačioje dangoje (kohezija). Dalelių sukibimas įvyksta joms mechanškai užstringant dengiamo paviršiaus nelygumuose ir lokaliai susilydant su paviršiumi oksidų plėvelės pažeidimo vietose (mikrosuvirinimas), taip pat dėl susidarančių cheminių ryšių, difuzijos, veikiant elektrostatinėms jėgoms (Balic *et al.* 2009, Gedzevičius 2005). Be purškiamos medžiagos prigimties bei skriejančių dalelių temperatūros ir greičio adheziniam stiprumui lemiamą įtaką turi substrato medžiaga ir tokios substrato charakteristikos, kaip šiurkštis, temperatūra. Todėl terminio purškimo technologijose ypatingas dėmesys skiriamas dengiamo paviršiaus paruošimui.



1.3 pav. Veiksniai, įtakojančys terminio purškimo procesą

Fig. 1.3. Factors influencing the thermal spray process: 1 – gas, 2 – electric energy source, 3 – spraying flow; 4 – introducing of spraying material; 5 – spraying powder, 6 – substrate

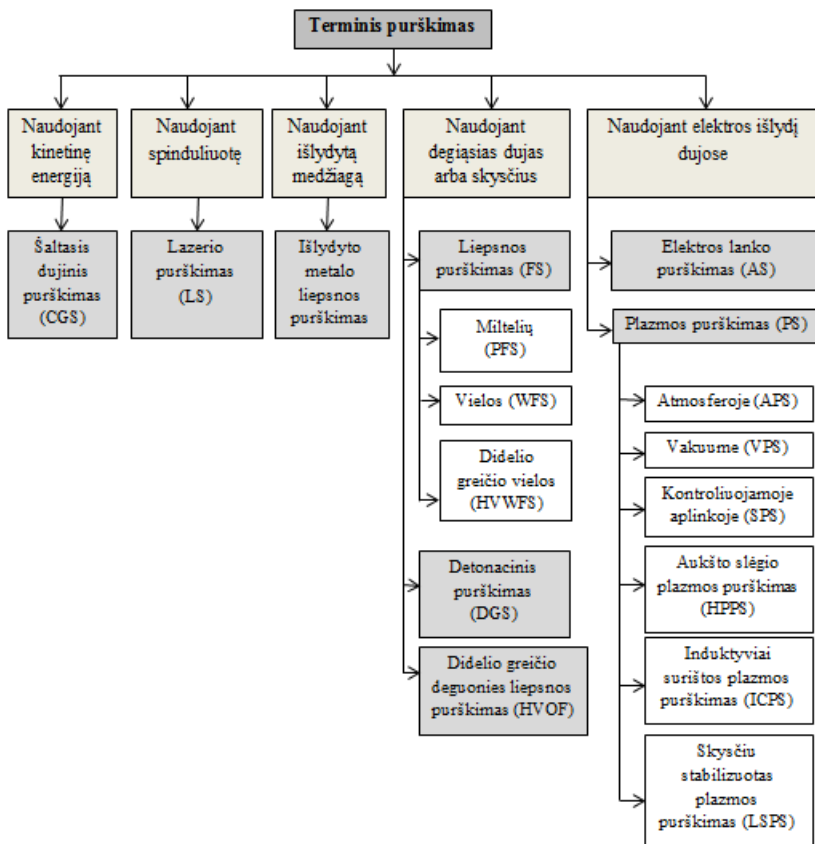
Įvairiems substratams taikomos skirtingos paruošimo procedūros, tačiau iš esmės siekiama pašalinti nešvarumus (kai kurioms medžiagoms – oksido plėvelės) bei suteikti tam tikrą mikroreljefą, tuo pačiu didinant kontaktinio paviršiaus plotą ir, atitinkamai, paviršinę energiją. Prieš purškiant substratas dažnai pakaitinamas. Pakaitinimo metu sudega riebalų, tepalų likučiai, išgaruoja drėgmė. Pakaitinimas leidžia taip pat sumažinti liekamuosius terminius įtempius, turinčius savo ruožtu įtakos adhezinio ir kohezinio sukibimo stiprumui.

Bendru atveju terminio purškimo procesas ir gaunamos dangos galutinė kokybė priklauso nuo daugelio veiksnių. Pavyzdžiui *Fauchais*, kruopščiai išanalizavęs plazmos purškimo procesą, savo darbe (*Fauchais* 2004) nurodo, kad apie 50–60 tarpusavyje priklausomų proceso parametrų turi įtakos plazma užpurkštų dangų mechaninėms ir eksploatacinėms savybėms. Šie parametrai susiję su energijos šaltiniu, purškiama medžiaga, degiklio konstrukcija, substratu, dengimo technika ir t. t. 1.3 paveiksle pateikta schema, apimanti daugumą veiksnių, būdingų pagrindiniams miltelių purškimo metodams (*Schneider et al.* 2006).

1.1.2. Terminio purškimo raida

Terminio purškimo technologijų pradininku laikomas Šveicarijos inžinierius *Max Ulrich Schoop*, kuris dar XX amžiaus pradžioje pradėjo purškimo eksperimentus su švinu ir alavu. Acetileno – deguonies liepsna buvo naudojama metalo vielai išlydyti ir nukreipti išlydytų lašelių srautą link dengiamo paviršiaus. Taip 1909 metais buvo įregistruotas patentas originaliu pavadinimu „*Powder metal and wire-flame spraying*“, davęs pradžią naujai dangų technologijų kryptčiai – terminiam purškimui. Kiek vėliau be metalinių vielų buvo pradėta taikyti ir metalų miltelius. Naujos galimybės atsivėrė kai 1911 metais *Schoop* užpatentavo kitą – elektrolankinį – metodą, leidžiantį naudoti daugiau įvairių metalų. Šiuo atveju purškiamoji medžiaga tiekama dviejų vielų, tarp kurių dega lankas, pavidalu. Aukšto slėgio dujų (paprastai oro) srautas nukreipia išsilydžiusių vielų daleles ant dengiamo pagrindo. Taip prasidėjo dviejų pagrindinių terminio purškimo metodų – elektrolankinio ir liepsninio – raida. Ankstyvaisiais vystymo dešimtmečiais jie dažniausiai buvo taikomi apsaugai nuo korozijos. Kiti metodai buvo išrasti daug vėliau, tačiau iki šiol elektra ir degių medžiagų degimo/sprogimo reakcija yra du pagrindiniai energijos šaltiniai, naudojami terminio purškimo technologijose.

Dabartiniu metu galima išskirti apie 10 savarankiškų terminio purškimo metodų ir dar kelis išvestinius. Dažniausiai jie grupuojami pagal naudojamą energijos šaltinį. Viena iš klasifikacijų, apimanti pagrindinius šiuo metu žinomus metodus, pateikiama 1.4 paveiksle (*Babiak et al.* 2006). Ji gali būti papildyta dar keliais, pvz. tokiais, kaip liepsnos purškimas su perlydymu bei elektromagnetinis miltelių nusodinimas (*Simunovic* 2010).



1.4 pav. Terminio purškimo metodų klasifikacija pagal naudojamą energijos šaltinį

Fig. 1.4. Classification of thermal spray methods according to the energy source

Dėl palyginti žemos temperatūros ir nedidelio purškimo srauto greičio liepsninis ir elektrolankinis metodai priskiriami prie žemos energijos procesų, kuriems pavadinti dar dažnai vartojamas terminas metalizacija (Grainger and Blunt 1998). Šiais metodais gaminamos dangos paprastai charakterizuojamos palyginti dideliu akytumu ir silpnu sukibimu su substratu. Nedidelis porų ir tuštumų kiekis gali būti naudingas, nes liekamųjų įtempčių lygis porėtose dangose paprastai žemesnis ir galima purkšti storus sluoksnius be rizikos, kad jie atšoks. Poros taip pat gali atlikti lubrikanto rezervuarų funkcijas kai dengiami trinties veikiami paviršiai. Bendrai, proceso parametrų optimizavimas ir kruopštus dengiamo paviršiaus paruošimas leidžia gauti šiais metodais kokybiškas dangas. Taip pat dėl žemos savikainos, paprastai valdomos ir lengvai kilnojamos įrangos tam tikrose srityse šie procesai leidžia pasiekti puikių rezultatų ir iki šiol plačiai taikomi. Kaip pavyzdį galima pateikti geležinkelių tiltą Filadelfijoje (Ridge

Avenue bridge, Philadelphia), kurio metalinės konstrukcijos 1937 metais buvo padengtos 250 μm storio gryno cinko danga ir lygi šiol išsilaikė geros būklės.

Pagerinti gaunamų dangų charakteristikas buvo siekiama visų pirmą didinant bendrą proceso energiją. Taip, elektros lanko ir deguonies–kuro degimo pagrindu buvo sukurti vadinamieji didelės energijos metodai tokie, kaip didelio greičio purškimas (HVOF ir HVOF), detonacinis purškimas (DG, D-gan arba DGS), plazmos purškimas (PP). Kartu su tradiciniu liepsniniu ir elektrolankiniu jie sudaro penketuką svarbiausių terminio purškimo metodų (Babiak *et al.* 2006, Gedzevičius 2005). Prie jų galima pridėti purškimo su perlydymu metodą, kuris sukurtas tradicinio liepsninio purškimo pagrindu, naudoja šiam metodui specialiai sukurtas medžiagas ir įrankius, atliekamas taikant tam tikras procedūras, yra plačiausiai taikomų metodų sąrašė ir gali būti išskirtas kaip visiškai savarankiškas terminio purškimo būdas.

Vien tik kinetinės energijos panaudojimo pagrindu taip pat buvo sukurtas šaltasis dujinis purškimas. Aukšto slėgio oro srautas viršgarsiniu (400–700 m/s) greičiu nukreipia purškiamos medžiagos miltelius link substrato. Susidūrimo metu kinetinė energija virsta šiluminė, dalelės įkaista, plastiškai deformuojasi ir sudaro tvirtą, mažai porėtą paviršinį sluoksnį, gerai sukibusi su pagrindu. Dalelių pernešimas šaltoje būsenoje (paprastai iki 100 $^{\circ}\text{C}$) leidžia išsaugoti pradinę cheminę dalelių sudėtį nes eliminuojami neigiami efektai, būdingi „karšties“ procesams: dalelių oksidavimas ir legiruojančių elementų išdegimas oro sraute. Taip pat leidžia išvengti pagrindinio metalo terminio poveikio, sukeliančio deformacijas ir neigiamus struktūros pokyčius.

Terminio purškimo metodu vystymas šilumos ir kinetinės energijų didinimo kryptimi leido ne tik gaminti tankias gerai sukibusias dangas, bet ir gerokai praplėsti purkštųjų dangų taikymo sritis dėl galimybės purkšti didesnės lydymosi temperatūros, atsparias aukštoms temperatūroms bei įvairiems mechaniniams poveikiams medžiagas. Galimybė formuoti kokybiškas daugiafunkcines dangas paskatino sparčią terminio purškimo plėtrą įvairiausiose pramonės srityse.

Kitas veiksnys, turintis svarią įtaką terminio purškimo technologijų plėtrai, yra 2003 metais priimta RoHS direktyva (*Restriction of Hazardous Substances Directive*), ribojanti naudojimą šešių pavojingų medžiagų, tarp kurių yra kancerogeninis šešiavalentis chromas Cr^{6+} , susidarantis galvaninio chromavimo metu. Šiuo metu daugelyje sričių vietoje galvaninių Cr dangų plačiai taikomos atsparios terminio purškimo dangos.

1.1.3. Terminis purškimas su perlydymu

Terminis purškimas su perlydymu buvo sukurtas visų pirmą siekiant pagerinti dangos ir substrato sukibimą (Grainger and Blunt 1998). Purškimo su perlydymu technologija paprastai numato du žingsnius: purškiamos medžiagos (paprastai

miltelių pavidalo) užpurškimas ir užpurkšto sluoksnio perlydymas. Purškimas dažniausiai atliekamas deguonies ir acetileno mišinio liepsnos arba plazmos purškimo degikliu (ASM International 2000, Grainger and Blunt 1998). Miltelių dalelės, skriedamos dujų sraute, dalinai oksiduojasi ir nusėda ant dengiamo paviršiaus paprastai net be didelių formos pokyčių, sudarydamos tokiu būdu akytą, su tuštumomis tarp dalelių sluoksnį, turinti silpną adheziją su substratu. Pačios dalelės, kaip ir atskiri dalelių sluoksniai, yra taip pat silpnai sukibusios tarpusavyje. Perlydymo metu dalelės dalinai arba visiškai išsilydo, yra užpildomos tuštumos, suformuojamas tankus ir glotnus monolitinis sluoksnis, turintis tvirtą metalurginį ryšį su substratu (pvz. naudojant plieno substratą adhezinis stipris tempiant gali sudaryti apie 380–550 MPa priklausomai nuo dangos rūšies).

Perlydytos dangos mikrostruktūra iš esmės skiriasi nuo užpurkštos dangos mikrostruktūros ir labiau artima lieto metalo struktūrai. Perlydymo operacija atliekama tuo pačiu metu su purškimu arba vėliau, po purškimo. Kaitinama kol pasiekama temperatūra tarp dangos lydinio *liquidus* ir *solidus* temperatūrų, paprastai iki 1000–1100 °C. Tam naudojami specialiai perlydymui skirti arba paprasti liepsnos degikliai, kaitinimo krosnys, indukcinio kaitinimo įranga, lazeriai. Po perlydymo paliekama ataušti arba atliekamas terminis apdorojimas.

Procesas ypač lengvai mechanizuojamas taikant jį besisukantiems cilindrinams paviršiams, todėl efektyviai naudojamas dengiant tokias detales, kaip velenai, įvorės, movos ir t. t. Perlydymo metu iki aukštų temperatūrų įkaista ne tik danga, bet ir substratas. Todėl pagrindinis reikalavimas substrato medžiagai, kad jos *solidus* temperatūra būtų didesnė už perlydymo proceso temperatūrą. Dažniausia dengiami įvairių rūšių plienai. Naudojant užgrūdinamus plienus laikomasi tam tikrų terminių režimų perlydymo metu bei taikomas atitinkamas terminis apdorojimas po perlydymo. Tai leidžia išvengti užgrūdintų struktūrų formavimosi. Dengiant purškimo perlydymo būdu didelius plotus arba didelės masės detales bei purškiant kietuosius lydinius taip pat naudojami specialūs temperatūrų režimai. Daug šilumos įvedama purškimo stadijoje ir perlydymas pradedamas esant substrato temperatūrai apie 500–700 °C. Tokiu būdu sumažinamas terminis smūgis bei liekamieji terminiai įtempiai, turintys įtakos substrato ir dangos sukibimui bei dangos eksploatacinėms savybėms.

1.1.4. Purškiamieji perlydomieji lydiniai

Šiuo metu gaminami perlydomieji kobalto, nikelio ir geležies lydiniai (Grainger and Blunt 1998, Пантелеенко 2003). Taip pat yra duomenų apie perlydomuosius vario lydinius (Пантелеенко 2003). Paprastai tai milteliai ar jų mišiniai su kietosiomis dalelėmis, dažniausiai karbidais. Specialiai sukurta perlydomųjų lydinų cheminė sudėtis užtikrina žemesnę lydymosi temperatūrą, lydinys gerai vilgo substratą ir suriša oksidus. Visa tai leidžia kokybiškai atlikti perlydymą ore ne-

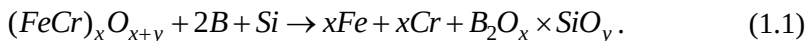
naudojant papildomų fliusų arba kitos apsaugos. Priklausomai nuo legiruojančių elementų, jų kiekio ir santykio užtikrinamos įvairios gaunamų dangų charakteristikos.

1.1.5. Purškiamieji perlydomieji nikelio lydiniai

Nikelio pagrindo dangos efektyviausiai taikomos kai reikalaujamas paviršiaus atsparumas dilimui esant korozinei terpei ir aukštatemperatūrei oksidacijai (Sidhu *et al.* 2006). Apsauginės nikelio pagrindo dangos labai paplito įvairiose pramonės srityse visų pirma dėl paties nikelio išskirtinių savybių. Grynas nikelis yra tšsus ir plastiškas nes iki lydymosi taško (1453 °C) išlaiko KCP gardele, todėl tšsus–trapus perėjimas nikelio lydiniam nebūdingas. Nikelis pasižymi geru koroziniu atsparumu atmosferoje, gėlame vandenyje, deaeruose neoksidinėse rūgštyse ir labai geru atsparumu šarmuose. Su daugeliu elementų nikelis sudaro kietąjį tirpalą ir gali ištirpinti jų daug ir įvairiais santykiais. Tai leidžia keičiant legiruojančių elementų kiekį ir santykį varijuoti specialiąsias lydinų savybes plačiame diapazone: pagerinti mechaninį atsparumą sustiprinant kietąjį tirpalą, suformuojant dispersines fazes ir kietuosius intarpus, taip pat pagerinti atsparumą korozijai ir aukštatemperatūrei oksidacijai. Dėl paminėtų priežasčių nikelis yra puikus pagrindas apsauginėms dangoms kurti (ASM International 2000).

Nikelio purkštųjų perlydomųjų dangų pagrindą sudaro Ni–B–Si sistema su kitais legiruojančiais elementais (Miguel *et al.* 2003). Svarbiausi iš jų, praktiškai naudojami visuose komerciniuose milteliuose, yra Cr, C, Fe. Dažnai šios sistemos apibrėžiamos kaip Ni–Cr–B–Si arba Ni–Cr–B–Si–Fe–C sistemos. Kiti elementai, dažnai naudojami šio tipo perlydomiems lydiniam legiruoti, yra Mo, Cu, Co, W ir kt.

Perlydomųjų Ni lydinų svarbiausieji legiravimo elementai yra boras ir silicis. Boras, formuodamas lengvai lydžią eutektiką su nikeliu, sumažina bendrą lydinio lydymosi temperatūrą ir praplečia *solidus–liquidus* intervalą, tokiu būdu labai palengvindamas perlydymo procedūrą. Boras, kartu su siliciu, surišdamas oksidus, neišvengiamai formuojančius miltelių dalelių ir substrato paviršiuose purškimo metu, perlydymo stadijoje sudaro lengvus stiklo pavidalo šlakus, kurie išplaukia į paviršių (Tu *et al.* 1997):



Perlydomosiuose lydinuose silicis yra ne tik dezoksidatorius, bet ir svarbus metalinės matricos elementas, formuojantis intermetalinius junginius Ni₅Si₂ ir Ni₃Si, turinčius didelę įtaką lydinų mechaniniam atsparumui (ASM International 2000, Kim *et al.* 2003). 6 % nurodomi šaltinyje (Kim *et al.* 2003), kaip riba, tačiau Si kiekis, pakankamas silicidų formavimuisi, priklauso nuo chromo ir boro kiekio lydinėje. Mažiausias silicio tirpumas nikelyje yra esant 8 % chromo

(Kim *et al.* 2003), tuo pačiu metu kuo didesnis yra boro kiekis, tuo mažiau silicio reikia, kad susidarytų silicidai (ASM International 2000). Dėl riboto boro tirpumo nikelyje, esant jo kiekiui didesniame kaip 2 % be pirminės kietosios fazės – nikelio borido Ni_3B gali susidaryti ir kiti įvairių metalų (dažniausiai Cr) pagrindo kietieji intarpai – boridai.

Chromas. Nikelis gali ištirpinti apie 35 % chromo (ASM International 2000). Perlydomuosiuose lydinuose jo gali būti įvairiai: pavyzdžiui, nuo 0,08 % Colmonoy 23A lydinyje iki 29 % Colmonoy 84 (ASM International 2000). Su nikeliu chromas sudaro kietąjį pakeitimo tirpalą ir formuoja austenito (γ) matricą su KCP gardele. Grigorescu savo darbe (Grigorescu *et al.* 1995) rašo, kad esant nedideliems Cr kiekiams iki 8 %, daugiakomponenčių metalinių sistemų struktūra labiausiai priklauso visgi nuo B ir Si kiekių. Didėjant Cr kiekiui mažėja nikelio boridų iki visiško jų nebuvimo. Tuo pačiu metu stabilizuojami M_7C_3 ir M_{23}C_6 tipų kompleksiniai karbidai. Taip pat pažymima, kad Cr įtakoja Ni–B–Si lydinį elgseną kaitinimo metu, tuo pačiu neturėdamas įtakos kristalizacijos procesui. Nikelio legiravimas chromu gerokai padidina jo patvarumą oksiduojančiose terpėse (Кравцов 1999). Kristalizacijos metu chromas, reaguodamas su C ir/arba su B taip pat formuoja kietuosius interpus: karbidus, boridus, karbaboridus, borokarbidus. Tokiu būdu šio tipo dangose chromas užtikrina geras antikoroazines ir tribologines savybes bei mechaninį atsparumą (Zhang *et al.* 2007, Miguel *et al.* 2003, Grigorescu *et al.* 1995, Gomez-del Rio *et al.* 2008).

Dauguma komercinių šio tipo miltelių pritaikyta lydinams geležies pagrindu dengti. Nedideli geležies kiekiai miltelių sudėtyje pagerina plieninio substrato vilgumą perlydymo metu, skatina tvirto metalurginio ryšio susidarymą tarp dangos ir substrato, modifikuoja difuzijos greitį (Grigorescu *et al.* 1995). Tačiau, dėl geležies didesnio kinematinio klampumo (Мамина 2009) palyginus su Ni, esant Fe kiekiui didesniame kaip 5 % blogėja perlydomo sluoksnio takumas ir sumažėja kietumas. Mineralinių rūgščių tirpalai geležį tirpdo labiau negu kitus lydinio elementus, todėl milteliuose būna nedaug Fe.

Įvertinti atskirai kiekvieno elemento įtaką remiantis literatūros analize sudėtinga, nes autoriai lygina komercinius miltelius, besiskiriančius ne vieno, bet kelių elementų kiekiu. Visgi, gali būti apibrėžtos bendros tendencijos. Didėjant boro ir silicio kiekiui mažėja lydymosi pradžios temperatūra ir plečiasi *solidus–liquidus* intervalas. Dangų kietumas ir atsparumas dilimui, didėjant Cr, B, Si, C kiekiui, didėja, tačiau smūginio tašumo charakteristikos blogėja.

Tokiu būdu, keičiant legiruojančių elementų santykį lydinyje, lydinio specialiosios savybės keičiasi plačiame diapazone – nuo palyginti minkštų (~300 HV), antifrikcinių, pasižyminčių puikiomis antikorozinėmis savybėmis ir cheminiu patvarumu aukštose temperatūrose iki labai kietų (~780 HV), eksploatuojamų sunkiomis dilimo, erozijos, kavitacijos sąlygomis dažnai esant agresyviai korozinei aplinkai.

1.1.6. Perlydomųjų nikelio pagrindo dangų sandara

Dangos struktūra po perlydymo tampa artima lieto metalo struktūrai. Cheminė miltelių sudėtis ir pasirinktas purškimo/perlydymo metodas yra svarbiausi veiksniai, lemiantys galutinę purkštųjų perlydomųjų dangų mikrostruktūrą ir, atitinkamai, savybes. Iš rezultatų, skelbiamų įvairiuose darbuose (Gonzalez *et al.* 2007, Navas *et al.* 2006, Serres *et al.* 2010), matyti, kad fazinė sudėtis labiau priklauso nuo cheminės sudėties, tuo tarpu mikrostruktūros dedamųjų morfologiją, dydį, pasiskirstymą lemia daugiausia pasirinktas metodas ir jo parametrai.

A.1 lentelėje (A priedas) pateiktos fazės, aptinkamos įvairios cheminės sudėties perlydomuosiuose Ni pagrindo lydinuose taikant įvairius dangų gamybos metodus. Iš pateiktų duomenų matyti, kad šio tipo lydinų struktūros pagrindą sudaro γ -fazė. Tai KCP gardelės Ni pagrindo kietasis tirpalas, kuriame gali būti didelis legiruojančių elementų kiekis. Perlydomuosiuose lydinuose nikelis kartu su boru (ir kartais siliciu) taip pat formuoja lengvai lydžias eutektikas. Dvi šios fazės (Ni pagrindo kietasis tirpalas ir Ni pagrindo eutektika) dažniausiai sudaro nikelinių dangų metalinę pakankamai plastišką matricą, kuri sukietinama įvairiais kietaisiais intarpais. Pirminė, paprastai Ni kietojo tirpalo, fazė dažniausiai turi lygiašių arba netaisyklingų grūdelių formą. Priklausomai nuo taikomo purškimo/perlydymo metodo kristalizacijos metu taip pat gali susidaryti dendritinė struktūra. Antrinė, eutektikos, fazė paprastai yra laminarinės (sluoksninės) struktūros ir kristalizuojasi tarpdendritinio tinklo pavidalu. Ni/Ni₃B eutektika yra labiausiai būdinga šio tipo dangų mikrostruktūrai (Gonzalez *et al.* 2007, Kim *et al.* 2003, Navas *et al.* 2006, Serres *et al.* 2010, Shrestha *et al.* 2005), tačiau gali susidaryti ir kiti, sudėtingesni, binarinės ir trinarės eutektikos tipai Ni–B, Ni–Si ir Ni–B–Si pagrindu (Hemmati *et al.* 2013a, Hemmati *et al.* 2013b, Lebaili *et al.* 1988, Li *et al.* 2001, Liyanage *et al.* 2010, Conde *et al.* 2002).

Be pirminių nikelio boridų kietąją fazę sudaro įvairių tipų karbidai, boridai ir karboboridai (A priedas). Dažniausiai tai chromo junginiai: Cr₇C₃, Cr₂₃C₆, Cr₃C₂, CrB, Cr₂B. Tačiau gali susidaryti kompleksiniai karbidai ir boridai, kuriuose dalis arba visas chromas pakeistas kitais elementais: (Cr,Fe)₇C₃, Cr₃NiB₆, FeMo₂B₂, Fe₂MoB₂, (Fe,Ni)₂₃C₆) ir kt.

1.1.7. Įvairių veiksnių poveikis perlydomųjų nikelio pagrindo dangų savybėms

Kaip ir visoms kitoms medžiagoms, perlydomosioms dangoms struktūra yra vienas iš pagrindinių veiksnių, lemiančių mechanines ir specialiąsias savybes. Todėl struktūros optimizavimas yra viena iš svarbių terminio purškimo dangų vystymo krypčių. Dažniausia siekiama smulkesnės struktūros su struktūrinių dedamųjų tolygiu pasiskirstymu. Tai pasiekama parenkant atitinkamą dangos formavimo metodą ir optimizuojant jo parametrus. Daugelyje darbų rodoma, kad

skirtingi metodai (liepsninis perlydymas, perlydymas lazeriu arba krosnyje ir kt.) ir to paties metodo parametrai gali formuoti iš esmės skirtingas mikrostruktūras ir iš dalies keisti fazinę sudėtį bei skirtingų fazių ir struktūrinių dedamųjų santykį (Hemmati *et al.* 2011, Gonzales *et al.* 2007, Li *et al.* 2001, Navas *et al.* 2006, Serres *et al.* 2010, Xu *et al.* 2006). Tai, be abejo, turi įtakos savybėms.

Be lazerinių technologijų taip pat yra duomenų apie kitų koncentruotų energijos šaltinių, tokių kaip jonų arba elektronų pluoštas, taikymą apsauginėms dangoms modifikuoti (pvz. Lee *et al.* 2006, Miao and Lei 2006). Veikiant paviršius koncentruotu energijos pluoštu, temperatūrų režimai ženkliai skiriasi nuo režimų taikant tradicinius metodus, nes vyksta labai intensyvus ir greitas kaitinimas bei staigus ataušinimas. Labai dideli aušinimo greičiai leidžia formuoti smulkias (iki nano dydžio) ir netgi amorfinės struktūras, pasižyminčias didelio stiprumo charakteristikomis.

Cheminė sudėtis labiausiai lemia gaunamų dangų fazinę sudėtį ir fazių santykį. Purškiamų medžiagų cheminės sudėties optimizavimas leidžia pasiekti norimų savybių. Savybėms pagerinti dažnai taikomas papildomas legiravimas, modifikavimas ir purškiamų miltelių maišymas su metalų karbidais (WC, TiC, VC, B₁₃C₂, SiC ir kt.), boridais (TiB₂), oksidais (CeO₂, La₂O₃, Y₂O₃ ir kt.) ir pan. (Cai *et al.* 2013, Kim *et al.* 2003, Li *et al.* 2003, Niranatlumpong and Koiprasert 2011, Tu *et al.* 1997, Wu *et al.* 2004, Sharma 2012). Tyrimai rodo, kad volframo ir kitų metalų karbidai turi stiprų poveikį visų pirma dangų mechaniniam atsparumui: padidėja kietumas, atsparumas dilimui, gali keistis erozijos bei dilimo mechanizmai (Tu *et al.* 1997). Dėl labai gerų vilgomųjų savybių Ni–B–Si pagrindo matricoje, komerciniuose mišiniuose dažniausia naudojami volframo karbidai WC. Jų buvimas matricoje taip pat skatina kietųjų fazių, tokių kaip NiB₃ arba M₆C, susidarymą (Grigorescu *et al.* 1995). Modifikavimas retaisiais žemės (RE) elementais ar jų oksidais (CeO₂, La₂O₃ ir kt.) turi platesnį poveikį: kartu galima pagerinti tokias charakteristikas, kaip kietumas, tūsumas, atsparumas oksidacijai ir korozijai, susmulkinti struktūrą, sumažinti trinties koeficientą ir kt. (Chen *et al.* 2008, Li *et al.* 1999, Martin *et al.* 2001, Sharma *et al.* 2009, Sharma 2012, Tao *et al.* 2000, Wang *et al.* 1996, Zhang *et al.* 2006, Zhang *et al.* 2007). Pagrindinis trūkumas šiuo atveju – tai kaina. Pavyzdžiui, Ni pagrindo miltelių kaina, juos sumaišius su 40 % WC, padidės apie 50 %. Kai kurie šaltiniai pažymi, kad gaminant dangas iš metalo lydinių miltelių ir kietųjų dalelių mišinių susiduriama su tokiais problemomis, kaip kietųjų dalelių išsilydymas naudojant koncentruotus šilumos šaltinius, jų netolygus pasiskirstymas dangoje ir kaupimasis prie substrato (Przybyłowicz and Kusinski 2001, Niranatlumpong and Koiprasert 2011, Wu *et al.* 1995, 2004).

Paskutinį dešimtmetį vykdomi intensyvūs terminio purškimo tyrimai nanokristalinių struktūrų formavimo kryptimi. Nanotechnologijų perspektyvumą dar 1959 m. „išpranašavo“ Richard Feynman savo kalboje „There’s Plenty of Room

in the Bottom“ (Pawlowski 2008). Labai intensyviai nanomedžiagos pradėtos tirti 80-aisiais. Nano dydžio elementai struktūroje modifikuoja metalų ir keramikos savybes. Dėl mažyčių dalelių tarpusavio slydimo efekto keramika pasidaro tasesnė ir gali demonstruoti puikias plastiškumo savybes net žemose temperatūrose; pasikeičia jos optinės, elektrinės ir kitos savybės (Jiang and Weng 2004, Pawlowski 2008). Metalinių medžiagų nanostruktūra charakterizuojama kaip beveik neturinti dislokacijų. Tai turi įtakos visų pirma mechaninėms charakteristikoms.

Terminio purškimo technologijose nano kryptis taip pat turi didelį potencialą. Be išskirtinių kristalizacijos sąlygų, susidarančių veikiant koncentruotos energijos pluoštams, nanostruktūros formavimas pasiekiamas taip pat naudojant nano dydžio purškiamos medžiagos daleles. Tačiau nanomiltelių purškimas susijęs su tam tikromis problemomis, pagrindinės iš kurių yra dalelių sulipimas ir netolygus pasiskirstymas struktūroje. Siekiant išvengti dalelių sulipimo efekto dažnai taikomas specialus aglomeravimas (Cho *et al.* 2012, Gang *et al.* 2003, Yin *et al.* 2010, Jiang *et al.* 2010, Liu *et al.* 2010, Racek *et al.* 2006, Saremi *et al.* 2013, Zhou *et al.* 2013). Šiuo atveju nanokristalinė struktūra pasiekama nanodalelėmis išliekant kai aglomeratai dalinai aplydomi dangos formavimo metu. Dabartiniu metu aglomeratų purškimas yra taikomas pramonėje, daugiausia – siekiant padidinti atsparumą trinties, erozijos ir abrazyviniam nusidėvėjimui (Pawlowski 2008). Nano dalelių suspensijų, emulsijų ir tirpalų purškimas šiuo metu yra tyrimo stadijoje. Jau yra paskelbtų teigiamų rezultatų formuojant apsaugines dangas įvairiais metodais (liepsna, PPO, HVOF ir kt.) iš nano suspensijų (Yuan *et al.* 2012, Toma *et al.* 2008, Vicent *et al.* 2012). Pagrindinis veiksnys, sulaikantis šiuo metu platesnį nano miltelių panaudojimą, tai aukšta jų kaina. Papildomas medžiagų paruošimas (miltelių malimas, aglomeravimas, suspensijų, emulsijų ir tirpalų paruošimas) taip pat reikalauja papildomų lėšų ir laiko sąnaudų. Todėl šiuo metu nano kryptis vystoma labiausiai tose srityse, kur tokios išlaidos pateisinamos, pvz. *terminio barjero* (TB) dangos dujų turbinoms, elektronų spinduoliams, fotokatalizei (Pawlowski 2008).

1.2. Vibracinis apdorojimas medžiagų inžinerijoje

Vibracinio poveikio taikymas technologiniuose procesuose nėra naujovė inžinerijoje. Jau daugiau kaip pusšimtį metų vibracinis poveikis taikomas įvairiausiose srityse. Štai kaip apibūdinamos vibracinės technologijos viename iš 1966 m. konferencijos pranešimų (Быховский 1966): „Vibravimas leidžia padidinti apdorojamų terpių tankį, išpurenti jas. Veikiant vibracijoms pusiau skystos masės kietėja, birios medžiagos įgyja savybes, būdingas skysčiams. Vibracijos gali tiek pakeisti terpės struktūrą, tiek padėti išlaikyti ją nepakeistą. Vibruojant galima

pasiekti chaotišką elementų išsidėstymą arba tiksliai orientuoti juos erdvėje. Vibracijas galima pritaikyti tiek grubiam stambių objektų apdorojimui, tiek preciziniams objektams.

Vibracinio apdorojimo taikymo metalurgijoje pradžia paprastai laikomi 1959 m. ir 1962 m. (Ornitz 1959, Patton 1962). 1959 m., *Ornitz* atrado, kad vibracinio poveikio pritaikymas metalų lydinių kristalizacijos metu sumažina gaunamų liejinių nehomogeniškumą. *Ornitz* aprašo metodą, kaip ženkliai sumažinti segregacijų, ištirpusių dujų ir porų kiekį bei pagerinti gaunamų liejinių metalo fizikines savybes. 1962 m. vibracinis apdorojimas buvo užpatentuotas kaip besikristalizuojančių lydinių struktūros smulkinimo metodas, leidžiantis tuo pačiu pagerinti metalurgines liejinių savybes. Šie atrasti efektai sudarė pagrindą tolimesniam vibracinių technologijų taikymui įvairiose metalurgijos srityse.

Literatūros analizė rodo, kad taikomų vibracijų diapazonas labai platus – nuo kelių Hz iki kelių šimtų kHz. Tuo tarpu daugeliu tyrimų parodyta, kad procesai, vykstantys skystoje medžiagoje veikiant žemadažnėms vibracijoms ir galingam (didelės amplitudės) ultragarsui, skiriasi. Stiprus ultragarso poveikis kristalizacijos procesams pasireiškia daugiausia dėl labai intensyvių kavitacijos reiškinių besikristalizuojančiame lydalyje (Абрамов 1984). Žemadažnės vibracijos energija sukelia struktūros pokyčius didindama peraušimo laipsnį ir mažindama temperatūros gradientą, didindama skysto metalo slėgį į augančius kristalus, kurie suirdami sudaro papildomus kristalizacijos centrus (Кудрин 1992, Nuradinov 2007). Šiuo atveju, kol vibracijų impulsų amplitudė nepakankamai didelė, kavitacija nevyksta, dėl šios priežasties šios dvi technologijos iš esmės skiriasi.

Vibracinis apdorojimas priskiriamas prie specialiųjų technologijų, taikomų besikristalizuojančių metalų lydinių struktūrai veikti. Vienas iš pagrindinių šio metodo privalumų – jo technologiškumas. Šiuo metu gaminama daug įvairios vibracinės technikos. Labiausiai paplitę debalansiniai ir elektromagnetiniai įvairaus galingumo vibratoriai. Priklausomai nuo konkrečių uždavinių ir sąlygų, vibruojamas objektas gali būti tvirtinamas prie vibratoriaus arba atvirkščiai: pvz. liejimo forma tvirtinama prie vibratoriaus stalo arba specialus įrankis panardinamas tiesiai į skystą metalo lydalą; suvirinant stambias detales vibratorius tvirtinamas tiesiai prie konstrukcijos ir t. t.

Įvairių metalų skystųjų lydalų vibracinio apdorojimo poveikis liejinių struktūrai ir savybėms ištirtas daugelyje darbų. 1.1 lentelėje pateikti kai kurie įvairių metų mokslinių tyrimų rezultatai, kurie rodo, kad atitinkamų parametrų vibracinis apdorojimas gali turėti kompleksinį teigiamą poveikį: smulkininti struktūrą; didinti struktūrinį ir cheminį vienalytiškumą bei tankį, mažinti ištirpusių dujų kiekį ir akytumą, gerinti mechanines ir specialiąsias charakteristikas. Liekamųjų įtempimų sumažinimo efektas labiausiai ištirtas taikant vibracijų energiją suviri-

namiems sujungimams. Šis efektas paprastai lydimas terminio poveikio srities (TPS) mikrokietumo sumažėjimu ir mechaninių charakteristikų pagerėjimu.

Liekamųjų įtempčių sumažinimas suvirintuose sujungimuose ištirtas pakankamai gerai. Šiuo metu gaminama tam specialiai skirta vibracinė technika (pvz. *Meta-Lax*) su programine įranga, leidžiančia pasirinkti optimalius apdorojimo parametrus įvairių formų ir matmenų konstrukcijoms. Liejininkystės srityje sukaupiti duomenys nepakankamai susisteminti. Tam trukdo pačių duomenų fragmentiškumas. Skirtingų dažnių, amplitudžių, krypties vibracijos taikomos įvairioms medžiagoms, turinčioms skirtingą vibracinį apdorojamumą. Be to, skiriasi apdorojamų medžiagų tūriai ir formos; taikomi įvairūs vibracijų įvedimo būdai. Iš vienos pusės visa tai charakterizuoja vibracinį apdorojimą kaip pakankamai lankstų procesą, iš kitos – esant reikalui neleidžia parinkti parametrus vien tik remiantis turimais duomenimis.

Taip pat reikia atkreipti dėmesį, kad yra paskelbtų rezultatų, rodančių neigiamus vibracinio apdorojimo poveikius (1.1 lentelė, Kocatepe 2007). Tirdamas Al–Si lydinius Kocatepe 2006 nustatė, kad įvedant kristalizacijos metu mechaninius virpesius su parametrais, didesniais kaip 21,7 Hz ir 0,125 mm, padidėja gaunamų liejinių akytumas ir susidarančių porų dydis. Taikomų vibracijų dažnio ir amplitudės didinimas sukelia didelių porų susidarymą liejinio paviršiuje. Keletas galimų mechanizmų yra pateikiama ir analizuojama.

Gerokai mažiau vibracinio apdorojimo tyrimų atlikta dangų formavimo srityje. Foroozmehr *et al.* 2009 darbe nagrinėjamos dangos, pagamintos purškiant lazeriu (LD) chrominio plieno (AISI H13) miltelius ant Cr–Mo plieno (AISI 4140) substrato. Trijų skirtingų dažnio ir amplitudės kombinacijų (75 Hz/197 μ m, 150 Hz/56 μ m, 300 Hz/21 μ m) mechaniniai virpesiai buvo įvedami purškimo metu lygiagrečiai substratui dviem kryptimis: išilgai lazerio šrauto judėjimo trajektorijos ir skersai jai. Tyrimais nustatyta, kad vibracinis apdorojimas leidžia ženkliai sumažinti akytumą ir defektų didžiausią dydį, padidinti mikrostruktūros homogeniškumą, gauti tolygesnį mikrokietumo pasiskirstymą. Taip pat nurodomas grūdelių dydžio sumažėjimo efektas struktūros dendritinėje zonoje. Skersinės 75 Hz ir 197 μ m vibracijos nurodomos kaip efektyviausios.

Kitame darbe (Wang *et al.* 2010) tiriamas statmenų vibracijų poveikis Fe pagrindo dangoms, sudarytoms plazminio purškimo (PP) būdu ant plieno substrato. Pritaikytos 50 Hz, 75 Hz, 100 Hz, 125 Hz, 150 Hz dažnių ir 90 μ m amplitudės vibracijos. Nurodoma, kad vibruojant sumažėja grūdelių dydis, padidėja mikrokietumas ir pagerėja atsparumas dilimui. Be struktūros susmulkėjimo analizuojami ir kiti galimi struktūros sustiprinimo mechanizmai: kietojo tirpalo sustiprinimas dėl didesnio ištirpusių elementų kiekio, susidarančio veikiant vibracijoms, ir dispersinis sukietinimas dėl tolygesnio smulkių kietųjų tarpų pasiskirstymo. Geriausi rezultatai šiuo atveju pasiekti taikant 100 Hz dažnį.

1.1 lentelė. Vibracinio apdorojimo efektai įvairiose metalurgijos srityse**Table 1.1.** Effects of vibratory treatment in different ranges of metallurgy

Medžiaga	Apdorojimo parametrai	Poveikis	Šaltinis
1	2	3	4
Taikant vibracinį apdorojimą metalų ir jų lydinių kristalizacijos metu			
Įvairūs lydiniai	nuo 25 Hz iki 500 kHz	Segregacijų, porų kiekio ir ištirpusių dujų kiekio sumažėjimas	Ornitz 1959
Bronzos:			
Įvairios	20, 100 Hz 500, 600 μm	Struktūros susmulkėjimas, tankio, stiprumo ribos (20–34%) ir santykinio pailgėjimo (15–26%) padidėjimas	Погодин-Алексеев 1961
БрКД1 (GOST)	25 Hz 400 μm	Struktūros susmulkėjimas, cheminis ir struktūrinis vienalytiškumą	Sulitsin <i>et al.</i> 2010
Ni–Cr lydiniai	10–1000 Hz	Struktūros susmulkėjimas	Patton 1962
Ketus:			
Pilkasis ketus	40–50 Hz 40–140 μm	Struktūros susmulkėjimas, plokštelinio grafito perėjimas į sferoidinį, mechaninių ir eksploatacinių savybių pagerėjimas	Аверин 1985
Pilkasis ketus	100 Hz 2,5 mm	Perlito susidarymas metalinėje matricoje (20%), austenito dendritų dydžio ir kiekio sumažėjimas, grafito eutektikos susidarymas ir austenito-grafito eutektikos kolonijų susmulkėjimas (nuo 0,7–1 μm iki 0,5–0,6 μm)	Nuradinov 2007
Plienai:			
60 X18H9T (GOST)	100 Hz 2,5 mm	Austenito grūdelių (5–7 kartus) ir sulfidų intarpų (nuo 5–8 μm iki 1,2–1,4 μm) dydžio sumažėjimas; stiprumo ir plastiškumo charakteristikų pagerėjimas (Rm, Re iki 8 %; santyk. pailgėjimas ir susitraukimas iki 15–45%); liekamųjų įtempių sumažėjimas (29 %)	Nuradinov 2007
Al lydiniai:			
Al–Mg Al–Mn Al–Fe Al–Mg–Zn	Žemo dažnio vibracijos	Struktūros susmulkėjimas, dujų kiekio sumažėjimas, homogeniškumo padidėjimas	Долматов 2006

1.1 lentelės pabaiga

1	2	3	4
LM25 (EN) LM6 (EN)	31,7–41,7 Hz 375–500 μm	Stambių porų susidarymas liejinio paviršiuje, bendro porų kiekio ir dydžio padidėjimas	Kocatepe 2007
AK5M2 (GOST)	100 Hz 2,5 mm	Struktūros susmulkėjimas ir tolygesnis eutektikos pasiskirstymas; plastiškumo (33–54%) ir stiprumo (3%) charakteristikų pagerėjimas	Nuradinov 2007
A 356 (ASTM)	11,7–33,3 Hz	Struktūros perėjimas nuo stambių dendritų prie smulkių lygiaašių grūdelių su grūdelių skersmens sumažėjimu nuo 125 μm iki 90 μm	Wu <i>et al.</i> 2008
Al – 18 % Si	8 Hz 500 μm	Struktūros susmulkėjimas, eutektikos fazės kiekio padidėjimas, santykinio pailgėjimo ir tempiamojo stiprio padidėjimas	Chirita <i>et al.</i> 2009
A 356 (ASTM)	55 Hz 0–110 V	Struktūros perėjimas nuo stambių dendritų prie smulkių lygiaašių grūdelių	Limmaneevichitr <i>et al.</i> 2009
A 356 (ASTM)	50 Hz	Struktūros susmulkėjimas (iki 53 %), tankio padidėjimas (nuo 2,40 g/cm ³ iki 2,68 g/cm ³)	Taghavi <i>et al.</i> 2009
Taikant vibracinį apdorojimą metalų ir jų lydinių suvirinimo metu			
Įvairių rūšių plienai	47–100 Hz 400–600 μm	Liekamųjų makro- ir mikroįtempių bei deformacijų sumažėjimas; atsparumo įtrūkių susidarymui, stiprumo ribos, smūginio tūsumo ir kt. mechaninių charakteristikų pagerėjimas, TPZ mikrokietumo sumažėjimas; ir kt.	Qinghua <i>et al.</i> 2008 Jurčius 2011 Ризванов <i>et al.</i> 2013
Taikant vibracinį apdorojimą dangų technologijose			
LD dangos AISI H13 plieno milteliai	75 Hz/197 μm 150 Hz/56 μm 300 Hz/27 μm	Akytumo sumažėjimas iki 80 %, struktūros homogenizavimas, tolygesnis mikrokietumo pasiskirstymas; geriausias efektas – esant 75 Hz ir 197 μm	Foroozmehr <i>et al.</i> 2009
PP dangos Fe pagrindo	50 Hz/90 μm 100 Hz/90 μm 150 Hz/90 μm	Bendras dangos sustiprinimo efektas dėl struktūros susmulkėjimo, dispersinio sustiprinimo ir kietojo tirpalo fazės sustiprinimo; mikrokietumo ir atsparumo dilimui padidėjimas; geriausias efektas nustatytas esant 100 Hz dažniui	Wang <i>et al.</i> 2010

Daugelis tyrimų rodo, kad vibracinis apdorojimas yra efektyvus metodas besikristalizuojančiai struktūrai veikti, tačiau turimi rezultatai neleidžia viena-reikšmiškai spręsti apie optimalius vibracijų parametrus: kryptį, dažnį, amplitudes ir kt., norint pritaikyti vibracinį apdorojimą konkrečiu atveju.

1.3. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas

1. Purškiamų medžiagų cheminės sudėties ir taikomo dengimo metodo parametrų optimizavimas leidžia pagaminti numatytų savybių kokybiškas perlydomąsias dangas visais būdais. Eksploatacinėms charakteristikoms gerinti ir resursui didinti dangų sandara efektyviai keičiama nano dydžio arba specialios cheminės sudėties priedais bei veikiant perlydomąsias dangas koncentruotos energijos pluoštais. Specialių struktūros veikimo metodų taikymas galėtų pagerinti perlydomųjų dangų savybes, tačiau jų poveikis ištirtas nepakankamai.
2. Daugelis tyrimų rodo, kad vibracinis apdorojimas yra efektyvus skystųjų metalų lydalų veikimo metodas siekiant kompleksškai pagerinti struktūrą ir savybes. Tai sudaro pagrindą teigti, kad vibracijos gali turėti teigiamą poveikį panaudojus jas perlydomosioms dangoms. Atlikus atitinkamus eksperimentus galima nustatyti kokius efektus sukelia ir kaip stipriai mechaniniai virpesiai veikia purkštųjų dangų struktūrą ir savybes, kai vibracinis apdorojimas taikomas dangų perlydymo metu.
3. Dėl nepakankamo sukaupėtų rezultatų susisteminimo šiuo metu neįmanoma vienareikšmiškai spręsti apie tai, kokios krypties vibracijos leistų pasiekti maksimalų efektą ir kokius dažnius ir amplitudes reikia taikyti. Todėl tikslinga išbandyti abiejų kryptių vibracijas platesniame parametrų diapazone su tolimesniu parametrų srities optimizavimu.

Užpurkštų nikelinių dangų vibracinio perlydymo metodika, darbe taikomi tyrimo metodai ir medžiagos

Eksperimentinio tyrimo metodika sudaryta siekiant išaiškinti galimus vibracinio apdorojimo poveikius purkštųjų perlydomųjų Ni pagrindo dangų struktūrai ir savybėms. Iš kelių komercinių Ni pagrindo purškiamųjų miltelių atrinkti dviejų sudėčių milteliai. Remiantis miltelių ir įrangos gamintojo rekomendacijomis atiderinti purškimo ir perlydymo proceso parametrai bei įsitikinta, kad procesas leidžia gauti pastovios struktūros dangas. Atlikti perlydymo eksperimentai, įvedant perlydymo metu mechanines vibracijas ir keičiant vibracijų dažnį ir amplitudę. Ištirta gautų dangų mikrostruktūra, atlikti perlydytų dangų paviršiaus šiurkštumo, kietumo ir mikrokietumo matavimai, atlikti dilimo bandymai ir potencialios poliarizacijos matavimai. Tyrimų ir matavimų rezultatai palyginti su rezultatais, gautais tiriant dangas, perlydytas taikant standartinę perlydymo procedūrą. Lyginamosios analizės pagrindu padarytos išvados apie vibracinio apdorojimo poveikį perlydomosioms nikelio pagrindo dangoms.

Skyriaus medžiaga paskelbtia dviejuose autoriaus straipsniuose (Škamat *et al.* 2010, Škamat *et al.* 2014).

2.1. Tyrimams naudotos medžiagos

Purškimo medžiagų parinkimas. Darbe buvo siekiama išbandyti skirtingų mikrostruktūrų dangas, kadangi vibracinis apdorojimas joms gali turėti skirtingus poveikius. Keturių cheminių sudėčių milteliai iširti, siekiant atrinkti tinkamiausius perlydymo eksperimentams. Atlikti bandomieji perlydymo eksperimentai, įvertintas miltelių technologiškumas (perlydymo proceso kontroliuojamumas) ir atlikta perlydytų dangų pirminė mikrostruktūros apžiūra su optiniu mikroskopu. Taip pat įvertinta miltelių kaina. Miltelių palyginimo suvestinė pateikta 2.1 lentelėje.

2.1 lentelė. Ni pagrindo purškiamųjų perlydomųjų miltelių palyginimas

Table 2.1. Comparison of Ni based thermal sprayed reusable powder

Miltelių žymėjimas	Palyginamieji kriterijai			
	Ni ir legiruojančių elementų LE santykis	Būdingoji mikrostruktūra	Perlydymo proceso kontrolė	Kaina (santyk. vnt.)
A	~ 82 % Ni / ~ 18 % LE	Plastiška Ni pagrindo matrica su vyraujančia γ -Ni kietojo tirpalo faze ir nedideliu kietųjų intarpų kiekiu	Lengva	1
B	~ 67 % Ni / ~ 33 % LE	Plastiška Ni pagrindo matrica su dideliu kietųjų intarpų kiekiu	Labai lengva	~1,2
C	~ 73 % Ni / ~ 27 % LE	Plastiška Ni pagrindo matrica su dideliu kietųjų intarpų kiekiu	Labai lengva	~1,2
D mišinys su karbidais	~ 73 % Ni / ~ 27 % LE + 40 % WC/Co	Nenustatyta	Sudėtinga	~1,6

Dėl sudėtingos perlydymo proceso kontrolės tolesniuose tyrimuose D miltelių atsisakyta.

Dviejų pagrindinių efektų buvo laukiama taikant vibracinį apdorojimą: struktūros susmulkėjimo ir mikrostruktūros elementų (šiuo atveju – kietųjų intarpų) pasiskirstymo pasikeitimo. Mažiausiai legiruoti, paprasčiausios struktūros ir pigiausi milteliai A pasirinkti kaip medžiaga, tinkamiausia tikintis struktūros susmulkėjimo. Iš dviejų dangų su dideliu susidarančių kietųjų intarpų kiekiu pa-

sirinkta labiau legiruota B danga, kaip tinkamiausia laukiant mikrostruktūros dedamųjų persiskirstymo. Miltelių cheminė sudėtis ir bendra charakteristika pateikti 2.2 lentelėje.

2.2 lentelė. Eksperimentams naudojamų Ni pagrindo purškiamųjų perlydomųjų miltelių cheminė sudėtis ir bendra charakteristika pagal gamintojo duomenis

Table 2.2. Chemical composition and performance of Ni based thermal sprayed reusable powder used for experiments (data provided by the manufacturer)

Miltelių žymuo	Miltelių chem. sudėtis (masės %)	Bendra charakteristika ir taikymo pavyzdžiai
A	~ 82 % Ni 0,44 % C; 3,19 % Si; 1,61 % B; 2,79 % Fe; 10,2 % Cr	Atsparumas korozijai ir aukštatemperatūrei oksidacijai. Antifrikcinės savybės. ~300 HV30 Velenų apsauginės įvorės, švaistikliai ir pan.
B	~ 67 % Ni 0,45 % C; 4,11 % Si; 3,92 % B; 2,72 % Fe; 15,7 % Cr; 1,94 % Cu; 4,69 % Mo	Atsparumas dilimui ir korozijai. ~770 HV30 Slydimo guoliai, betono siurblių rotorai, maišyklių ir purenimo mechanizmų velenai ir kt.

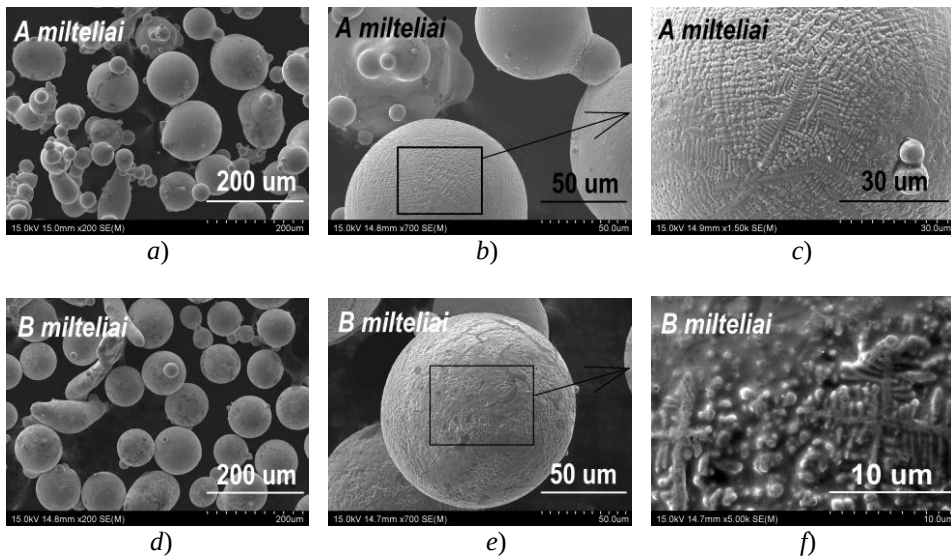
Purškimo medžiagų tyrimai. 2.3 lentelėje ir B priede pateikti parinktų miltelių rentgeno mikroanalizės RMA rezultatai, iš kurių matyti, kad tiek A, tiek B tipo miltelius sudaro vienos cheminės sudėties dalelės. Be gamintojo nurodomų cheminių elementų miltelių sudėtyje aptikta deguonies.

2.3 lentelė. Miltelių cheminė sudėtis (išskyrus C ir B), nustatyta RMA EDS

Table 2.3. Powders chemical composition (with the exception of C and B) determined by X-ray microanalysis (EDS)

Milteliai A			Milteliai B		
Elementas/ Spektro linija	Masės %	Atomų %	Elementas/ Spektro linija	Masės %	Atomų %
O K	4,15	13,14	O K	3,37	10,78
Si K	2,88	5,19	Si K	4,57	8,32
Cr K	11,21	10,93	Cr K	21,51	21,18
Fe K	2,74	2,49	Fe K	2,93	2,68
Ni K	79,02	68,24	Ni K	61,91	53,99
Mo L	-	-	Mo L	5,72	3,05
Iš viso	100,00	100,00	Iš viso	100,00	100,00

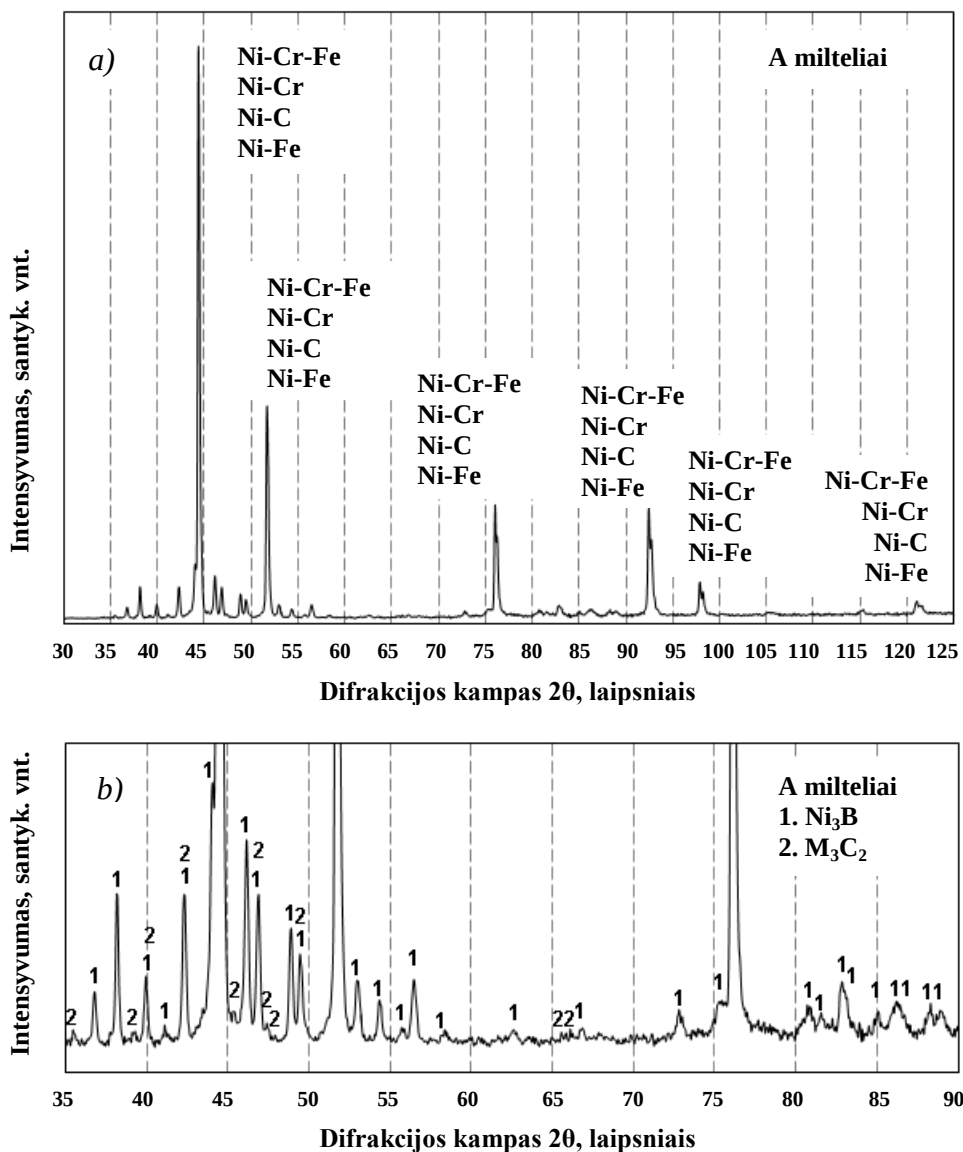
Miltelių mikrostruktūros tyrimais nustatyta, kad dalis nominaliai sferinių dalelių (tiek A, tiek B tipo) iš tikrųjų yra dribsnių, netaisyklingų sferų, suaugusių sferų arba kitos netaisyklingos formos (2.1 pav., *a*, *d*). Didesnis padidinimas (2.1 pav., *b*, *c*, *e*, *f*) leidžia pamatyti smulkią dendritinę grūdelių pirminės kristalizacijos struktūrą. Apžiūrint miltelius su SEM (2.1 pav., *a–d*) taip pat aptikta dalelių su vadinamaisiais „satelitais“ – smulkiomis (tarp jų mažesnio, negu nurodo gamintojas (38–125 μm), dydžio) dalelėmis, išsidėsčiusiomis didesnių dalelių paviršiuose. Tokių „satelitų“ susidarymas yra būdingas atomizacijos būdu gaminamiems milteliams. Dalelės su „satelitais“ mažina miltelių birumą ir suberiamąjį tankį, apsunkina purškimą dėl „satelitų“ atsiskirimo, todėl gaminant miltelius stengiamasi iki minimumo sumažinti dalelių su „satelitais“ susidarymą.



2.1 pav. Purškimo miltelių A (*a–c*) ir B (*d–f*) morfologija ir mikrostruktūra
Fig. 2.1. The morphology and microstructure of A-type powder (*a–c*) and B-type powder (*d–f*)

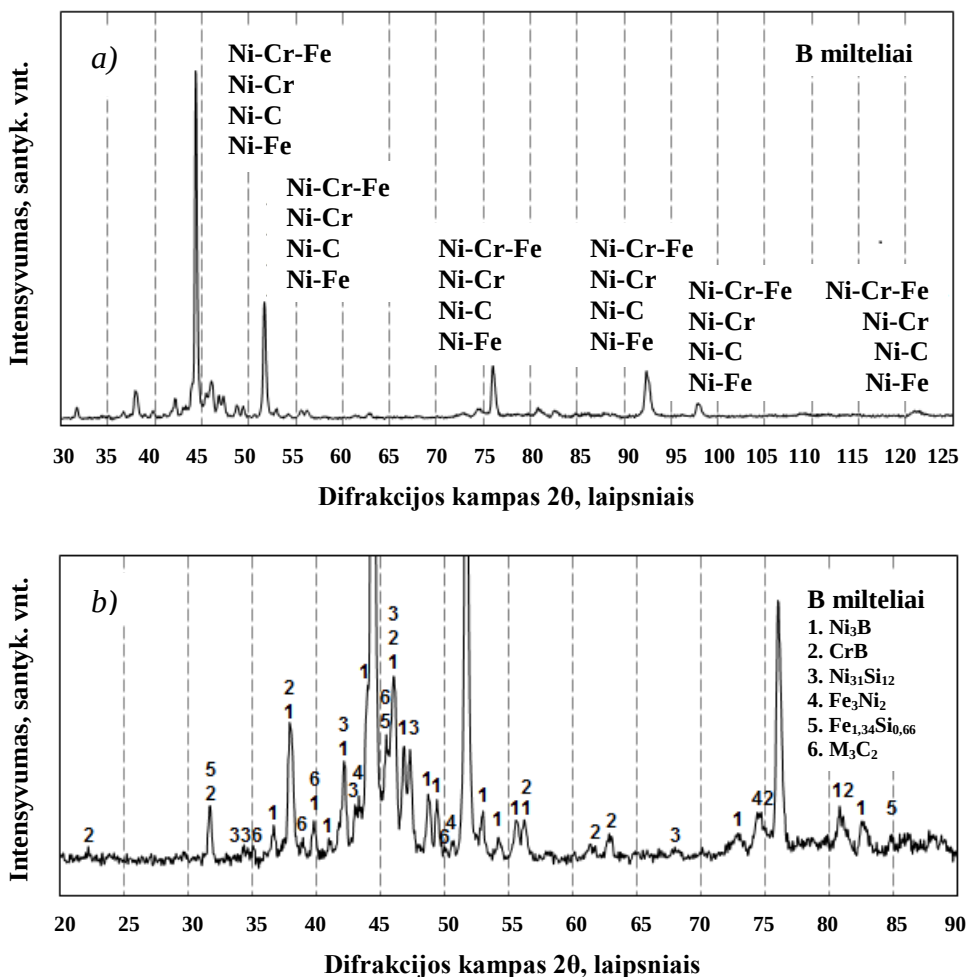
2.2 ir 2.3 paveiksluose pateiktos A ir B miltelių rentgeno difrakcinės kreivės. Pagrindinės kreivių smailės (2.2 pav., *a* ir 2.3 pav., *a*) priklauso Ni su Cr ir kitais elementais junginiams ($\text{Cr}_{1,12}\text{Ni}_{2,88}$, $\text{Cr}_{0,1}\text{Ni}_{0,9}$, NiC, $\text{Ni}_{0,98}\text{C}_{0,02}$, FeNi_3 , $\text{Ni}_{2,9}\text{Cr}_{0,7}\text{Fe}_{0,36}$). Santykinis šių smailių intensyvumas A miltelių kreivėse didesnis negu B miltelių. Iš ko galima teigti, kad A milteliuose šias smailes atitinkančių junginių yra daugiau negu B milteliuose. Mažosios smailės tiek A miltelių (2.2 pav., *b*), tiek B miltelių kreivėse (2.3 pav., *b*) daugiausia priklauso Ni_3B junginiui, kuris šio tipo lydiniuose sudaro savarankišką fazę arba formuoja eutektiką su $\gamma\text{-Ni}$. B miltelių difraktogramoje taip pat aptikta daug mažų smailių,

atitinkančių Ni silicidus, Fe silicidus, Cr boridą (CrB) ir M_3C_2 tipo karbidą. M_3C_2 junginį atitinkančios smailės taip pat aptiktos ir A miltelių difrakcinėje kreivėje.



2.2 pav. A tipo miltelių difrakcinė kreivė (a) ir kreivės dalis mažosioms smailėms analizuoti (b)

Fig. 2.2. XRD pattern of A-type powder (a) and pattern part for small peaks analysis (b)



2.3 pav. B tipo miltelių difrakcinė kreivė (a) ir kreivės dalis mažosioms smailėms analizuoti (b)

Fig. 2.3. XRD pattern of B-type powder (a) and pattern part for small peaks analysis (b)

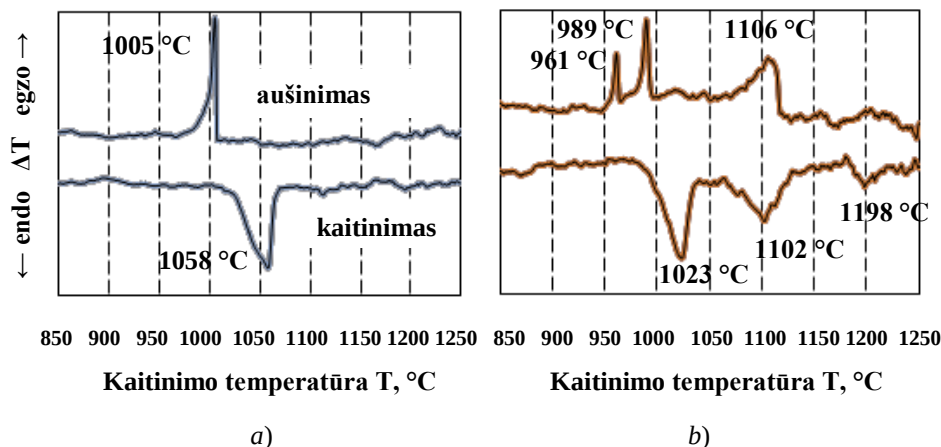
Darbe taip pat atlikta parinktų purškiamųjų miltelių diferencinė terminė analizė (DTA). Bandymai atlikti su DTA/DSC SETARAM LABSYS prietaisu. Aliuminio oksido tiglio su 50 mg bandomųjų miltelių buvo kaitinamas 5N grynumo argono atmosferoje nuo kambario temperatūros iki 1250 °C temperatūros. Temperatūrų intervale nuo kambario iki 750 °C kaitinimo greitis sudarė 50 °C/min, nuo 750 °C iki 1250 °C temperatūros buvo kaitinama 10 °C/min greičiu. Temperatūros skirtumas tarp kaitinamųjų miltelių ir etalono buvo matuojama.

mas ir užrašomas, kaip priklausomybė nuo kaitinimo temperatūros. Rezultatai pateikti 2.4 paveiksle ir 2.4 lentelėje.

Kaitinant A tipo miltelius temperatūrų intervale nuo kambario iki 1250 °C nustatytas tik vienas endoterminis efektas, kurį atitinka smailė (1058 °C) apatinėje A miltelių DTA kreivėje (2.4 pav., a). Kadangi XRD analizės metu nustatyta, kad A miltelius daugiausia sudaro tokie junginiai, kaip $\text{Cr}_{1,12}\text{Ni}_{2,88}$, $\text{Cr}_{0,1}\text{Ni}_{0,9}$, NiC , $\text{Ni}_{0,98}\text{C}_{0,02}$, FeNi_3 , $\text{Ni}_{2,9}\text{Cr}_{0,7}\text{Fe}_{0,36}$ bei Ni_3B (2.2 pav.), greičiausia, šį efektą galima susieti su eutektikos fazės Ni ir B pagrindu išsilydymu. Vienintelis egzoterminis efektas aušinimo metu, greičiausia, susijęs su tos pačios fazės kristalizacija. Iš smailių temperatūrų skirtumo matyti, kad A miltelių kristalizacija vyksta esant ~53 °C peraušimui.

Tiriant tame pačiame temperatūrų intervale B miltelius (2.4 pav., b) buvo užfiksuoti trys endoterminiai efektai, du iš jų stambesni, atitinkantys 1023 °C ir 1102 °C temperatūras. Trečia smailė susidarė esant aukštesnei temperatūrai (1198 °C), kuri gerokai viršija įprastas perlydymo darbinės temperatūras, ir į ją šiuo atveju neatsižvelgiama.

Tokiu būdu DTA rezultatai rodo, kad A milteliuose lydymosi procesai prasideda esant 1011 °C temperatūrai, ypač suintensyvėja esant 1058 °C ir vyksta iki 1070 °C, o aušinant kristalizacijos pabaiga atitinka 967 °C temperatūrą. B milteliams lydymosi procesai vyksta nuo 977 °C iki 1129 °C. Atitinkamai, intervalas, kuris gali būti taikomas perlydymui, yra platesnis, o kristalizacija pasibaigia prie žemesnės 947 °C temperatūros. Bandomojo perlydymo metu šie rezultatai buvo patvirtinti: B milteliai anksčiau pradeda lydytis ir ilgiau išlieka skystos būsenos.



2.4 pav. A miltelių (a) ir B miltelių (b) DTA kreivės
Fig. 2.4. Curves of DTA for A-type (a) and B-type (b) powders

2.4 lentelė. Purškiamų miltelių terminių vyksmų temperatūros nustatytos DTA
Table 2.4. Transition temperatures determined by DTA of spraying powders

Milteliai	Terminių vyksmų temperatūros: smailė /(vyksmo pradžia – pabaiga)	
	Kaitinimas	Aušimas
A	1058 °C / (1011–1070) °C	1005 °C / (1007–967) °C
B	1023 °C / (977–1042) °C	1106 °C / (1121–1058) °C
	1102 °C / (1064–1129) °C	989 °C / (996/994–947) °C
	1198 °C / (1180–1220) °C	961 °C / (996/994–947) °C

Substratui panaudotas S235J0 markės plačiai taikomas karštai valcuotos juostos konstrukcinis plienas. Plieno cheminė sudėtis pateikta 2.5 lentelėje.

2.5 lentelė. Substrato medžiagos cheminė sudėtis, masės % (LST EN 10025-2)
Table 2.5. Chemical composition (in wt.%) of substrate material (LST EN 10025-2)

Medžiaga	C	Mn	P	S	N	Cu	Fe
Plienas S235J0	0,19	1,50	0,040	0,040	0,014	0,60	Likęs (~97,6)

Substrato paruošimas. 100 x 100 x 10 mm bandiniai mechanškai išpjauti iš karštai valcuotos 100 mm pločio juostos ir jų paviršius paruoštas remiantis nurodymais, pateiktais standarte *LST EN 13507 „Terminis purškimas. Metalinių dalių ir komponentų, skirtų terminiam purškimui, paviršių parengiamasis apdorojimas“*. Bandinių paviršius nuvalytas su izopropilo alkoholiu nuo purvo, riebalų ir kitų nešvarumų. Mechanškai (plokščio šlifavimo staklėse) pašalinta oksidų plėvelė, būdinga karštai valcuotiems gaminiams, ir paviršius apdorotas skaldytų grūdinto plieno šratų abrazyvo srautu (srauto slėgis – 0,05 MPa).

2.2. Purškimas ir vibracinio perlydymo bandymai

Purškimas ir perlydymas. Purkštųjų perlydomųjų dangų gamyba numato dviejų pakopų technologiją: miltelių užpurškimas ir užpurkštos dangos perlydymas. Darbe purškimo parametrai parinkti pagal įrangos gamintojo nurodymus ir patikslinti bandomojo purškimo metu. Galutinis užpurkštos dangos storis užtikrintas parinkus atitinkamą purškiamų sluoksnių skaičių. Parametrų atkartojamumas eksperimentų metu užtikrintas pritaikius purškimui pramoninį robotą manipuliatorių Motoman 100, kurio judesių atkartojimo tikslumas yra $\pm 0,08$ mm. Pagrin-

diniai purškimo proceso parametrai pateikti 2.6 lentelėje, purškimui taikoma įranga – 2.7 lentelėje. Purškimo stendo schema pateikta 2.5 paveiksle.

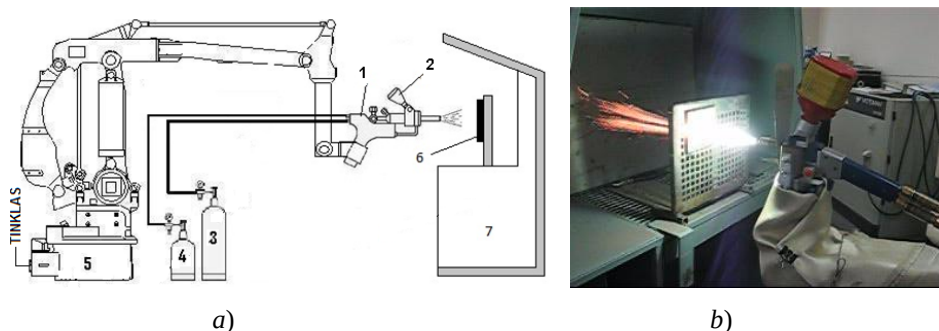
Perlydymui atlikti surinktas stendas, kurį sudarė standartinė perlydymo įranga ir įrenginiai mechaniniams virpesiams gauti – tai nuosekliai sujungti elektros impulsų generatorius, stiprintuvas ir mechaninių virpesių generatorius (2.7 lentelė). Stendo schema pateikta 2.6 paveiksle.

Perlydomos dangos paviršiaus būsenos pasikeitimas yra pagrindinis „indikatorius“, parodantis kada pasiekama perlydymo temperatūra. Terminis ciklas perlydymo metu turi didelę įtaką susidarantiems mikrostruktūrai. Terminio ciklo svyravimai keičia dangos kaitinimo ir aušimo sąlygas. Tai gali sukelti dangos struktūros pasikeitimus, nesusijusius su vibraciniu apdorojimu ir jo parametrais. Siekiant išvengti terminio ciklo svyravimų ir užtikrinti vienodas perlydymo sąlygas visiems bandiniams buvo užtikrintas vienodas įvedamos šilumos kiekis perlydymo metu. Tam buvo kontroliuojama: deguonies ir acetileno dujų tiekimas perlydymo metu; perlydymo degiklio ir bandinio tarpusavio padėtis; perlydymo degiklio judėjimo trajektorija ir greitis. Pagrindiniai perlydymo proceso parametrai pateikti 2.6 lentelėje.

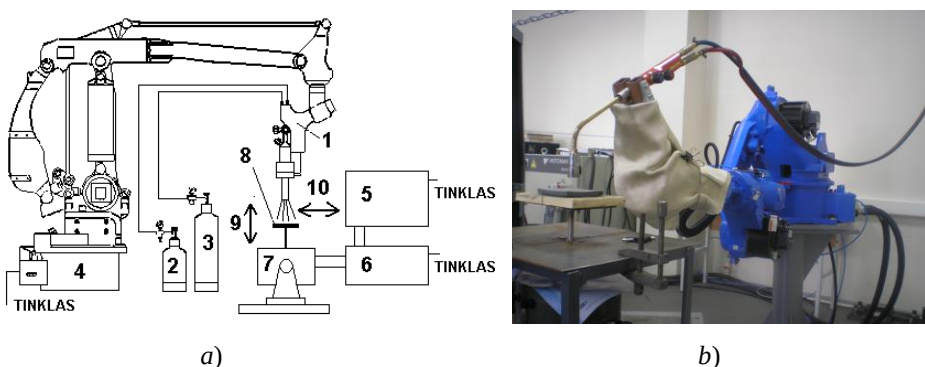
2.6 lentelė. Terminio purškimo ir perlydymo procesų pagrindiniai parametrai

Table 2.6. The main parameters of thermal spray and remelting

Pavadinimas	Apibūdinimas
Substrato pakaitinimas	Neutrali liepsna C_2H_2 / O_2 ~250 °C
Purškimo liepsna	Neutrali liepsna 0,07 MPa C_2H_2 / 0,4 MPa bar O_2
Purškimo atstumas	170 mm
Purškimo greitis/ žingsnis/ sluoksniai	250 mm/s / 5 mm / 8 sluoksniai
Užpurkšto sluoksnio storis	1,2–1,4 mm
Perlydymo liepsna	Neutrali liepsna 0,035 MPa C_2H_2 / 0,4 MPa O_2
Perlydymo temperatūra	~1060 °C (A dangos) / ~1100 °C (B dangos)
Perlydymo laikas	5 min. 10 s (A dangos) / 4 min. 50 s (B dangos)
Aušimas	Ore, 22 °C temperatūroje
Dangos storis po perlydymo	0,970–1,020 mm



2.5 pav. Terminio purškimo stendo schema (a) ir proceso nuotrauka (b):
 1 – purškimo degiklis; 2 – miltelių konteineris; 3, 4 – acetileno ir deguonies balionai;
 5 – robotas manipulatorius; 6 – bandinys; 7 – purškimo kabina
Fig. 2.5. The scheme of thermal spraying equipment (a) and process photograph (b):
 1 – spraying torch; 2 – powder container; 3, 4 – acetylene and oxygen cylinders;
 5 – robot manipulator; 6 – specimen; 7 – spraying cabin



2.6 pav. Perlydymo stendo schema (a) ir stendo pagrindinės dalies nuotrauka (b):
 1 – perlydymo degiklis; 2, 3 – acetileno ir deguonies balionai; 4 – robotas manipulatorius; 5 – elektros impulsų generatorius; 6 – stiprintuvas; 7 – vibratorius;
 8 – bandinys; 9 – vibracijų kryptis I etapo metu; 10 – vibracijų kryptis II ir III etapų metu
Fig. 2.6. The scheme of refusing stand (a) and the photograph of the main part of stand (b):
 1 – refusing torch; 2, 3 – acetylene and oxygen cylinders; 4 – robot manipulator;
 5 – generator; 6 – amplifier; 7 – vibrator; 8 – specimen; 9 – vibrations direction during 1st experiments stage; 10 – vibrations direction during 2nd and 3rd experiments stages

Dujų kiekis buvo kontroliuojamas nustatant vienodą dujų slėgį dujų balionų reduktoriuje ir nustatant į tas pačias padėtis dujų tiekimo reguliatorius perlydymo degiklyje. Kitų parametų kontrolė užtikrinta automatizuojant procesą.

2.7 lentelė. Purškimo ir vibracinio perlydymo įranga**Table 2.7.** Equipment of thermal spraying, refusing, and vibratory treatment

Pavadinimas	Apibūdinimas
Purškimo degiklis	Rototec 80 (Castolin Eutectic)
Perlydymo degiklis	CastoFuse (Castolin Eutectic)
Elektros impulsų generatorius	G3 – 33 (20–20 000 Hz)
Elektros impulsų stiprintuvas	VEB Metra Mess Und Frequenztechnik Radebeul / Typ: LV 102.1 (3–40 000 Hz, 50 W, 3 Ω)
Mechaninių virpesių generatorius	VEB RFT Messelektronik (OTTO SCHON), Dresden / Typ: 11077
Pramoninis robotas manipulatorius	Motoman 100 (Yaskawa)
Vibracijų parametrų matavimo įrenginiai	Akselerometras / Matavimo signalų apdorojimo įrenginys Machine Diagnostics Toolbox Type 9727

Vibracinis apdorojimas ir bandinių žymėjimas. Vibracijos buvo įvedamos dangų perlydymo ir aušimo metu kol bandinių paviršiaus temperatūra pasiekdavo ~500 °C. Vibracinio apdorojimo trukmė sudarė 7 min. 30 s. Vibracinio apdorojimo dažnis buvo keičiamas keičiant generuojamo elektros impulso signalo dažnį. Amplitudė keičiama stiprintuvu keičiant signalo stiprumą. Bandinys standžiai pritvirtinamas prie mechaninių virpesių generatoriaus, nuo kurio perlydymo metu jam buvo perduodami mechaniniai virpesiai. Absoliutinės dažnio ir amplitudės reikšmės buvo matuojamos akselerometru, prijungtu tiesiogiai prie vibruojamos detalės ir sujungtų su matavimo signalų apdorojimo įrenginiu (2.7 lentelė). Palyginimui naudojami bandiniai, perlydyti be vibracijų taikant įprastą perlydymo procedūrą.

Perlydymo bandymai taikant vibracinį apdorojimą atlikti trimis etapais. Pirmo ir antro etapo metu eksperimentai atlikti taikant purškimui A miltelius. Trečiame etape buvo atlikti bandymai su B milteliais.

I etapas. Siekiant aptikti galimo poveikio sritį, I etapo metu eksperimentai buvo atlikti taikant platesnio dažnių diapazono vibracijas nuo 20 Hz iki 10 kHz. Vibravimas vyko su maksimaliomis vibracinio stendo pasiekiamomis amplitudėmis. Mechaniniai virpesiai buvo įvedami statmenai dangos paviršiui. Šio etapo vibracinio apdorojimo parametrai ir atitinkamas bandinių žymėjimas pateikti 2.8 lentelėje. Po perlydymo atlikti dangų mikrostruktūros tyrimai, mikrokietumo ir kietumo matavimai, dilimo bandymai. Įvertintas vibracijų poveikis dangų mikrostruktūrai ir savybėms. Remiantis šių tyrimų ir palyginamosios analizės

rezultatais įvedamų mechaninių virpesių diapazonas tolimesniems bandymams sumažintas iki 50–400 Hz.

2.8 lentelė. I etapo vibracinio apdorojimo parametrai ir bandinių žymėjimas

Table 2.8. Parameters of vibratory treatment of the 1st stage and specimens marking

Vibracinio apdorojimo parametrai	Bandinių serijos žymuo						
	0_NV	0_20	0_100	0_200	0_1000	0_2000	0_10k
Dažnis, Hz	0	20	100	200	1000	2000	10 000
Amplitudė, μm	0	255	57	52	31	10	< 1

II etapas. Antram eksperimentų etapui vibracinio apdorojimo parametrai parinkti siekiant nustatyti atskirai amplitudės ir dažnio poveikį perlydomųjų dangų struktūrai ir savybėms (2.9 lentelė).

2.9 lentelė. II etapo vibracinio apdorojimo parametrai ir bandinių žymėjimas

Table 2.9. Parameters of vibratory treatment of the 2nd stage and specimens marking

Dažnis, Hz	Amplitudė, μm					
	0	25	50	75	115	185
0	A_NV					
50		A_50_25				
75		A_75_25	A_75_50	A_75_75	A_75_115	A_75_185
100		A_100_25	A_100_50	A_100_75	A_100_115	
125		A_125_25	A_125_50	A_125_75		
150		A_150_25	A_150_50			
175		A_175_25				
200		A_200_25				
250		A_250_25				
300		A_300_25				
350		A_350_25				
400		A_400_25				

Bandymų metu virpesiai įvedami lygiagrečiai substratui. Po perlydymo atlikta mikrostruktūros analizė. Dangų mechaninės savybės įvertintos mikrokietumo matavimais. Taip pat įvertintas dangų paviršiaus šiurkštumas. Palyginamosios analizės metu įvertintas vibracinio apdorojimo poveikis Ni pagrindo perlydomosioms dangoms su išreikšta grūdelių mikrostruktūra. Suformuluotos atitinkamos išvados.

III etapas. Trečio etapo eksperimentai atlikti naudojant B miltelius. Skirtingai nuo A dangų, kuriose pagrindinės eksploatacinės savybės priklauso nuo vyraujančios metalinės matricos savybių, B dangose susidaro labai daug kelių tipų kietųjų tarpų, kurių dydis, forma ir pasiskirstymas lemia galutines dangos savybes. Šio etapo eksperimentais buvo siekiama nustatyti galimą vibracijų poveikį kietųjų tarpų dydžiui, formai ir pasiskirstymui. Remiantis ankstesnio etapo rezultatais taikomų vibracijų dažnių diapazonas buvo dar sumažintas ir perlydymas buvo atliktas keičiant vibracinio apdorojimo dažnį nuo 100 Hz iki 200 Hz. 2.10 lentelėje pateikiami parametrai buvo parinkti siekiant įvertinti atskirai dažnio ir amplitudės poveikį.

2.10 lentelė. III etapo vibracinio apdorojimo parametrai ir bandinių žymėjimas

Table 2.10. Parameters of vibratory treatment of the 3rd stage and specimens marking

Dažnis, Hz	Amplitudė, μm				
	0	25	50	75	115
0	B_NV				
100		B_100_25	B_100_50	B_100_75	B_100_115
150		B_150_25			
200		B_200_25			

Tiriant dangas po perlydymo įvertinti mikrostruktūros pokyčiai, atlikti dangų mikrokietumo ir dangų paviršiaus šiurkštumo matavimai, bei korozijos bandymai. Atliktų tyrimų pagrindu įvertintas vibracinio apdorojimo poveikis gausiai legiruotų Ni pagrindo perlydomųjų dangų mikrostruktūrai ir savybėms bei suformuluotos atitinkamos išvados.

2.3. Darbe taikomi tyrimo metodai

2.3.1. Optinė mikroskopija

Optinės mikroskopijos tyrimai atlikti su optiniu mikroskopu *Nicon MA 200* su įrengta vaizdo kamera, sujungta su personaliniu kompiuteriu. Dangų struktūra buvo tirama stebint vaizdą tiesiogiai pro mikroskopo okuliarą bei stebint kompiuterio monitoriuje vaizdą, transliuojamą iš vaizdo kameros. Buvo taikomas padidinimas nuo X 100 iki X 1000.

Užpurkštų dangų skersiniai mikrošlifai paruošti užpilant juos epoksidine derva, šlifuojant, poliruojant ir ėsdinant. Paskutinis poliravimo etapas atliktas su deimantine poliravimo pasta (grūdėtumas iki 1 μm). Ėsdinimui panaudotas

20 ml HCl / 20 ml H₂O / 4 g CuSO₄ tirpalas. Struktūra buvo tiriama po poliravimo ir po ėsdinimo.

Perlydytų dangų skersiniai mikrošlifai paruošti pagal analogišką metodiką. Struktūra buvo tiriama po poliravimo ir po ėsdinimo. Ėsdinimui panaudotas 50 ml HNO₃ / 50 ml CH₃COOH tirpalas.

A tipo dangų mikrostruktūros susmulkėjimo efektui kiekybiškai įvertinti ir palyginti buvo apskaičiuotas grūdelių vidutinis kiekis GVK. Grūdelių kiekio nustatymui buvo panaudotos stačiakampės optinės mikronuotraukos, padarytos esant x500 mikroskopo padidininui. Grūdelių kiekis nustatytas pagal formulę

$$GVK = n_1 + 0,5n_2 + 1, \quad (2.1)$$

kurioje n_1 yra grūdelių, visiškai patekusių į analizuojamą plotą, kiekis; n_2 yra grūdelių, kuriuos kerta analizuojamo ploto kraštinės, kiekis; vienetą (t.y. vieną grūdėlį) sudaro grūdeliai, kuriuos kerta analizuojamo stačiakampio ploto kampai. Mikronuotraukoje analizuojamas mikrošlifo plotas sudarė 14910 μm^2 . Šiame plote apskaičiuotas grūdelių kiekis buvo perskaičiuojamas 25000 μm^2 plotui. Darbe pateikiamos GVK reikšmių vidurkiai, gauti iš kiekvieno bandinio 6 mikronuotraukų analizės rezultatų, ir standartinis nuokrypis σ , apskaičiuotas pagal formulę

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (2.2)$$

kurioje x_i yra i -tojo matavimo metu gauta reikšmė, $\bar{x}$ yra imties (reikšmių) vidurkis ir n yra imties dydis (reikšmių kiekis).

2.3.2. Nuskaitančioji elektroninė mikroskopija ir rentgeno mikroanalizė

Tyrimai atlikti su SEM HITACHI SU-70 nuskaitančiosios elektroninės mikroskopijos (SEM) ir rentgeno mikroanalizės (RMA) prietaisu.

Užpurkštų ir perlydytų dangų mikrostruktūra buvo tiriama SEM metodu, naudojant antrinių elektronų SE ir atspindėtų elektronų BSE detektorius padidinių diapazone nuo X 70 iki X 5000. Analizė atlikta „Field-free“ režimu, taikomu magnetinėms medžiagoms tirti. Prietaisui veikiant šiuo režimu tarp bandinio ir objektyvo lęšių nesusidaro magnetinis laukas. Vidutiniai bandymų parametrai: 15 kV greitinančioji įtampa, 39 μA emisijos srovė, 15 mm atstumas iki bandinio paviršiaus. Elektriniam laidumui padidinti visų bandinių paviršiai buvo padengti plonu anglies sluoksniu garinant anglies elektrodą 10 min.

Struktūros dedamųjų cheminė sudėtis buvo analizuojama taškinės, linijinės ir plokštuminės rentgeno mikroanalizės metodais su energijos dispersijos ir bangos ilgio dispersijos spektrometrais (EDS ir WDS atitinkamai).

Tyrimai atlikti skersiniuose dangų mikrošlifuose, paruoštuose pagal anksčiau aprašytą metodiką.

2.3.3. Rentgeno spindulių difrakcijos analizė

Purškimo miltelių ir perlydytų dangų kokybinė fazinės sudėties analizė atlikta *Philips* rentgeno difraktometru su įrengtu X-Pert goniometru. Rentgeno spinduliuotės Cu K α spektrui išskirti naudotas grafito monochromatorius (difrakcijos plokštuma $\lambda = 0,1541837$ nm). Bandymų parametrai: 40 kV įtampa; 40 mA srovė; difrakcijos kampo 2θ intervalas: 20–120°; nuskaitymo žingsnis – 0,032°; išlaikymo laikas per žingsnį – 16 s; temperatūra – 25 °C.

Tyrimai atlikti perlydytų dangų šlifuotuose ir poliruotuose paviršiuose.

Analizės rezultatai pateikiami rentgenogramoje – kreivėje, kurioje pavaizduotos atsispindėjusių rentgeno spindulių intensyvumo priklausomybės nuo detektoriaus kampo. Fazių identifikavimas atliktas dešifruojant rentgenogramas su atitinkama programine įranga. Vibruotų ir nevibruotų bandinių palyginimas buvo atliktas palyginant smailių intensyvumą ir padėtį rentgenogramose.

2.3.4. Kietumo ir mikrokietumo matavimai

Kietumo matavimai atlikti standartiniu *Vickerso* metodu I etapo metu. Matuota su 10 kg apkrova 2 % matavimo tikslumu ant A tipo bandinių po dilimo bandymų prieš tai atlikus papildomą paviršiaus poliravimą.

Perlydytų dangų mikrokietumo matavimai atlikti poliruotuose skersiniuose mikrošlifuose su *Zwick Roell ZH μ* universaliumi automatizuotu kietmačiu (matavimo paklaida 1 %). Matavimai atlikti *Knopo* metodu su 1 kg apkrova A dangoms ir 500 g apkrova B dangoms.

Darbe pateikiami perlydytų dangų kietumo ir mikrokietumo aritmetiniai vidurkiai ir standartiniai nuokrypiai σ (2.2 formulė), apskaičiuoti prieš tai atmetus mažiausią ir didžiausią reikšmes iš 10 matavimų rezultatų.

Atskirų fazių mikrokietumo matavimai atlikti *Vickerso* metodu su 10 g ir 25 g apkrovomis bei *Knopo* metodu su 10 g apkrova (išlaikymas 10 s).

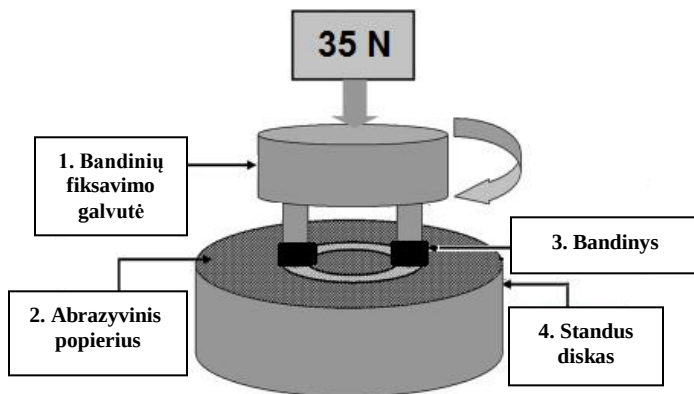
Mikrokietumo pasiskirstymui dangose įvertinti matavimai atlikti *Knopo* metodu su 100 g apkrova A dangoms ir 500 g apkrova B dangoms (išlaikymo laikas 10 s). Kiekvieną mikrokietumo reikšmę, pateiktą pasiskirstymo kreivėse, sudaro 5 matavimų, atliktų nurodytu atstumu nuo sąlyčio linijos, vidurkis. Matuota lygiagrečiai substratui.

2.3.5. Šiurkščio matavimai

Šiurkščio matavimai atlikti *TR200* šiurkščio matuokliu dangų paviršiuose po perlydymo, nuvalius paviršių su izopropilo alkoholiu. Šiurkštis matuotas kiekvienos serijos trijų bandinių paviršiuose. Darbe pateiktos ir palygintos *Ra* parametro išmatuotos reikšmės ir jų vidurkiaiai.

2.3.6. Dilimo bandymai

Perlydytų dangų atsparumas dilimui įvertintas dviejų kūnų sausos trinties dilimo bandymais, atliktais dilimo mašinoje su SiC abrazyviniu popieriumi #200 (grūdelių dydis $58\ \mu\text{m}$). $10 \times 20\ \text{mm}$ bandinukų pora buvo prispaudžiama $35\ \text{N}$ apkrova prie besisukančio abrazyvinio disko ir trinama $16\ 000$ ciklų metu. Dilimo testo schema pateikta 2.7 paveiksle. Siekiant eliminuoti pradinio šiurkščio įtaką dilimo bandymo rezultatams pirmieji 2000 apsisukimų nebuvo vertinami. Rezultatų pradiniu tašku laikomas įspaudų, padaryto *Rokvelo* kietmačio deimantiniu kūginiu antgaliu po pirmųjų 2000 apsisukimų, skersmuo ir bandinuko svoris, išmatuotas tuo pačiu metu. Toliau atliekant bandymus kas 2000 ciklų buvo keičiamas abrazyvinis diskas, sveriami bandinukai ir matuojami įspaudų skersmenys. Bandinių svoris buvo nustatomas analitinėmis svarstyklėmis *Kern 770-14* (padalos vertė – $0,1\ \text{mg}$, verifikavimo reikšmė – $1\ \text{mg}$). Įspaudų skersmuo buvo matuojamas su optiniu mikroskopu, kurio okuliario–mikrometro padalos vertė esant taikytam padidininimui sudarė $1,167\ \mu\text{m}$. Iš įspaudų skersmens pokyčio buvo apskaičiuojamas dilimo metu pašalinto sluoksnio storis.



2.7 pav. Dviejų kūnų sausos trinties dilimo bandymo schema

Fig. 2.7. The scheme of two-body dry sliding wear test: 1 – sample fixing head, 2 – abrasive paper, 3 – sample, 4 – hard disc

2.3.7. Korozinio atsparumo bandymai

Perlydytų dangų korozinis atsparumas įvertintas potenciodinaminės poliarizacijos matavimais. Bandymai atlikti su potenciostatiniu / galvanostatinium *AutoLab PGSTAT32N* prietaisu. Matavimai atlikti kameroje, įrengtoje trimis elektrodais: bandomasis perlydytų dangų poliruotas paviršius, etalonas ir pagalbinis elektrodas. Darbiniame tirpale panaudintas gyvsidabrio chlorido elektrodas buvo panaudotas kaip etalonas. Platinos viela panaudota kaip pagalbinis elektrodas.

Darbe tiriamų dangų atsparumą korozijai užtikrina legiruoto Ni pagrindo metalinė matrica. Geras antikorozinės savybės lemia visų pirma nikelio geba pasyvuotis – formuoti paviršiuje NiO, Ni(OH)₂ arba aukštesnių oksidų sluoksnius. Kietuosius tarpus šiuo požiūriu galima traktuoti, kaip struktūros netobulumo taškus, kuriuose gali vykti pasyvacijos sluoksnio pažeidimai dėl lokalaus anodinio tirpimo – pittingo korozija. Dažniausiai pittingo korozija vyksta chloridų ir kitų agresyvių jonų terpėse. Be to, rūgštinėje terpėje ji labiau tikėtina negu šarminėje arba neutralioje (Cokol *et al.* 1989). Atsižvelgiant į tai korozijos bandymai atlikti 3,4% NaCl ir 0,1 M H₂SO₄ tirpaluose, natūraliai aeruotuose ore esant 21 °C temperatūrai. Šie tirpalai dažniausiai taikomi panašių medžiagų potenciodinaminės poliarizacijos matavimams (Kim and Jang 2011, Qin *et al.* 2010, Wang *et al.* 2011).

Potenciodinaminės poliarizacijos kreivės gautos keičiant potencialą tarp elektrodų 0,5 mV/s greičiu nuo –1500 mV iki 180 mV 3,4% NaCl tirpale ir keičiant potencialą tarp elektrodų 1,0 mV/s greičiu nuo –700 mV iki 1500 mV 0,1 M H₂SO₄ tirpale bei matuojant atitinkamos elektros srovės stiprį.

2.4. Antrojo skyriaus išvados

1. Ištirti eksperimentams parinkti milteliai. SEM / RMA analize nustatyta, kad miltelius sudaro vienaarūšės, smulkios kristalinės struktūros dalelės, turinčios savo paviršiuje oksidų. Dalį miltelių sudaro kitokios, negu sferinės, formos dalelės ir yra smulkių dalelių (tarp jų mažesnio, negu nurodo gamintojas, dydžio), „satelitų“ pavidalu išsidėsčiusių didesnių dalelių paviršiuose.
2. DTA nustatyta, kad A miltelių intensyvaus lydymosi temperatūra $T_{lyd.}$ yra 1058 °C ir *solidus–liquidus* temperatūrų intervalas yra nuo 1011 °C iki 1070 °C. B milteliams $T_{lyd.} = 1023/1102$ °C ir *solidus–liquidus* intervalas yra 977–1129 °C.

Vibracijų poveikio perlydomųjų nikelio pagrindo dangų struktūrai ir savybėms tyrimai

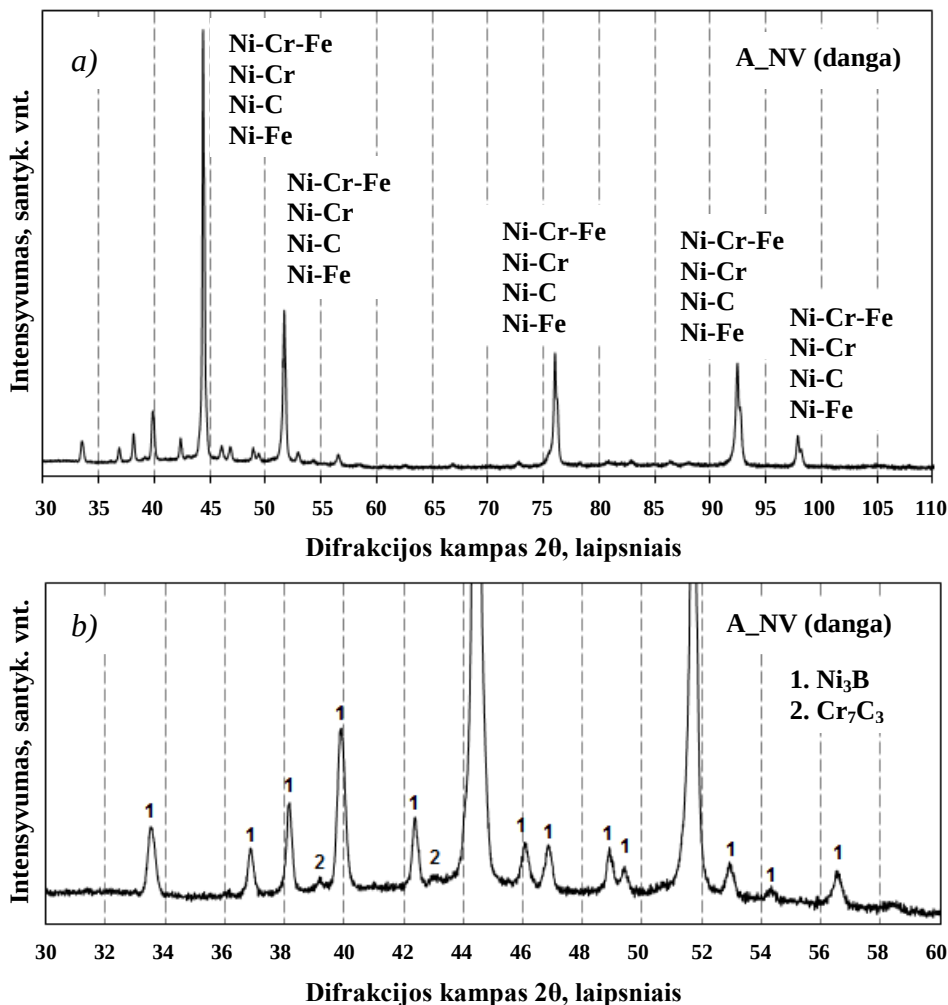
Skyriuje pateikiami ir analizuojami užpurkštų ir perlydytų dangų sandaros ir savybių tyrimo rezultatai. Skyriaus tematika paskelbti du autoriaus straipsniai (Škamat *et al.* 2010, Škamat *et al.* 2012) ir vienas priimtas spaudai (Škamat *et al.* 2014).

3.1. Vibracijų poveikis A tipo dangų sandarai ir savybėms

3.1.1. Vibracijų poveikis perlydytų A dangų fazinei sudėčiai

Perlydytos A tipo dangos difrakcinė kreivė ir padidinta jos dalis pateiktos 3.1 paveiksle. Kreivės pagrindą sudaro serija didelių smailių, kurias galima priskirti prie keleto skirtingų junginių. Difraktogramos analizė parodė, kad tai gali būti $\text{Cr}_{1,12}\text{Ni}_{2,88}$, $\text{Cr}_{0,1}\text{Ni}_{0,9}$, NiC , $\text{Ni}_{0,98}\text{C}_{0,02}$, FeNi_3 , $\text{Ni}_{2,9}\text{Cr}_{0,7}\text{Fe}_{0,36}$ junginiai su kubine centruoto paviršiaus KCP kristaline gardele, kurios parametrai labai ar-

timi gryno nikelio kristalinės gardelės parametrams (3,524 Å). Atsižvelgiant į mikrostruktūros tyrimų rezultatus, kurie pateikiami 3.1.3 skirsnyje, nė vienas iš nurodytų junginių negali būti atmestas ir kiekvienas jų gali būti kietojo tirpalo fazės sudėtyje. Tačiau, greičiausia, dominuoja junginiai su didesniu Ni ir mažesnių kitų elementų kiekiu (pvz. $\text{Cr}_{0,1}\text{Ni}_{0,9}$, $\text{Ni}_{0,98}\text{C}_{0,02}$).



3.1 pav. A tipo perlydytos dangos difrakcinė kreivė (a) ir kreivės dalis mažosioms smailėms analizuoti (b)

Fig. 3.1. XRD pattern of A-type refused coating (a) and part of pattern for small peaks analysis (b)

Kaip ir A miltelių difraktogramoje (2.2 pav.), A dangų difrakcinėje kreivėje didelių smailių intensyvumas palyginti su mažųjų smailių intensyvumu yra didesnis, negu B dangų difraktogramoje (3.21 pav.). Šie rezultatai parodo, kad šias smailes atitinkančių junginių santykinis kiekis A dangose yra didesnis negu B dangose.

Pagrindinė mažųjų smailių dalis A tipo perlydytų dangų difraktogramoje (3.1 pav., *b*) atitinka nikelio ir boro junginį Ni_3B , kuris gali sudaryti savarankišką fazę arba būdingą $\gamma\text{-Ni/Ni}_3\text{B}$ eutektiką. Taip pat pavyko identifikuoti silpnai išreikštas M_7C_3 tipo karbido smailes. Skirtingos kristalizacijos sąlygos miltelių atomizacijos metu ir dangų perlydymo metu lėmė skirtingų vyraujančių karbidų tipų susidarymą. Kitų galimų fazių (tarp jų ir kitų karbidų) santykinis kiekis bendrame mikrostruktūros tūryje A tipo lydinyje gali būti labai nedidelis. Todėl kitų smailių nebuvimas difrakcinėje kreivėje neleidžia teigti, kad kitų junginių nėra. Taip, A tipo difraktogramose neaptikta jokių Si junginių arba kitų tipų karbidų. Nors perlydytų dangų SEM/RMA analizės metu nustatytas reikšmingas Si kiekis $\gamma\text{-Ni}$ fazėje ir mažiausiai du karbidų tipai (3.6 pav., *c*).

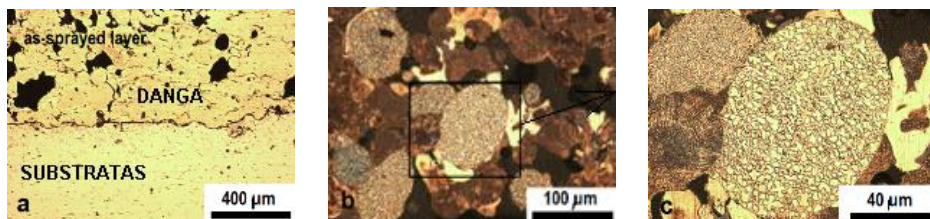
C priede pateiktos vibruotų dangų difrakcinės kreivės. Analizuojant A tipo vibruotų dangų difraktogramas nustatyta, kad jas sudaro tokios pat smailės, kaip ir nevibruotuose etalonuose. Nustatyti skirtumai daugiausia susiję su smailių intensyvumais. Nedideli smailių intensyvumų pokyčiai nustatyti lyginant tos pačios nevibruotos dangos difraktogramas, gautas atliekant matavimus skirtingose vietose (darbe nepateikiama). Todėl, greičiausia, ir vienu, ir kitu atveju smailių intensyvumų pokyčiai susiję su nedideliais mikrostruktūros netolygumais ir vibracinis apdorojimas neturi įtakos perlydomųjų dangų fazinei sudėčiai.

3.1.2. Užpurkštų A dangų mikrostruktūra

Užpurkštų A tipo dangų struktūra buvo tiriama SEM, RMA ir optinės mikroskopijos metodais. Rezultatai pateikti 3.2. ir 3.3 paveiksluose ir 3.1 lentelėje. Skersinio mikrošlifto nuotraukoje (3.2 pav., *a*) matoma aiški sąlyčio linija tarp dangos ir substrato bei atskirų dalelių ribas. Daugumos dalelių forma yra beveik nepakitusi, tarp dalelių yra daug tuštumų. Stebint mikrostruktūrą prie didesnių padidinių matyti, kad neišsilydžiusių dalelių kristalinė mikrostruktūra taip pat mažai skiriasi nuo pradinių miltelių mikrostruktūros.

RMA nustatyta, kad tuštumos dalinai užpildytos apsilydžiusiomis dalelėmis ir fazėmis su dideliu oksidų kiekiu (3.1 lentelė, 3.3 pav.).

Tokiu būdu tiriamos dangos po purškimo turi mikrostruktūrą, pasižyminčią silpnu dangos ir substrato sukibimu, dideliu tuštumų ir oksidų kiekiu. Purškimo metu daugelis dalelių mažai paveiktos šilumos ir tik nedidelė miltelių dalis išsilydė. Tai, greičiausia, mažesnės dalelės, kurios įkaista greičiau, arba dalelės, patekusios į purškimo srauto centrą, kur temperatūra aukštesnė.

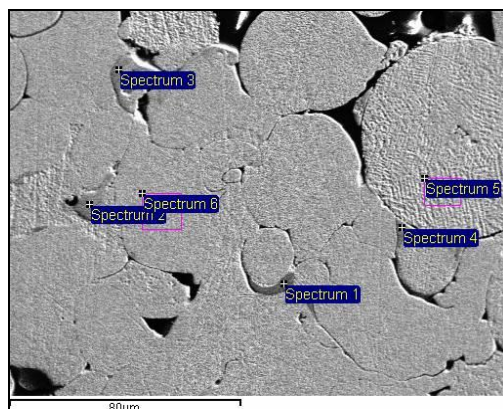


3.2 pav. Užpurkštos A dangos mikrostruktūra esant skirtingam padidiniui
Fig. 3.2. The microstructure of as-sprayed A-type coating of different magnifications

3.1 lentelė. Užpurkštos A dangos nurodytų sričių (3.4 pav.) cheminė sudėtis (išskyrus C ir B)

Table 3.1. Chemical composition of denoted areas of as-sprayed coating (Fig. 3.4) (with the exception of C and B)

Analizuojama sritis	Cheminių elementų kiekis, atomų % (EDS)				
	O–K	Si–K	Cr–K	Fe–K	Ni–K
Sritis 1 (Spectrum 1)	57,79	10,41	23,06	0,88	7,85
Sritis 2 (Spectrum 2)	47,43	0,92	9,87	2,67	39,1
Sritis 3 (Spectrum 3)	24,35	3,18	13,56	3,35	55,55
Sritis 4 (Spectrum 4)	6	5,21	12,18	2,63	73,97
Sritis 5 (Spectrum 5)	1,15	5,73	11,35	2,82	78,96
Sritis 6 (Spectrum 6)	0,25	5,8	9,99	2,92	81,04



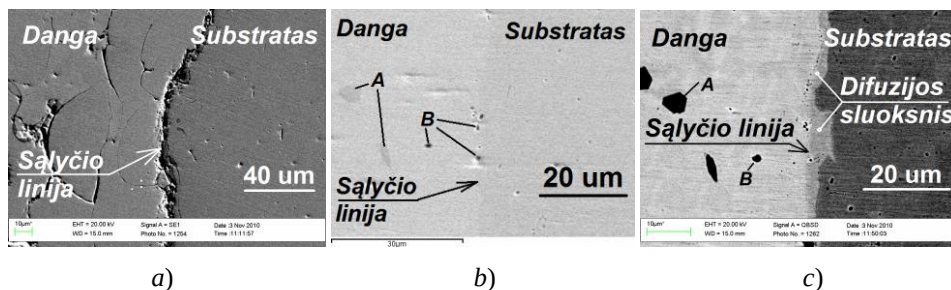
3.3 pav. Užpurkštos dangos mikrostruktūra su nurodytomis rentgeno mikroanalizės sritimis

Fig. 3.3. Microstructure of as-sprayed coating with denoted areas of X-ray microanalysis

3.1.3. Perlydytų A dangų mikrostruktūra

Po perlydymo dangų mikrostruktūra buvo tiriama SEM ir optinės mikroskopijos metodais. Elementinė atskirų fazių ir sričių sudėtis buvo nustatoma rentgeno mikroanalizės RMA metodu.

3.4 paveiksle pateiktos bandinių skersinių mikrošlifų mikronuotraukos po purškimo (3.4 pav., *a*) ir po perlydymo (3.4 pav., *b*, *c*), iš kurių matyti, kad vietoj aiškios sąlyčio linijos, susidariusios purškimo metu, po perlydymo tarp substrato ir dangos susiformavo glotnus perėjimas. Nustatyta, kad dangas sudaro vientisas sluoksnis, dangos ir substrato sąlyčio sritis yra neriški ir matoma tik dėl nedidelio substrato ir dangos kontrasto skirtumo. Tai yra būdinga perlydomosioms dangoms, kadangi perlydymo procedūros pagrindinis tikslas sumažinti prieš tai užpurkšto sluoksnio akytumą ir pagerinti dangos ir substrato sukibimą – *adheziją*. Plonas sluoksnis prie sąlyčio linijos iš substrato pusės aptiktas stebint mikrošlifo paviršiaus vaizdą su kompoziciniu kontrastu (3.4 pav., *c*). RMA metu šiame sluoksnyje nustatytas nedidelis, apie 8 %, nikelio atomų kiekis (3.2 lentelė, 3.5 pav.). Tuo pačiu metu dangoje prie sąlyčio linijos nustatytas apie 6 % geležies atomų kiekis, kuris beveik du kartus viršija vidutinį geležies atomų kiekį pagrindiniame dangos sluoksnyje. Šie rezultatai rodo, kad perlydymo metu ir po jo vyko abipusė difuzija, dėl kurios dangos ir substrato sąlyčio srityje susidarė tvirtas metalurginis ryšis. Minimalus porų kiekis pačioje dangoje ir sąlyčio srityje parodo, kad perlydymas atliktas taikant optimalius parametrus.



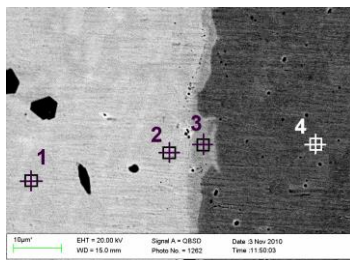
3.4 pav. A tipo bandinių poliruotų skersinių mikrošlifų mikronuotraukos: *a* – danga po purškimo; *b* – danga po perlydymo be vibracijos; *c* – danga po perlydymo be vibracijos; A – kietieji intarpai; B – poros

Fig. 3.4. Micrographs of polished transverse cross-sections of A type samples:
a – as-sprayed coating; *b* – unvibrated coating after refusing;
c – unvibrated coating after refusing; A – hard inclusions; B – pores

3.2 lentelė. Perlydytos A dangos, difuzinių sričių ir substrato nurodytų sričių (3.6 pav.) cheminė sudėtis (išskyrus C ir B)

Table 3.2. Chemical composition (with the exception of C and B) of denoted areas (Fig. 3.6) of refused A-type coating, diffusion zones, and substrate

Analizuojama sritis	Cheminių elementų kiekis, atomų % (EDS)				
	O–K	Si–K	Cr–K	Fe–K	Ni–K
Sritis 1 (Spectrum 1)	0,54	6,32	9,35	3,61	80,18
Sritis 2 (Spectrum 2)	0,72	5,44	10,87	6,24	76,73
Sritis 3 (Spectrum 3)	1,02	0,60	1,23	89,40	7,76
Sritis 4 (Spectrum 4)	1,08	0,35	0,15	98,24	0,19



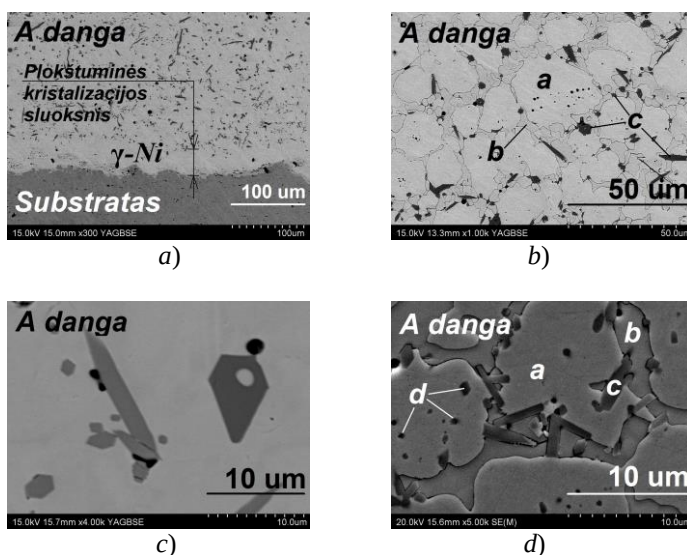
3.5 pav. Perlydyto be vibracijų A tipo bandinio poliruoto skersinio mikrošlifio mikronuotrauka su nurodytomis rentgeno mikroanalizės sritimis: 1 – danga; difuzinės sritys iš dangos 2 ir substrato 3 pusių; 4 – substratas

Fig. 3.5. Micrograph of polished transverse cross-sections of unvibrated A-type samples after refusing with denoted areas of X-ray microanalysis: 1 – coating; diffusion zones from the coating side 2 and from the substrate side 3; 4 – substrate

Nagrinėjant dangų mikrostruktūrą vertikalčiai nuo sąlyčio srities iki dangos paviršiaus, matyti, kad dangų struktūros susidarymas prasideda plonam vienfaziam sluoksniui kristalizuojantis ant substrato paviršiaus (3.6 pav., a). Tokio plokštuminės kristalizacijos sluoksnio susidarymas prie sąlyčio linijos paaiškinamas išskirtinėmis kristalizacijos sąlygomis šioje srityje. Masyvus ir palyginti šaltas substratas šiuo atveju intensyviai nuveda šilumą, todėl susidaro didelis temperatūros gradientas G . Iš kitos pusės danga yra kaitinama, todėl kristalizacijos proceso greitis V mažas. Esant pakankamai dideliui G/V santykiui vyksta plokštuminė kristalizacija (Kurz and Triverdi 1994, Navas *et al.* 2006).

Iš karto virš šio sluoksnio prasideda pagrindinis dangos sluoksnis, kurį sudaro metalinė plastiška matrica, sustiprinta nedideliu kiekiu kietųjų interpu (3.6 pav., b), pakankamai tolygiai pasiskirsčiusių nedideliuose dangos tūriuose. Metalinę matricą sudaro dvi fazės: pirminė netaisyklingų grūdelių fazė ir tarpgrūdėlinis tinklas. Rentgeno mikroanalizė parodė, kad abiejų fazių pagrindą suda-

ro nikelis (3.3 lentelė, 3.7 pav.). Nustatyta, kad pirminėje fazėje be nikelio yra apie 10 % Cr, šioje fazėje yra susikonscentravęs beveik visas silicis (6 % Si) ir yra daugiausia geležies (3,3 % Fe). Sugretinus šiuos rezultatus su XRD rezultatais pirminė fazė identifikuojama kaip γ -Ni kietasis tirpalas. Fazėje tarp grūdelių be nikelio aptiktas boras (3.7 pav., *MaxRay boras*). Kadangi XRD nustatytas Ni_3B junginys, tarpgrūdėlinį tinklą greičiausia sudaro γ -Ni/ Ni_3B eutektiką, būdingą šio tipo lydinams. Šioje fazėje taip pat nustatyta apie 6 % Cr, apie 0,36 % Si ir apie 1,8 % Fe (3.3 lentelė). Kadangi EDS jautrio paprastai nepakanka borui analizuoti, pateiktus skaičius galima naudoti tik apytiksliam elementų santykio vertinimui šioje fazėje.

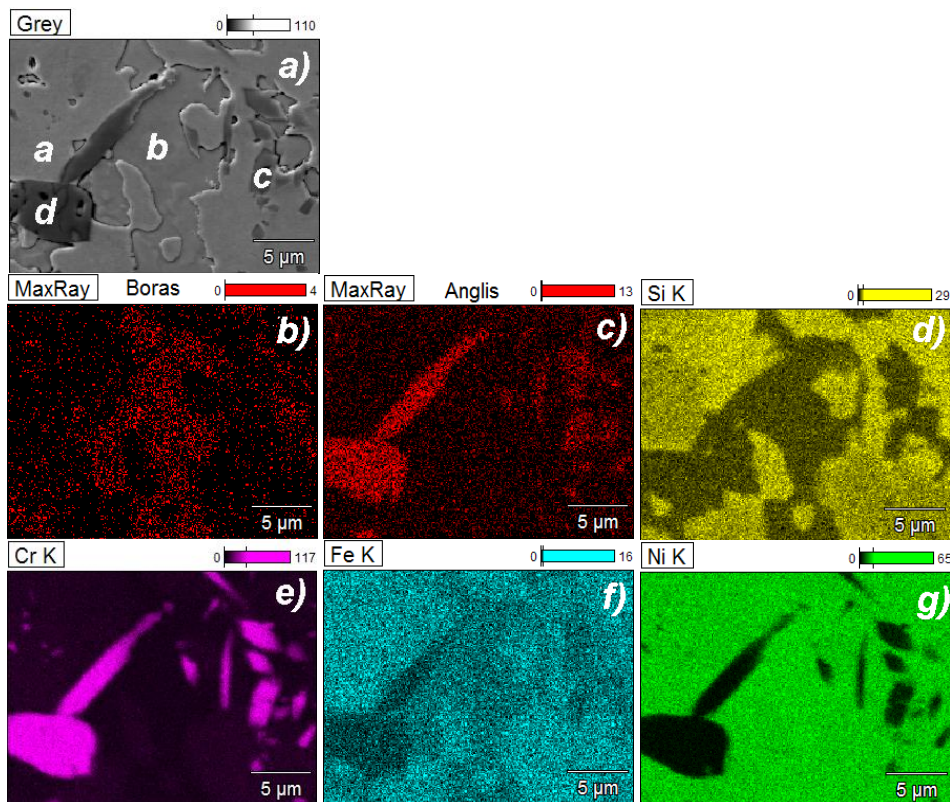


3.6 pav. Perlydyto be vibracijų A tipo bandinio skersinio mikrošlifio mikronuotraukos: (a) sąlyčio sritis; (b–d) dangos mikrostruktūra; a – γ -Ni fazė; b – Ni-B fazė; c – karbidai; d – labai smulkus kietieji intarpai

Fig. 3.6. Micrograph of transverse cross-sections of unvibrated A-type samples after refusing: (a) interface; (b–d) coating microstructure; a – γ -Ni phase; b – Ni-B phase; c – carbides; d – fine hard precipitates

Stebint neesdintą mikrostruktūrą prie skirtingų padidininimų pastebėta, kad kietųjų intarpų fazę šiuo atveju sudaro skirtingo dydžio (nuo 1 μm ir mažiau iki keliasdešimt μm) ir formos elementai (3.6 pav., b ir c). Daugiausia jų yra tarp pirminės fazės grūdelių arba jų pakraščiuose, tačiau pasitaiko labai smulkių dispersinių kietųjų intarpų, pasiskirsčiusių pačiuose grūdeliuose (3.6 pav., d). Iš RMA rezultatų matyti, kad tai yra chromo ir anglies junginiai – chromo karbidai (3.3 lentelė, 3.7 pav.). Pagal Cr–C būsenos diagramą chromas su anglimi sudaro tris karbidų tipus: Cr_3C_2 , Cr_7C_3 ir Cr_{23}C_6 (Плинер *et al.* 1965). Tik vienas iš jų –

Cr_7C_3 – nustatytas XRD analizės metu (3.1 pav.). Tačiau skirtingas kietosios fazės elementų kompozicinis kontrastas rodo, kad yra mažiausiai du nevienodos cheminės sudėties junginiai (3.7 pav., c). Tai patvirtina taškinė RMA bei plokštuminis elementų pasiskirstymas (3.3 lentelė, 3.7 pav.). Be chromo ir anglies šviesesniuose tarpuose aptikta taip pat apie 8 % nikelio (3.3 lentelė). Kitų elementų kiekis kietosios fazės elementuose nežymus.



3.7 pav. Perlydytos be vibracijų A dangos rentgeno mikroanalizė: (a) analizuojamas mikrostruktūros plotas; (b–g) nurodytų cheminių elementų pasiskirstymas analizuojamame plote; a – γ -Ni fazė; b – Ni-B fazė; c – „šviesūs“ karbidai; d – „tamsūs“ karbidai

Fig. 3.7. X-ray microanalysis of unvibrated A-type coating after refusing: (a) area of analysis; (b–g) chemical mapping; a – γ -Ni phase; b – Ni-B phase; c – „light“ carbides; d – „dark“ carbides

Yra žinoma, kad EDS jautrio nepakanka elementams su atominiu numeriu mažiau 10 patikimai analizuoti ir kai kuriuose darbuose (pvz. Liyanage *et al.*

2010) parodyta, kad EDS gaunami šių elementų kiekiai paprastai yra didesni už tikruosius (Liyanage *et al.* 2010 darbe skirtumas sudarė apie 10–20 %). Šiame darbe EDS analizės metu tamsiau atrodančiuose tarpuose nustatyta apie 40 % anglies, šviesesniuose – apie 30 % (3.3 lentelė). Kadangi tikrieji kiekiai, greičiausia, yra mažesni, galima teigti, kad iš trijų galimų chromo karbidų šio tipo dangoje susidarė du žemesnieji – Cr_{23}C_6 ir Cr_7C_3 .

3.3 lentelė. Perlydytos A dangos struktūros elementų cheminė sudėtis (išskyrus B)

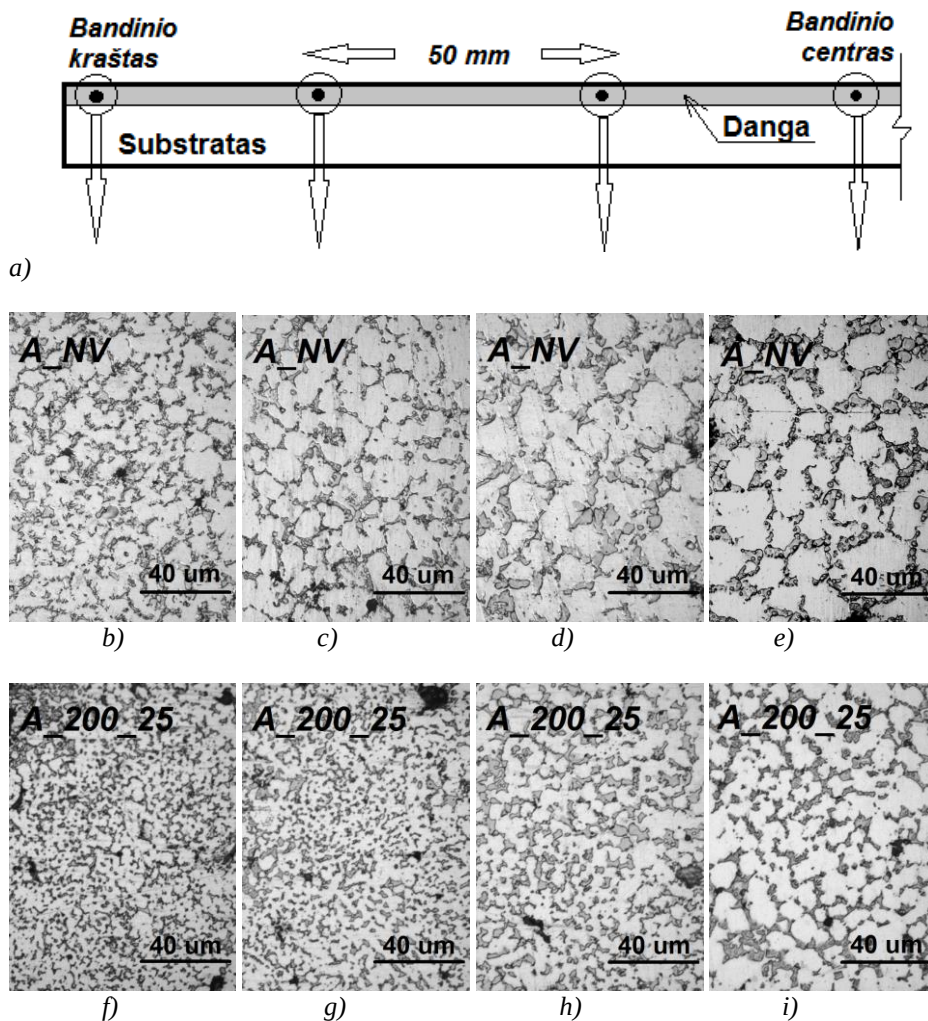
Table 3.3. Chemical composition of structural constituents of refused A-type coating (with the exception of B)

Analizės sritis	Cheminių elementų kiekis, atomų % (EDS)				
	C–K	Si–K	Cr–K	Fe–K	Ni–K
γ -Ni fazė	-	5,87–6,44	9,74–9,82	3,29–3,35	80,46–81,04
Ni–B fazė	-	0,26–0,47	6,08–6,35	1,78–1,79	91,38–91,89
“šviesūs” karbidai	31,63–31,77	0,26	58,96–59,57	0,96–1,06	7,70–8,08
“tamsūs” karbidai	42,38–42,82	0,13	55,06–55,65	0,38	1,58–1,99

Sugretinus XRD, SEM, RMA metu gautus rezultatus ir literatūros šaltinių duomenis galima apibendrinti, kad A tipo dangų mikrostruktūrą sudaro dvifazė γ -Ni kietojo tirpalo ir γ -Ni/ Ni_3B eutektikos matrica, sustiprinta mažiausiai dviejų tipų karbidais, vienas iš kurių Cr_7C_3 , o kitas, greičiausia, $(\text{Cr},\text{Ni})_{23}\text{C}_6$.

3.1.4. Vibracijų poveikis perlydytų A dangų mikrostruktūrai

Nagrinėjant A dangų mikrostruktūrą skersiniuose mikrošlifuose pastebėta, kad prie bandinio krašto, kur perlydytos dangos aušimas vyksta sparčiau, susiformuoja kelis kartus smulkesnė struktūra negu bandinio centrinėje dalyje, kur temperatūra krinta lėčiau. Toks grūdelių dydžio kryptingas sumažėjimas nuo bandinio centro link krašto nustatytas visuose tirtose dangose. 3.8 paveiksle pateikta bandinių skersinių mikrošlifų schema (3.8 pav., a) ir nurodytų sričių mikrostruktūros (3.8 pav., b–i). Toliau darbe lyginamos tik centrinės bandinio dalies mikrostruktūros.



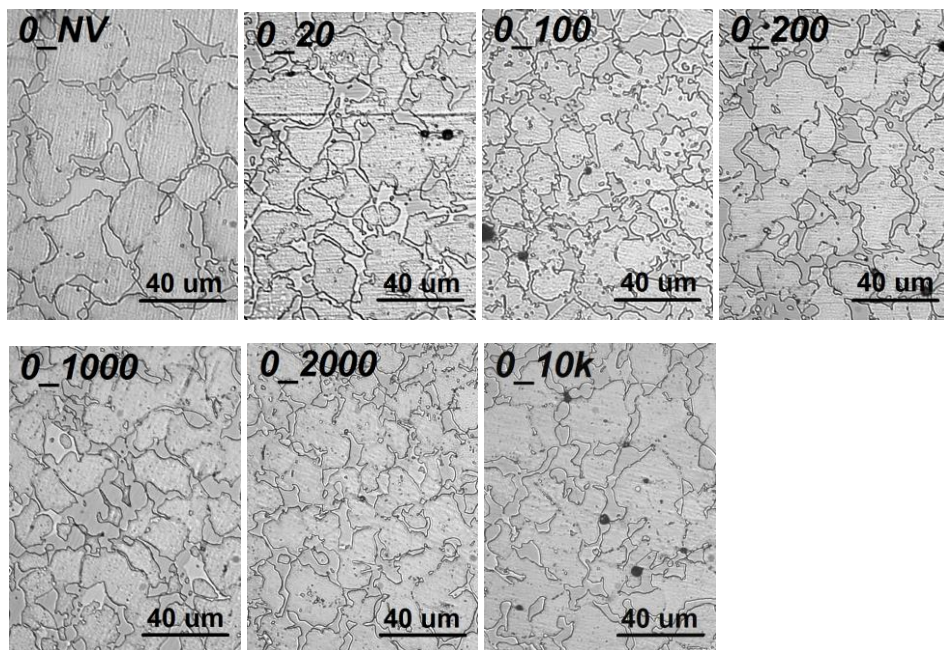
3.8 pav. A dangų skersinių mikrošlifų schema (a) ir parodytų sričių mikrostruktūros: nevibruotos dangos (b–e) ir vibruotos A_200_25 dangos (f–i)

Fig. 3.8. The scheme of A-type coatings cross-sections and microstructures of denoted areas: (b–e) unvibrated coating, (f–i) vibrated A_200_25 coating

Pagrindinis skirtumas, aptiktas lyginant A tipo vibruotas dangas su nevibruotu A tipo etalonu I ir II etapų metu, yra struktūros susmulkėjimas, kurį galima paaiškinti tuo, kad besikristalizuojančiame lydinyje sklindanti vibracijos banga nulaužo augančių kristalitų šakas, tokiu būdu neleisdama išaugti jau augantiems kristalams ir sudarydama papildomus kristalizacijos centrus iš kristalų nuolaužų. Kitų esminių skirtumų, susijusių su mikrostruktūros elementų forma, dydžiu,

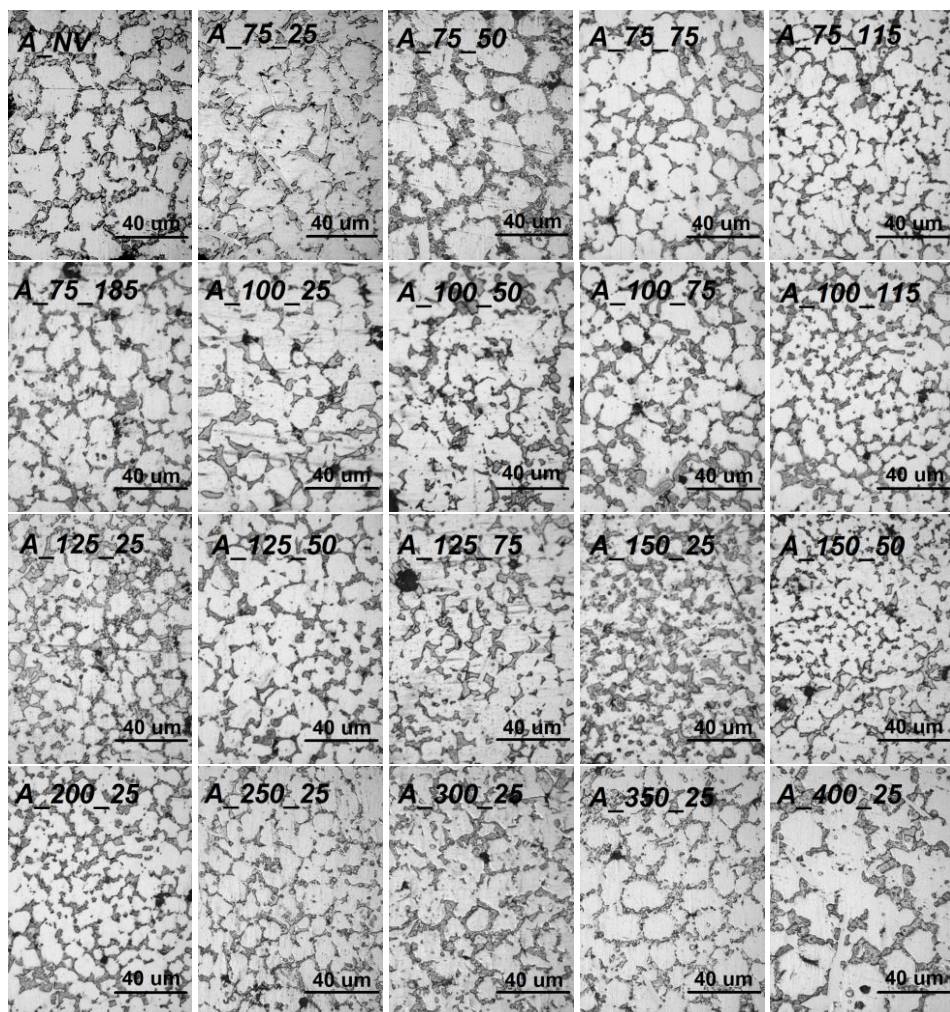
išsidėstymu, naujų struktūrinių elementų susidarymu arba esamų elementų išnykimu, nepastebėta.

3.9 ir 3.10 paveiksluose pateiktos dangų mikrostruktūrų nuotraukos, iš kurių matyti, kad skirtingų parametrų vibracijos paveiktas kristalizacijos procesas suformavo skirtingo dydžio grūdėlius. I eksperimentų etapo metu taikant statmenas vibracijas smulkesnė mikrostruktūra susiformavo visuose vibruotose dangose (3.9 pav.). Smulkiausia struktūra susiformavo dangose, vibruotose 100 Hz dažniu (3.9 pav., *0_100*). Šiek tiek silpnesnis grūdėlių susmulkėjimo efektas išsilaiškė padidinus dažnį iki 200 Hz, o vėliau – iki 1000 ir 2000 Hz. Silpniausią poveikį grūdo dydžiui turėjo 20 Hz ir 10 kHz dažnio mechaniniai virpesiai. II etapo metu, įvedant vibracijas lygiagrečiai substratui, mikrostruktūros susmulkėjimas taip pat buvo aptiktas daugelyje vibruotų dangų (3.10 pav.). Taip, stipriai išreikštas grūdėlių susmulkėjimas nustatytas bandiniuose *A_75_115*, *A_100_115*, *A_125_25*, *A_150_50*, *A_200_25*. Mikrostruktūros susmulkėjimo efektui kiekybiškai įvertinti ir palyginti buvo apskaičiuotas grūdėlių vidutinis kiekis GVK tam tikrame mikrošlifų plote. Rezultatai pateikiami 3.11–3.13 paveiksluose.



3.9 pav. A dangų mikrostruktūros grūdėlių dydžio palyginimui (I etapas)

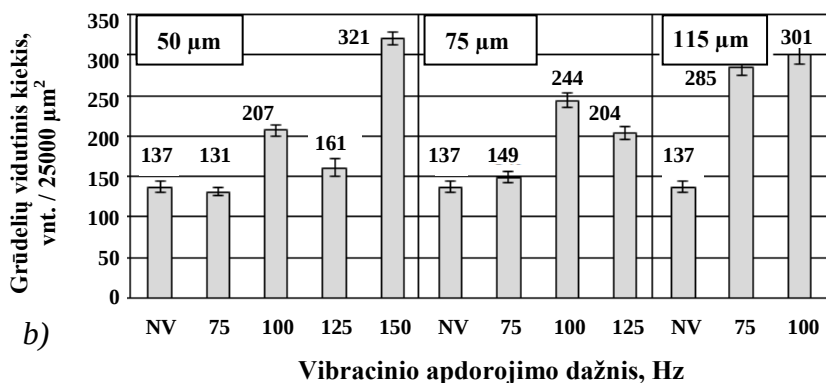
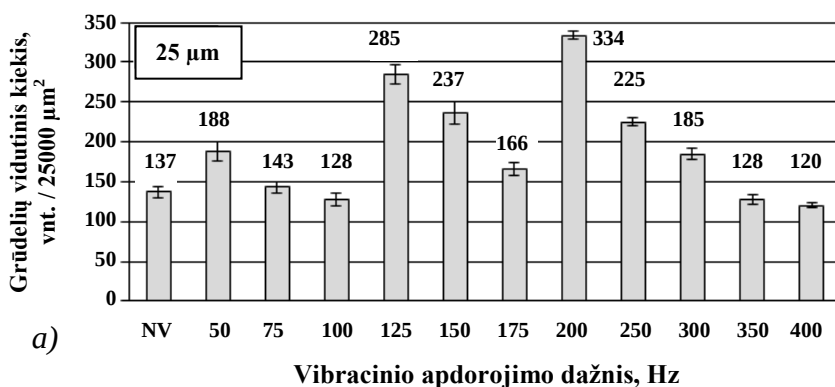
Fig. 3.9. The microstructures of A-type coatings for the comparison of grain size (I stage)



3.10 pav. A dangų mikrostruktūros grūdelių dydžio palyginimui (II etapas)
Fig. 3.10. The microstructures of A-type coatings for the comparison of grain size
 (II stage)

3.11 ir 3.12 paveiksluose pateiktos grūdelių vidutinio kiekio priklausomybės nuo vibracinio apdorojimo dažnio ir amplitudės. Dažnio įtakos geriausią vaizdinį suteikia pirmoji pavaizduota diagrama, kadangi ją sudaro didžiausia bandinių serijų seka. Iš šios priklausomybės matyti, kad nuosekliai didinančią dažnį esant pastoviai 25 μm amplitudei struktūros susmulkėjimo stipresnis efektas pasireiškia periodiškai. Trys šuoliai su 75 Hz intervalu užfiksuoti taikant vibracijas nuo 50 Hz iki 400 Hz. Pirmas šuolis atitinka 50 Hz dažnį, kiti du – 125 Hz ir 200 Hz dažnius atitinkamai (3.11 pav., a). Be to, didėjant dažniui didėja ir šuolių

intensyvumas ir stipriausias efektas nustatytas dangose, vibruotose esant 200 Hz ir 25 μm vibracijų parametrams (3.11 pav., a). Šiose dangose vidutinis grūdelių kiekis 25 000 μm^2 plote sudarė 334, ir tai yra ~2,4 karto daugiau, negu nevibruotose etalonuose. Iš karto už šuolio grūdelių susmulkėjimo efektas palaipsniui mažėja kol grūdelių dydis pasiekia lygį, artimą nevibruotų bandinių lygiui.



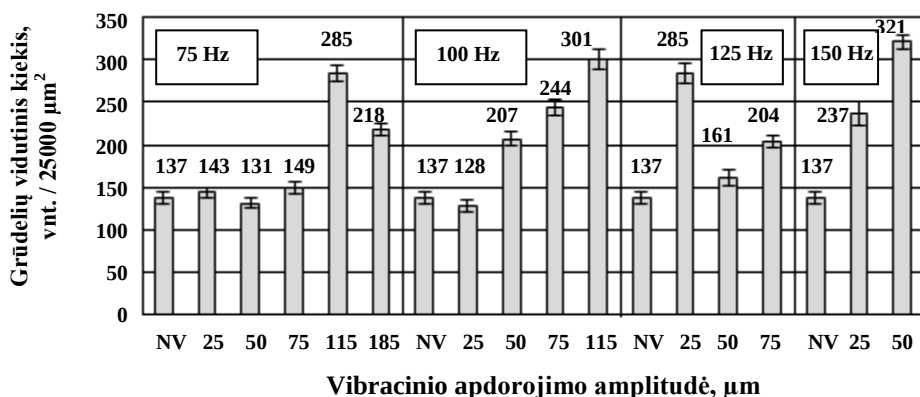
3.11 pav. Grūdelių vidutinio kiekio priklausomybės nuo vibracinio apdorojimo dažnio esant pastoviai amplitudei 25 μm (a) ir esant pastovioms amplitudėms 50 μm , 75 μm ir 115 μm (b): NV – nevibruotų bandinių serija

Fig. 3.11. The dependence of grains average number on the frequency of vibratory treatment under constant amplitude of 25 μm (a) and under constant amplitudes of 50 μm , 75 μm , and 115 μm (b): NV – series of unvibrated samples

Struktūros sustambėjimas nagrinėjamoje sekoje nustatytas dviejų paskutinių serijų bandiniuose (3.11 pav., a, 350 Hz ir 400 Hz). Stambesni grūdeliai gerai

matomi mikrostruktūros nuotraukose (3.10 pav., A_350_25 ir A_400_25). Stambsnės struktūros susidarymą, greičiausia, galima paaiškinti tuo, kad vibracijos turėjo poveikį šilumos nuvedimo procesui, dėl ko kristalizacijos pradžioje susiformavo ribotas kristalizacijos užuomazgų skaičius.

Tiriant amplitudės įtaką susidarantių grūdelių dydžiui (3.12 pav.) pastebėta, kad nagrinėjamame diapazone kiekvienam dažniui būdinga tam tikra amplitudė, kuriai esant pasiekiamas maksimalus efektas. 75 Hz, 100 Hz ir 150 Hz sekose taip pat matyti grūdelių kiekio tendenciją didėti kartu su taikoma vibracijų amplitude. Labai panašūs grūdelių kiekiai gauti esant skirtingiems dažniams (75 Hz/115 μm , 100 Hz/115 μm , 125 Hz/25 μm , 150 Hz/50 μm). Tai parodo, kad panašus struktūros smulkinimo efektas gali būti pasiektas parenkant skirtingus vibracinio apdorojimo dažnio ir amplitudės derinius.



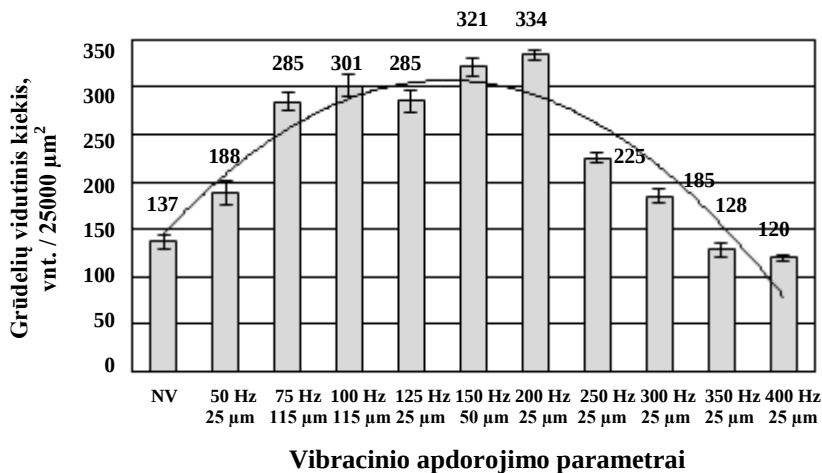
3.12 pav. Grūdelių vidutinio kiekio priklausomybės nuo vibracinio apdorojimo amplitudės esant pastoviams 75 Hz, 100 Hz, 125 Hz ir 150 Hz dažniams:

NV – nevibruotų bandinių serija

Fig. 3.12. The dependence of grains average number on the amplitude of vibratory treatment under constant frequencies of 75 Hz, 100 Hz, 125 Hz, and 150 Hz:

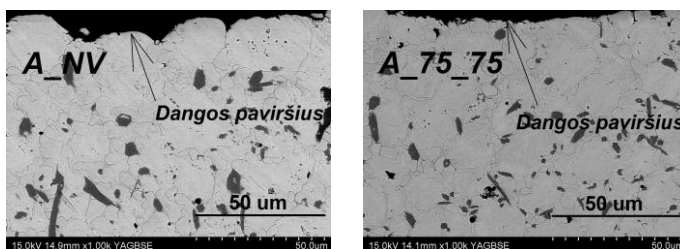
NV – series of unvibrated samples

Išsirinkus iš kiekvieno dažnio serijos amplitudę, kuriai esant pasireiškė stipriausias efektas, ir surikiavus rezultatus dažnių didėjimo tvarka (3.13 pav.) matyti, kad stipresnis struktūros susmulkėjimas susidaro intervale nuo 75 Hz iki 200 Hz. Dangose, vibruotose šiame dažnių diapazone, nustatytas nuo 285 iki 334 vnt./25000 μm^2 vidutinis grūdelių kiekis ir tai yra 2,1–2,4 karto daugiau negu nevibruotose dangose.



3.13 pav. Maksimalūs grūdelių vidutiniai kiekiai, nustatyti A bandiniuose, perlydytuose taikant skirtingus dažnius: NV – nevibruotų bandinių serija

Fig. 3.13. Maximum average grains numbers, estimated on A-type samples, vibrated under various frequencies: NV – series of unvibrated samples



3.14 pav. Nevibruotos (A_NV) ir vibruotos (A_75_75) A tipo dangų paviršinių sluoksnių mikrostruktūra

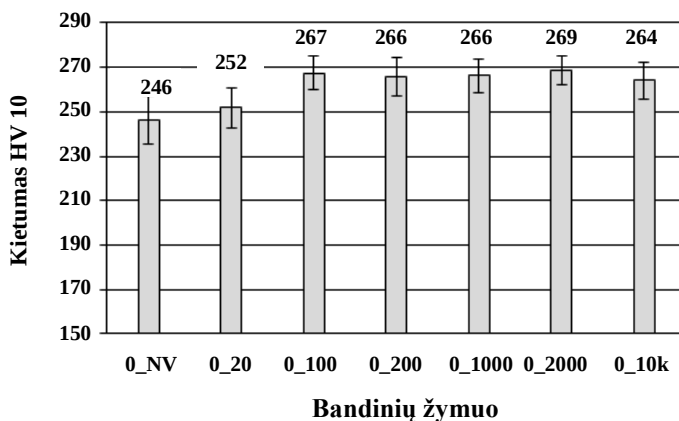
Fig. 3.14. Microstructure of outer layers of unvibrated (A_NV) and vibrated (A_100_115) A-type coatings

Nagrinęjant A dangų mikrostruktūrą taip pat pastebėta, kad sluoksniuose arti paviršiaus struktūros susmulkėjimo efektas neturi tokio išreikšto pobūdžio, o dalies vibruotų dangų paviršius yra lygesnis (3.14 pav.).

Tokiu būdu, perlydymo metu veikiant vibracijomis mažiau legiruotas perlydomąsias Ni pagrindo dangas su vyraujančia γ -Ni kietojo tirpalo faze susidaro iki 2,4 karto smulkesnė mikrostruktūra. Struktūros susmulkėjimo poveikis pasireiškia taikant mechaninius virpesius tiek statmenai, tiek lygiagrečiai substratui. Nagrinėjamame parametų diapazone stipriausią poveikį grūdelio dydžio sumažėjimui turi mechaniniai virpesiai dažnių intervale nuo 75 Hz iki 200 Hz.

3.1.5. Vibracijų poveikis perlydytų A dangų kietumui ir mikrokietumui

3.15 paveiksle pateikti pirmo eksperimentų etapo rezultatai. Nustatyta, kad A tipo nevibruotų dangų kietumas sudaro apie 246 HV. 20 Hz dažnio vibracijos neturėjo stipraus poveikio gaunamų dangų kietumui ir jo padidėjimas (iki 267 HV) aptiktas tik pasiekus 100 Hz dažnį. Esant tolimesniam dažnio didinimui dangų vidutinis kietumas išliko panašiam lygyje ir vibruotų dangų vidutinio kietumo padidėjimas sudarė apie 10 % palyginti su nevibruotu etalonu. Kietumo matavimo rezultatai atitinka mikrostruktūros tyrimų metu gautus duomenis. Šiuo atveju, kaip ir buvo laukiama, smulkesnės struktūros dangose buvo nustatytas didesnis kietumas.

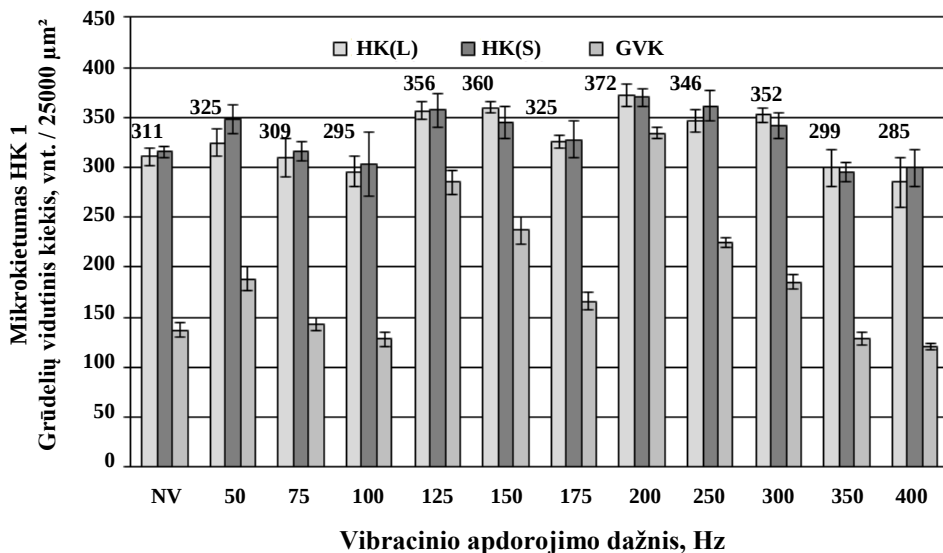


3.15 pav. A tipo dangų, apdorotų skirtingų parametrų vibracijomis, kietumas:
0_NV – nevibruotų bandinių serija

Fig. 3.15. The hardness of A-type coatings, vibrated under various vibrational parameters: 0_NV – series of unvibrated samples

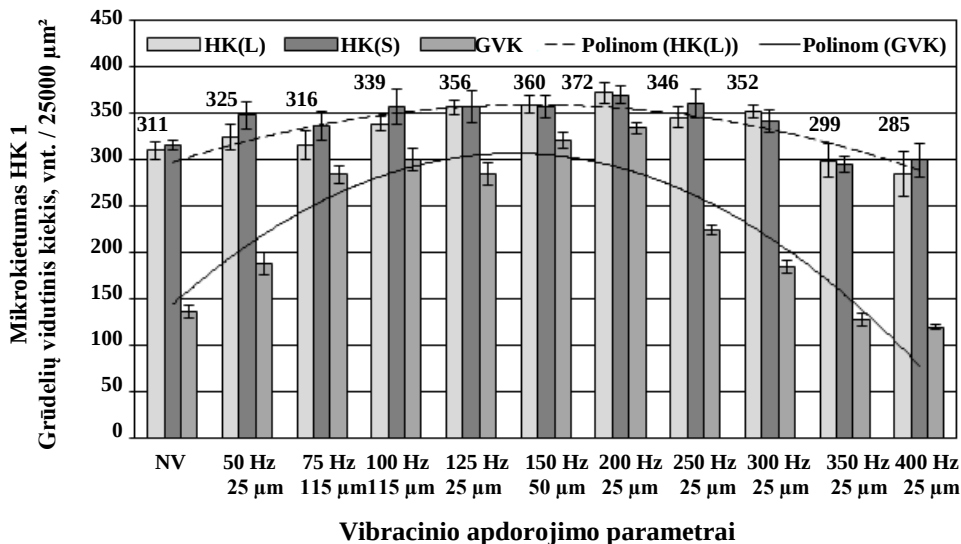
Knopo mikrokietumo matavimo rezultatai, gauti antro eksperimentų etapo metu, pateikiami 3.16 ir 3.17 paveiksluose. Esminių skirtumų tarp reikšmių, gautų atliekant matavimus lygiagrečiai HK(L) ir statmenai HK(S) substratui, nenustatyta. Nevibruotų bandinių serijai jos sudarė 311 HK ir 315 HK atitinkamai. Daugumai vibruotų dangų skirtumas tarp HK(L) ir HK(S) sudarė iki 4,5 %.

Tiriant vibracinio apdorojimo parametrų įtaką dangų mikrokietumui nustatytos priklausomybės atkartoja rezultatus, gautus vertinant grūdelių vidutinį kiekį (GVK). Priklausomybė nuo dažnio pateikta 3.16 paveiksle. Didžiausios mikrokietumo reikšmės, atrinktos iš kiekvieno dažnio sekos, pateiktos 3.17 paveiksle.



3.16 pav. A tipo dangų mikrokietaumo ir grūdelių vidutinio kiekio (GVK) priklausomybės nuo dažnio: NV – nevibruotų bandinių serija

Fig. 3.16. Dependences of A-type coatings microhardness and average grains number on the frequency of vibratory treatment: NV – series of unvibrated samples



3.17 pav. A tipo dangų didžiausias mikrokietaumas, gautas esant skirtingiems dažniams: NV – nevibruotų bandinių serija

Fig. 3.17. The maximum microhardness of A-type coatings, obtained with the use of different frequencies: NV – series of unvibrated samples

Palyginimas rodo gerą mikroketumo ir GVK reikšmių atitikimą: didesnis mikroketumas atitinka didesnę grūdelių kiekį. A_200_25 serijos dangose su smulkiausia mikrostruktūra nustatytas didžiausias ~372 HK mikroketumas, ir tai yra ~19 % didesnis mikroketumas negu nevibruotų dangų. Atsižvelgiant į dangų mikroketumo matavimo rezultatus, pateiktus 3.17 paveiksle, vibracinio apdorojimo optimalių dažnių intervalas gali būti sumažintas iki 100–200 Hz.

Tiriant fazinę dangų sudėtį XRD metu esminių skirtumų tarp vibruotų ir nevibruotų dangų nenustatyta, todėl galima teigti, kad dangų mikroketumas padidėja tik dėl struktūros susmulkėjimo. Literatūroje nurodomi ir kiti galimi mechanizmai: pvz. kietojo tirpalo sustiprinimas dėl didesnio ištirpusių elementų kiekio. Tam tikras struktūros nehomogeniškumas, susidarantys tiek vibruotose, tiek nevibruotose dangose, neleidžia nustatyti panašaus efekto šiame darbe.

Struktūrinių dedamųjų mikroketumas

Struktūrinių dedamųjų mikroketumo nustatymas susijęs su tam tikrais ypatumais. Yra žinoma, kad matuojant kietumą labai maža apkrova, didėja matavimo paklaida ir gaunamų kietumo reikšmių neapibrėžtumas. Tuo tarpu didesnių apkrovų naudojimą riboja tiriamų struktūros elementų dydžiai. Šiame darbe struktūros elementų mikroketumas buvo nustatomas Vickerso metodu taikant 10 g apkrovą. Ten, kur buvo įmanoma, mikroketumas taip pat išmatuotas Knopo metodu (10 g). Visos gautos reikšmės pateiktos 3.4 lentelėje.

Mažiausias mikroketumas A tipo dangose nustatytas plokštuminės kristalizacijos sluoksnyje. Šios zonos kietumas siekia ~220 HV. Mikroketumo didėjimo tvarka fazės išsidėsto taip: metalinės matricos γ -Ni dendritai, Ni–B fazė ir kietieji intarpai. Plokštuminės kristalizacijos sluoksnio ir pirminių dendritų pagrindą sudaro ta pati γ -Ni fazė ir skirtumo tarp šių struktūrinių elementų mikroketumo beveik nėra.

Ni–B fazės mikroketumo matavimo rezultatai suskirstyti į dvi grupes (I ir II) (3.4 lentelė). Mažesni kietumo skaičiai (342–626 HV) gerai sutampa su reikšmėmis, nurodomomis kituose darbuose (Liyanage *et al.* 2010) ir greičiausia atitinka γ -Ni/Ni₃B eutektikos fazę. II diapazono reikšmės yra labai artimos gryno Ni₃B borido mikroketumo (1190 HV, Соколов *et al.* 1967). Šie rezultatai rodo, kad vietomis tarp γ -Ni dendritų susidaro ne Ni–B eutektika, o Ni₃B boridai. Stebint mikrostruktūrą taip pat buvo pastebėta, kad kai kuriose tarpdendritinio tinklo vietose matomi atskiri ovalo formos mikrostruktūros elementai, kurių kompozicinis kontrastas skiriasi nuo Ni–B tarpdendritinio tinklo (3.6 pav. (d)).

A dangose karbidų fazės mikroketumo reikšmės kinta 1031–1775 HV ribose. Literatūroje chromo karbidams yra nurodomi tokie mikroketumo reikšmių intervalai: 976–1650 kg/mm² Cr₂₃C₆ karbidams, 1336–2200 kg/mm² Cr₇C₃ karbidams ir 1350–2280 kg/mm² Cr₃C₂ karbidams. Tokiu būdu, mikroketumo ma-

tavimo rezultatai patvirtina, kad be Cr_7C_3 karbido, kuris nustatytas XRD metu, yra susidariusių M_{23}C_6 tipo karbidų.

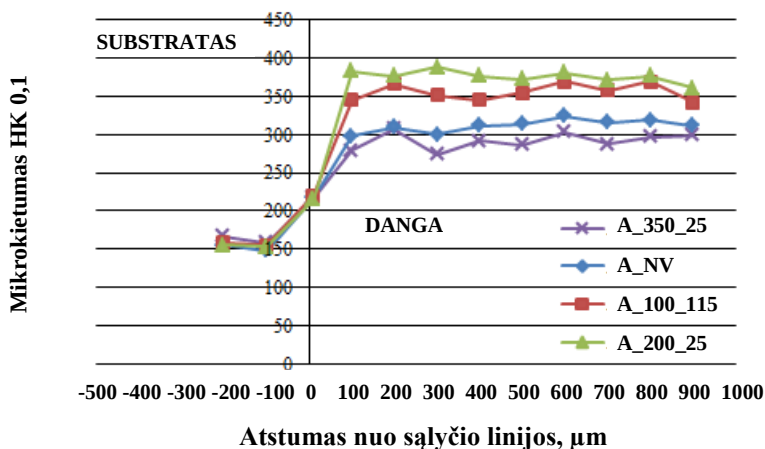
3.4 lentelė. Perlydytų A dangų mikrostruktūros elementų mikrokietumas

Table 3.4. Microhardness of refused A-type coating microstructural constituents

Mikrostruktūros elementas	Mikrokietumas	
	HV 0,01	HK 0,01 / (HV perskaičiuotas)
Plokštuminės kristalizacijos sluoksnis	215–219	187–233 / (171–218)
γ -Ni	221–225	233–240 / (218–226)
Ni-B (I) (II)	342–626	448–547 / (431–518)
	1190–1230	
Kietieji intarpai	1031–1775	1174–1505 / (1174–1505)

Mikrokietumo pasiskirstymas perlydytose A dangose

Ketrios bandinių serijos išmatuotos tiriant mikrokietumo pasiskirstymą A dangose. Tai A_{100_115} ir A_{200_25} dangos, kuriose pasireiškė stipresnis struktūros susmulkėjimo efektas; A_{350_25} dangos, kuriose buvo aptikta stambesnė struktūra, ir nevibruotų etalonų serija A_{NV} . Mikrokietumo pasiskirstymo kreivės pateiktos 3.18 paveiksle.



3.18 pav. Mikrokietumo pasiskirstymas A tipo dangose
Fig. 3.18. Distribution of microhardness in A-type coatings

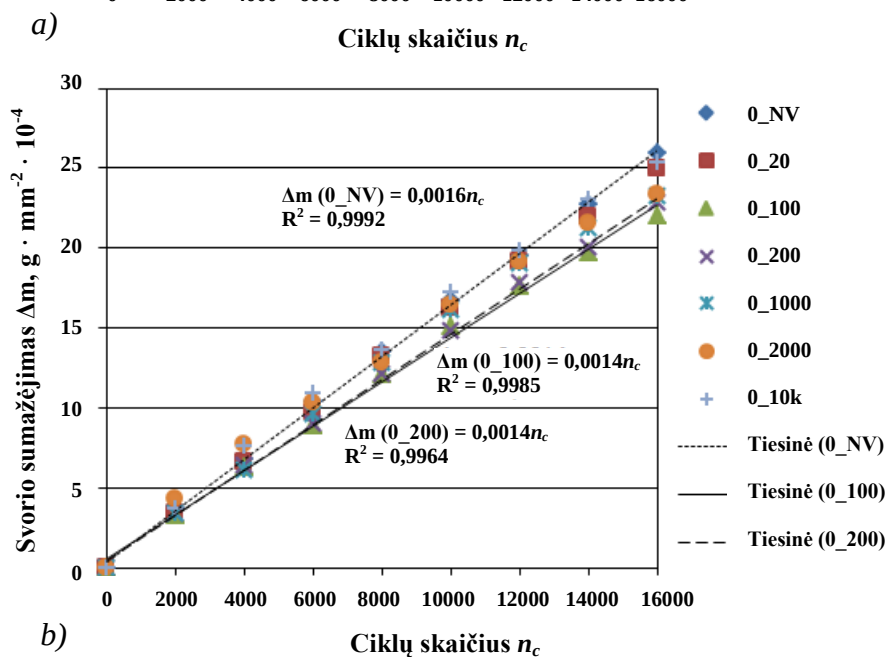
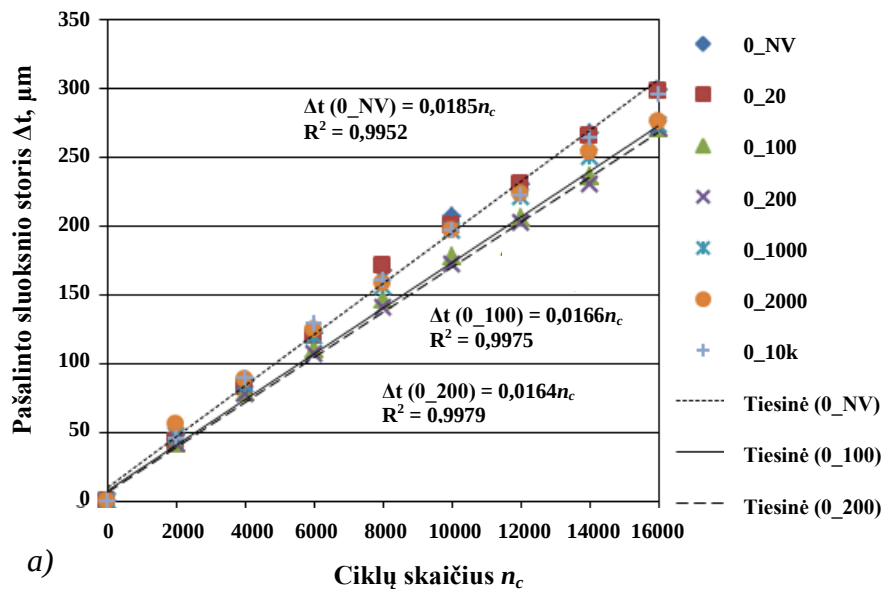
Kaip ir buvo laukiama, smulkesnės struktūros dangose gautos didesnės mikrokietumo reikšmės, tuo tarpu stambiagrūdės struktūros dangose bendras mikrokietumo lygis šiek tiek žemesnis negu nevibruotame etalone. Iš pateiktų duomenų matyti, kad A tipo dangoms būdingas pakankamai tolygus mikrokietumo pasiskirstymas visame skerspjūvyje. Gerokai mažesnis mikrokietumas nustatytas tik prie dangos ir substrato sąlyčio linijos, kur susiformuoja plokštuminės kristalizacijos sluoksnis. A_100_115 ir A_200_25 dangose nežymus mikrokietumo sumažėjimas nustatytas prie paviršiaus, kur struktūros susmulkėjimo efektas neturėjo tokio išreikšto pobūdžio. Palyginamoji analizė rodo, kad vibracinis apdorojimas neturi šiuo atveju didelio poveikio ir panašaus pobūdžio mikrokietumo pasiskirstymas išsilaiko dangų skerspjūviuose ir po vibravimo.

3.1.6. Vibracijų poveikis perlydytų A dangų nusidėvėjimo atsparumui

Perlydytų A dangų atsparumas dilimui įvertintas dviejų kūnų sausos trinties dilimo bandymais, kurių metu buvo kontroliuojamas bandomųjų dangų storio ir masės pokytis. Rezultatai pateikti 3.19 ir 3.20 paveiksluose.

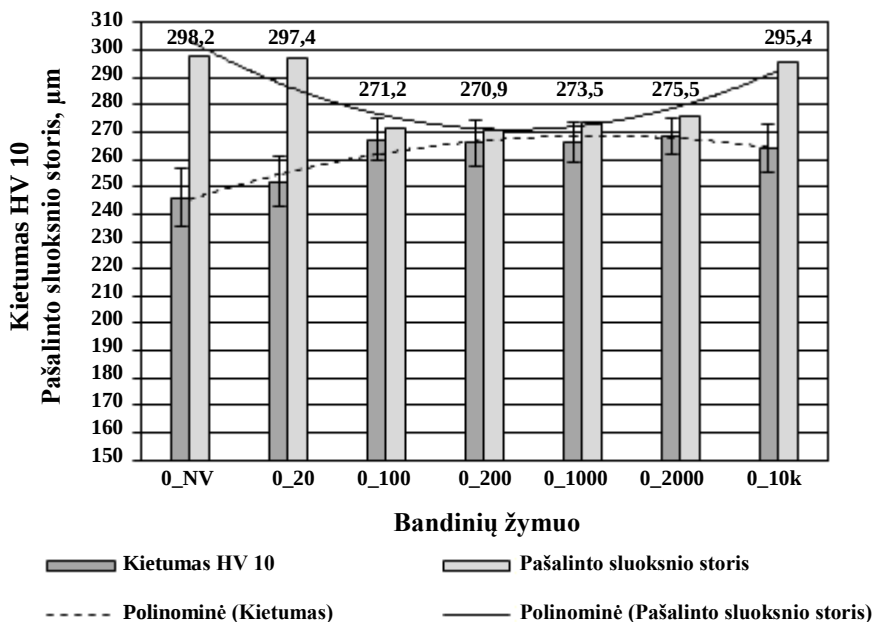
Rezultatai, gauti abiem metodais (3.19 pav., a ir b), labai panašūs. Iš pateiktų grafikų matyti, kad dilimo procesas turi vienodą linijinį pobūdį visoms bandomoms dangoms. Tokių rezultatų galima buvo tikėtis, kadangi mikrokietumo matavimais nustatytas pakankamai tolygus mikrokietumo reikšmių pasiskirstymas nuo dangos ir substrato sąlyčio linijos iki dangos paviršiaus (3.18 pav.). Pradinė dilimo kreivių dalis sutampa beveik visiems bandiniams. Pirmi pokyčiai pasireiškia po 6000 ciklų, kurie atitinka 120–150 μm atstumą gilyn nuo dangos paviršiaus. Šie rezultatai gerai sutampa su mikrostruktūros tyrimų rezultatais, kurie parodė, kad paviršiniuose dangų sluoksniuose, kurie perlydymo metu yra tiesiogiai veikiami liepsnos, grūdelių susmulkėjimo efektas neturėjo tokio išreikšto pobūdžio. Dviejų serijų bandinius galima išskirti iš visų kitų. Tai 0_100 ir 0_200 bandiniai, kurie bandymų metu intervale nuo 6000 iki 16000 ciklų stabiliai demonstravo labai panašų, geresnį negu visų kitų, atsparumą dilimui.

3.20 paveiksle pateikti dilimo metu pašalintų dangos sluoksnių storiai po 16000 ciklų. Iš palyginimo matyti, kad dilimo bandymų ir kietumo matavimų reikšmės koreliuoja. Geriausi rezultatai gauti tiriant dangas, vibruotas 100 Hz ir 200 Hz dažniais. Jų svorio praradimas po 16000 dilimo ciklų sudarė apie $22,0 \cdot 10^{-4} \text{ g/mm}^2$ ir $22,8 \cdot 10^{-4} \text{ g/mm}^2$ atitinkamai, storio praradimas sudarė apie 271 μm . Palyginti su nevibruotu etalonu tai 12–15 % mažiau pirmu atveju ir 9 % mažiau – antru.



3.19 pav. A dangų storio sumažėjimas Δt (a) ir svorio sumažėjimas Δm (b) dilimo bandymų metu priklausomai nuo dilimo ciklų skaičiaus n_c

Fig. 3.19. A-type coatings thickness loss Δt (a) and mass loss Δm (b) during wear tests in dependence on the wear cycles number n_c



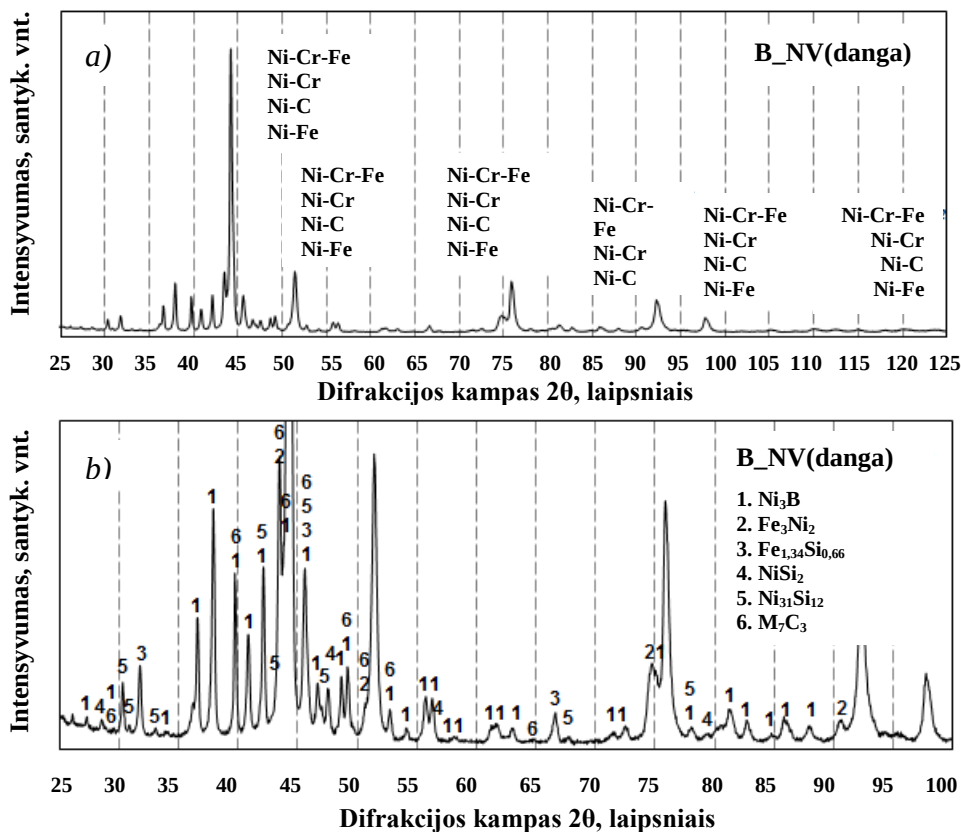
3.20 pav. A dangų dilimo ir kietumo bandymų rezultatų palyginimas
Fig. 3.20. A-type coatings wear test and hardness measurements results comparison

Lyginant dilimo bandymo rezultatus su kietumo matavimais gautomis reikšmėmis matyti, kad dangų kietumo padidėjimo efektas, lemiantis atsparumo dilimui pagerėjimą, išsilaiko intervale nuo 100 Hz iki 2000 Hz. Taikant nurodytų parametrų vibracijas dangų kietumas buvo padidintas vidutiniškai 10 % ir tai leido pagerinti atsparumą dilimui 9–15 %. Analizuojant dilimo priklausomybes, pateiktas 3.18 ir 3.19 paveiksluose, galima išskirti bandinius, vibruotus 100 Hz ir 200 Hz dažniais ir apriboti efektyvių dažnių intervalą iki 100–200 Hz.

3.2. Vibracijų poveikis B dangų sandarai ir savybėms

3.2.1. Vibracijų poveikis perlydytų B dangų fazinei sudėčiai

3.21 paveiksle pateiktos perlydytos B tipo dangos difrakcinė kreivė (*a*) ir padidinta jos dalis (*b*). Kreivės pagrindą (3.21 pav., *a*) sudaro ta pati serija didelių smailių, kurios buvo aptiktos A tipo dangos difraktogramoje (3.1 pav.). Šios smailės gali būti priskirtos $\text{Cr}_{1,12}\text{Ni}_{2,88}$, $\text{Cr}_{0,1}\text{Ni}_{0,9}$, NiC , $\text{Ni}_{0,98}\text{C}_{0,02}$, FeNi_3 , $\text{Ni}_{2,9}\text{Cr}_{0,7}\text{Fe}_{0,36}$ junginiams su kubine centruoto paviršiaus (KCP) kristaline gardele.



3.21 pav. B tipo perlydytos dangos difrakcinė kreivė (a) ir kreivės dalis mažosioms smailėms analizuoti (b)

Fig. 3.21. XRD pattern of B-type refused coating (a) and part of pattern for small peaks analysis (b)

Be Ni_3B junginio smailių aptikta daug smulkių smailių (3.21 pav., b), kurių dešifravimą apsunkina tai, kad tokio tipo dangose gali susidaryti daug skirtingų elementų junginių bei skirtingos stoichiometrinės sudėties tų pačių cheminių elementų junginių, kurių smailės difraktogramoje sutampa arba išsidėsto labai arti, užstodamos viena kitą. Taip, su didele tikimybe pavyko identifikuoti tokius junginius, kaip Fe silicidas ($\text{Fe}_{1,34}\text{Si}_{0,66}$), Ni silicidai (NiSi_2 , $\text{Ni}_{31}\text{Si}_{12}$), Fe ir Ni intermetalinis junginys (Fe_3Ni_2). Analizuojant B dangų difrakcines kreives identifikuotos M_7C_3 karbidų smailės. Tačiau nepavyko nustatyti kitų karbidų arba boridų, aptiktų tiriant mikrostruktūrą (žiūr. 3.2.2. skirsnį, 3.24 pav., a). Dauguma B miltelių (2.3 pav.) ir B dangų (3.21 pav.) difrakcinės kreivės smailių sutampa. Tai rodo, kad skirtingos kristalizacijos sąlygos (miltelių atomizacijos ir dangų

perlydymo metu) mažai keičia pagrindinę šio lydinio fazinę sudėtį ir daugiausia įtakos turi dominuojančių karbidų ir boridų susidarymui.

Lyginant smailių išsidėstymą ir intensyvumus vibruotų B tipo dangų difrakcinėse kreivėse (C priedas) su nevibruotų dangų difraktogramomis esminių skirtumų nenustatyta. Tai leidžia teigti, kad vibracinis apdorojimas neturi įtakos šio tipo perlydomųjų dangų fazinei sudėčiai.

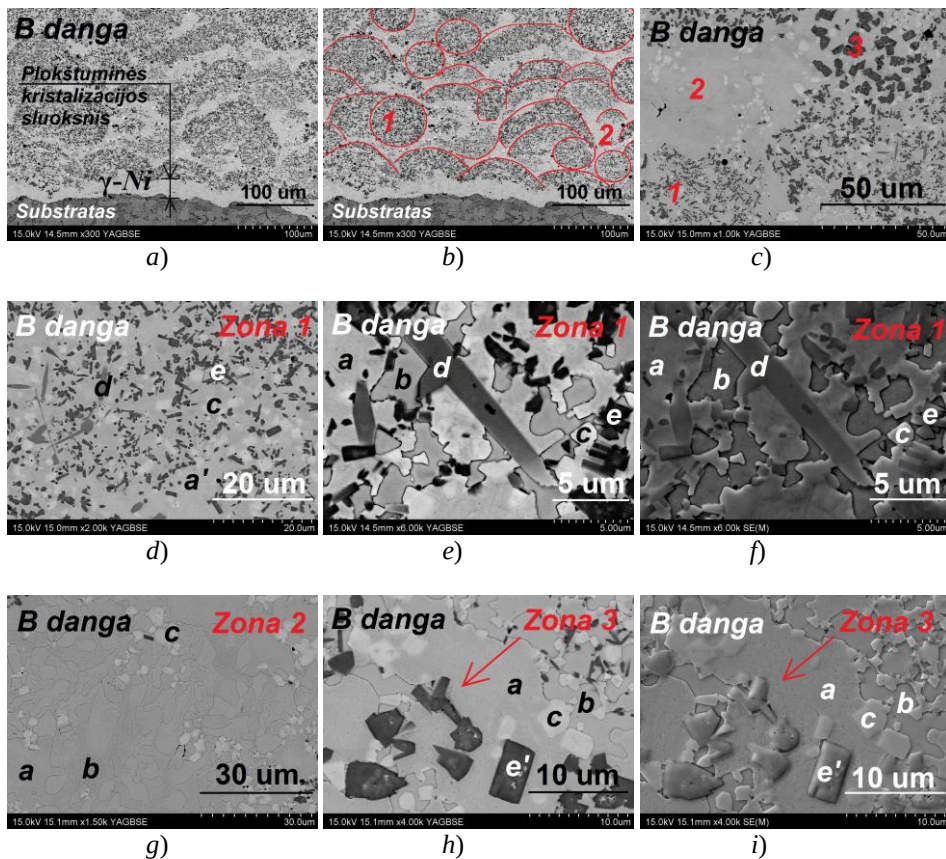
3.2.2. Perlydytų B dangų mikrostruktūra

Kaip ir A tipo dangų, B tipo dangų mikrostruktūros formavimas prasideda plonu plokštuminės kristalizacijos sluoksniu prie dangos ir substrato sąlyčio linijos (3.22 pav., *a*). Virš šio sluoksnio susidaro struktūra su skirtingos sandaros zonomis, savo forma ir dydžiu primenančiomis purškimui naudotų miltelių daleles (3.22 pav., *b*). Tokios struktūros susidarymui galėjo turėti įtakos miltelių dydžio išbarstymas. Užpurkštų dangų tyrimai parodė, kad po purškimo dangos struktūrą sudaro silpnai tarpusavyje sulipusios purškiamųjų miltelių dalelės, kurių forma yra beveik nepakitusi. Kaitinant tokios struktūros dangas perlydymo metu didesnėms dalelėms reikia daugiau laiko norint pasiekti lydymosi pradžios temperatūrą, tuo tarpu mažesnės dalelės jau būna visiškai išsilydžiusios. Tokiu būdu galutinė struktūra greičiausia susidaro stambesnėms dalelėms tik apsilydant (3.22 pav., *b*, struktūros zona 1), o smulkesnėms – išsilydant ir užpildant poras ir tuštumas aplink stambesnes (3.22 pav., *b*, zona 2).

Stebint mikrostruktūrą su SEM nustatyta, kad B tipo dangų pagrindą taip pat sudaro metalinė matrica, šiuo atveju sustiprinta dideliu kietųjų interpų kiekiu. Mažiausiai trys skirtingi kietųjų interpų tipai nustatyti stebint mikrostruktūrą su kompoziciniu kontrastu: mikronuotraukose šie elementai atrodo kaip „balti“, „pilki“ ir „juodi“ interpai (3.22 pav., *c*, *d*). Visų trijų tipų kietieji interpai pastebėti mikrostruktūros zonose 1 (3.22 pav., *c*), kurios greičiausia susidarė iš apsilydusių stambių purškiamųjų miltelių dalelių. Kietųjų interpų šiose zonose yra daug, jie skirtingo dydžio (nuo 1 μm ir mažiau iki keliasdešimt μm), įvairių formų, ir yra išsidėstę daugiausia γ -Ni fazėje (3.22 pav., *d-f*). Zonose 2, sudarytose, greičiausia, visiškai išsilydžius smulkioms purškiamųjų miltelių dalelėms, vyrauja metalinės matricos fazės su visai nedideliu kiekiu kietųjų interpų – daugiausia „baltų“ (3.22 pav., *c*, *g*). Stebint mikrostruktūros vaizdus taip pat pastebėtos kitos zonos, kuriose, pavyzdžiui, be „baltų“ interpų yra stambių „juodų“ elementų (3.22 pav., *h*, *i*). Sprendžiant iš šių sričių išsidėstymo, jos taip pat susidarė visiško dalelių išsilydymo vietose.

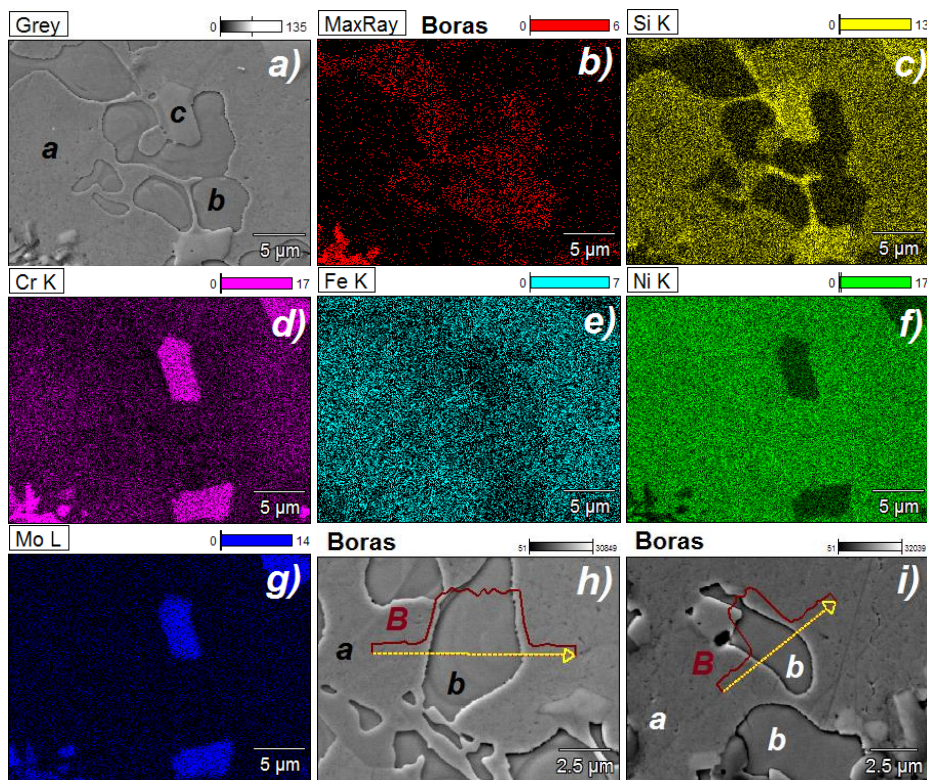
Rentgeno mikroanalize (3.5 lentelė, 3.23, 3.24 pav.) nustatyta, kad metalinės matricos pagrindą sudaro nikelis. Kadangi *a* fazėje (3.23 pav., *a*), be nikelio, aptikta apie 8 % silicio, apie 8 % chromo ir apie 4 % geležies, galima tvirtinti, kad ši fazė yra nikelio ir kitų elementų (Cr, Si, Fe) kietasis tirpalas – γ -Ni fazė.

Tarp šios fazės kristalitų RMA metu, be nikelio, taip pat aptiktas boras (3.23 pav., *b*, *h*, *i*) bei nedideli Cr ir Fe kiekiai (3.5 lentelė, 3.23 pav., *d*, *e*). Tai leidžia identifikuoti šią fazę kaip γ -Ni/Ni₃B eutektiką.



3.22 pav. Perlydyto be vibracijų B tipo bandinio skersinio mikrošlifų mikronuotraukos: skirtingų mikrošlifų zonų mikrostruktūros; *a'* – Ni pagrindo matrica; *a* – γ -Ni fazė; *b* – Ni-B fazė; *c* (balta fazė) ir *d* (pilka fazė) – karbidai; *e* (juoda fazė) – boridai; *e'* (juoda fazė) – stambūs boridai

Fig. 3.22. Micrograph of transverse cross-sections of unvibrated refused B-type samples: microstructure of different cross-section zones; *a'* – Ni-based matrix; *a* – γ -Ni phase; *b* – Ni-B phase; *c* (white phase) and *d* (grey phase) – carbides; *e* (dark phase) – borides; *e'* (dark phase) – bulky borides

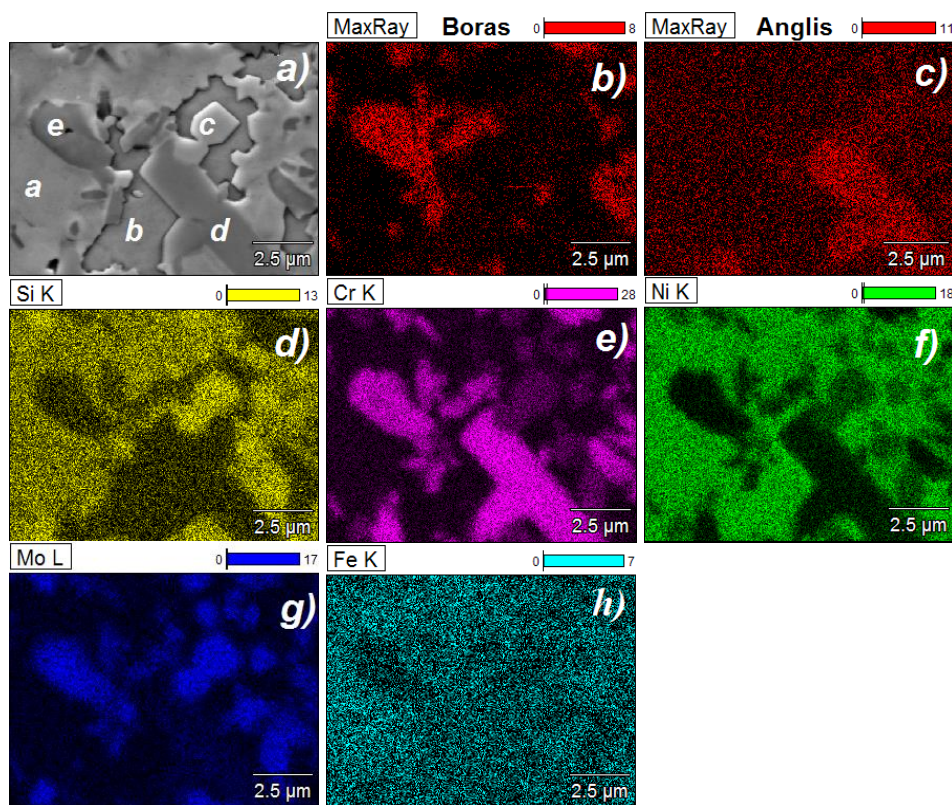


3.23 pav. B tipo dangos metalinės matricos rentgeno mikroanalizė: (a) analizuojamas mikrostruktūros plotas; (b–g) nurodytų cheminių elementų pasiskirstymas analizuojamame plote; (h, i) linijinis boro pasiskirstymas metalinės matricos fazėse; a – γ -Ni fazė; b – Ni-B fazė; c – „balti“ karbidai

Fig. 3.23. X-ray microanalysis of metallic matrix of B-type coating: (a) area of analysis; (b–g) chemical mapping; (h, i) line analysis of boron in phases of metallic matrix; a – γ -Ni phase; b – Ni-B phase; c – „white“ carbides

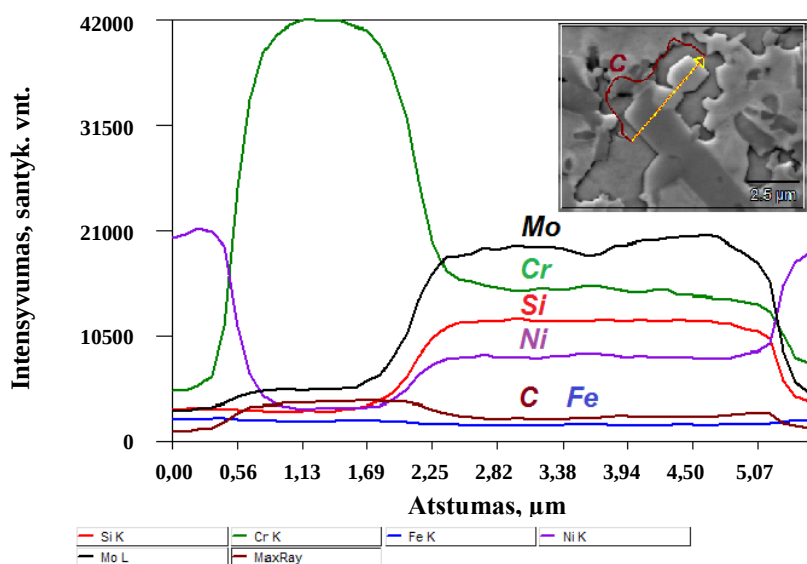
3.5 lentelėje, 3.23 ir 3.24 paveiksluose pateikti rentgeno mikroanalizės rezultatai, iš kurių matyti, kad „baltų“ ir „pilktų“ tarpų (3.24 pav., a, fazės „c“ ir „d“) sudėtyje gausu C ir Cr (3.5 lentelė, 3.24 pav., c, e). „Baltuose“ taip pat aptikta daug Ni, Mo ir Si (3.5 lentelė, 3.24 pav., d, f, g). „Pilkuose“ be anglies ir chromo nustatyta apie 6 % Ni, kitų elementų kiekis nežymus. Tikri anglies kiekiai greičiausia yra mažesni, negu gauti su EDS (3.5 lentelė.). Be to, iš linijinės RMA kreivių (3.25 pav.) matyti, kad „pilkuose“ anglies yra daugiau. Sugretinus įvairiais metodais gautus rezultatus ir remiantis literatūros analize galima teigti, kad „balti“ tarpai, greičiausia, yra $M_{23}C_6$ tipo karbidai, kuriuose M = Cr, Ni, Si, Mo. Tuo tarpu turintys daugiau anglies „pilki“ tarpai – tai M_7C_3 tipo karbi-

dai, kur $M = \text{Cr, Ni}$. Boridinėje fazėje (3.24 pav., *a*, fazė „e“) be chromo aptikta apie 9 % Mo ir apie 2 % Ni. Bendras lengvųjų elementų (B+C) kiekis, nustatytas EDS analize šioje fazėje, yra nuo 35 iki 41 %. Tačiau iš plokštuminio elementų pasiskirstymo matyti, kad šiuose tarpuose anglies beveik nėra (3.24 pav., *c*). Todėl visas kiekis, greičiausia, turėtų būti priskirtas borui. EDS metu gauti skaičiai leidžia tik apytiksliai spręsti apie B kiekį šioje fazėje, tačiau greičiausia tai žemesnieji boridai. Literatūroje (A.1 lentelė) Cr_2B nurodomas kaip dažniausiai aptinkamas šio tipo dangose. Šiuo atveju taip pat labai tikėtina, kad susidarė M_2B tipo boridai, kuriuose $M = \text{Cr, Mo, Ni}$.



3.24 pav. B dangos tipinės mikrostruktūros dedamųjų rentgeno mikroanalizė:
(a) analizuojamas plotas; (b–h) nurodytų cheminių elementų pasiskirstymas analizuojamame plote; a – γ -Ni fazė; b – Ni-B fazė; c – „baltieji“ karbidai; d – „pilkieji“ karbidai; e – boridai

Fig. 3.24. X-ray microanalysis of typical microstructure constituents of B-type coating:
(a) area of analysis; (b–h) chemical mapping of denoted area; a – γ -Ni phase;
b – Ni-B phase; c – „white“ carbides; d – „grey“ carbides; e – borides



3.25 pav. Karbidų linijinė rentgeno mikroanalizė: anglies ir kitų cheminių elementų linijinis pasiskirstymas skirtingo tipo karbiduose

Fig. 3.25. Line X-ray microanalysis of carbides: distribution of carbon and other elements in carbides of different types

3.5 lentelė. Perlydytos B dangos struktūros elementų cheminė sudėtis

Table 3.5. Chemical composition of structural constituents of refused B-type coatings

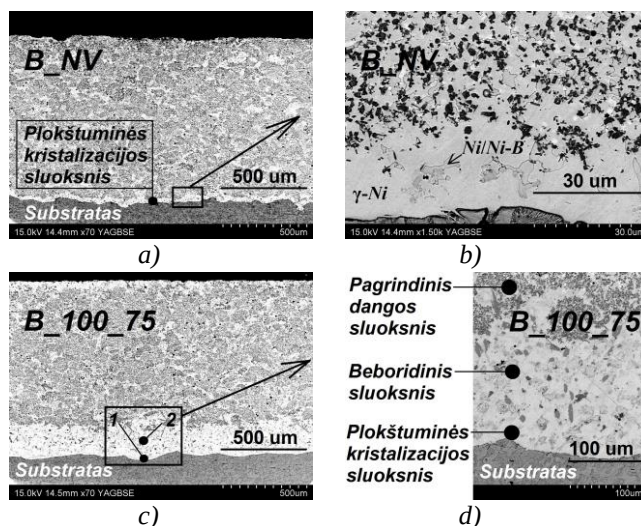
Analizės sritis	Cheminių elementų kiekis, atomų % (EDS)							
	B-K	C-K	Si-K	Cr-K	Fe-K	Ni-K	Cu-K	Mo-L
γ-Ni fazė	-	-	8,05-8,54	8,01-8,57	3,83-5,08	75,55-78,00	0,00-3,35	0,36-0,40
Ni-B fazė	10,73-15,86	-	0,00-0,28	5,17-5,72	1,68-1,71	76,08-81,13	0,75-0,90	-
„Balti“ karbidai	-	31,47-33,50	10,03-10,26	21,00-21,43	0,41-0,57	23,32-24,21	-	11,74-12,05
„Pilki“ karbidai	-	36,27-36,55	0,16-0,25	54,60-55,17	1,27-1,43	5,32-5,90	-	1,44-1,65
„Juodi“ boridai	23,63-26,18	11,71-14,42	0,00-0,25	48,91-52,23	0,35-0,48	2,00-2,78	-	7,53-9,57

Tyrimais nustatyta, kad B dangų mikrostruktūrą sudaro kietojo tirpalo γ-fazė, γ-Ni/Ni₃B eutektika, dviejų tipų karbidai – greičiausia (Cr,Ni,Si,Mo)₂₃C₆ ir (Cr,Ni)₇C₃, bei boridai – greičiausia (Cr,Mo,Ni)₂B.

Taip pat nustatyta, kad pradinės medžiagos (purškimo miltelių) forma ir dydis turi didelės įtakos perlydytų dangų struktūros susidarymui. Mažiau legiruoto (~82 % Ni) lydinio A dangose šis poveikis silpnas. Gausiai legiruotose (~67 % Ni) boridus sudarančiose B dangose susidaro zoninė struktūra, stambesnėms dalelėms tik apsilydant, o smulkesnėms – išsilydant ir užpildant poras ir tuštumas aplink stambesnes.

3.2.3. Vibracijų poveikis perlydytų B dangų mikrostruktūrai

Tiriant B tipo nevibruotas dangas nustatyta, kad jas sudaro du charakteringi sluoksniai: tai plonas plokštuminės kristalizacijos sluoksnis, susidarantis prie dangos ir substrato sąlyčio linijos, ir likęs pagrindinis dangos sluoksnis su zoni- ne mikrostruktūra (3.26 pav., a, b), nagrinėta 3.2.2 skirsnyje.



3.26 pav. Nevibruotos (*B_NV*) dangos (a) ir vibruotos (*B_100_75*) dangos (c) skersinių mikrošlifų mikronuotraukos ir nurodytų sričių padidintos mikrostruktūros (b) ir (d):
1 – plokštuminės kristalizacijos sluoksnis;

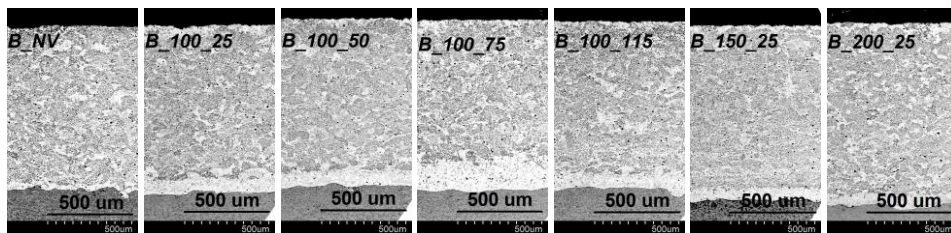
2 – beboridinis sluoksnis

Fig. 3.26. Micrographs of the transverse cross-sections of unvibrated (*B_NV*) coating (a) and vibrated (*B_100_75*) coating (c) and microstructure of denoted areas under higher magnification (b) and (d): 1– layer of planar solidification;
2 – borides-free layer

Analizuojant dangų mikrostruktūrą po vibracinio perlydymo, nustatyta, kad vibracinis apdorojimas neturi pastebimo poveikio dangų pagrindinio sluoksnio mikrostruktūrai. Veikiant vibracijoms perlydymo metu pagrindinėje dangų dalyje taip pat susidaro zoninė struktūra. Tačiau mechaninių virpesių energija suku-

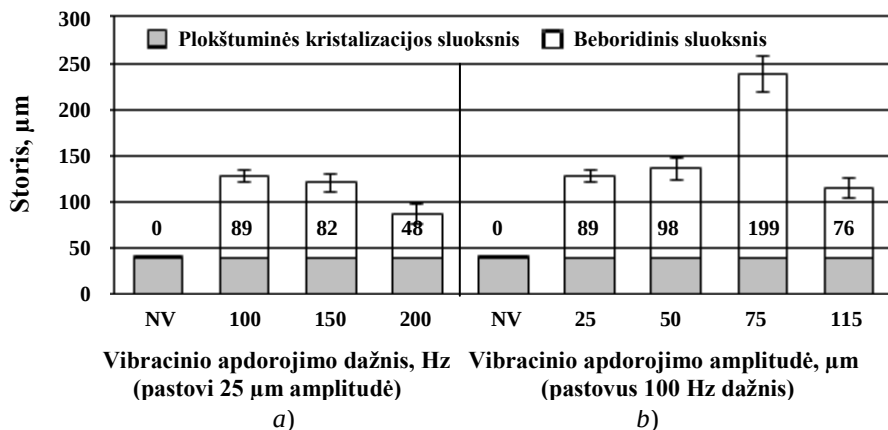
ria dangoje papildomą palyginti storą sluoksnį tarp plokštuminės kristalizacijos srities ir dangos pagrindinės dalies (3.26 pav., *c*). Šio sluoksnio struktūrą sudaro tie patys tik stambesni tiek metalinės matricos, tiek kietosios fazės elementai, kurie aptinkami pagrindiniame dangų sluoksnyje (3.26 pav., *d*). Taip pat nustatyta, kad šame sluoksnyje nėra boridų. Mikrostruktūros pokyčiai, pastebėti šiame beboridiniame sluoksnyje, leidžia tarti, kad vibracinis apdorojimas perlydymo metu keičia šio sluoksnio kristalizacijos sąlygas ir suformuoja sluoksninę gaunamų dangų struktūrą, veikdamas šilumos nuvedimo procesus.

Tyrimų metu taip pat nustatyta, kad beboridinio sluoksnio storis varijuoja keičiantis vibracinio apdorojimo parametrams. Šio efekto kiekybiniam įvertinimui buvo išmatuoti beboridinių sluoksnių storiai. Matavimai atlikti SEM mikronuotraukose su grafinių vaizdų apdorojimo ir analizės programine įranga *Scion Image*. Beboridinio sluoksnio storio kitimą iliustruoja 3.27 ir 3.28 paveikslai.



3.27 pav. B tipo dangų skersinių mikrošlifų mikronuotraukos beboridinio sluoksnio storiui palyginti

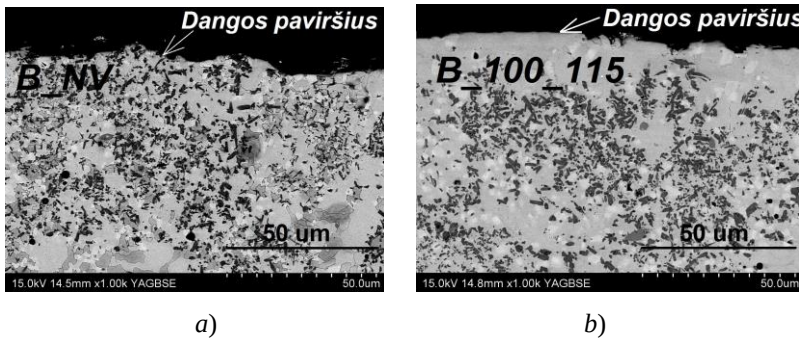
Fig. 3.27. Micrographs of B-type coatings transverse cross-sections for comparison of borides-free layer thickness



3.28 pav. Beboridinio sluoksnio storio priklausomybės nuo vibracinio apdorojimo dažnio (*a*) ir amplitudės (*b*): NV – nevibruotų bandinių serija

Fig. 3.28. The dependence of borides-free layer thickness on the frequency (*a*) and amplitude (*b*) of vibratory treatment: NV – series of unvibrated samples

Iš 3.28 paveiksle pateiktų rezultatų matyti, kad mažiausio intensyvumo (100 Hz ir 25 μm) vibracinis apdorojimas suformavo apie 90 μm storio beboridinį sluoksnį B tipo dangose. Padidinus dažnį iki 150 Hz šis sluoksnis išliko panašaus storio. Tolimesnis dažnio didinimas sumažino efektą beveik dvigubai. Iš rezultatų taip pat matyti, kad amplitudės pokytis turi stipresnį poveikį susidarančio sluoksnio storiui. Padidinus amplitudę nuo 25 μm iki 50 μm sluoksnio storis padidėjo apie 10 % ir šoktelėjo daugiau kaip dvigubai esant 75 μm amplitudei. Dar labiau padidinus amplitudę (iki 115 μm) beboridinio sluoksnio storis pradėjo mažėti.



3.29 pav. Nevibruotos B_NV dangos (a) ir vibruotos B_100_115 dangos (b) paviršinių sluoksnių mikrostruktūra

Fig. 3.29. Microstructure of outer layers of unvibrated B_NV (a) and vibrated B_100_115 (b) coatings

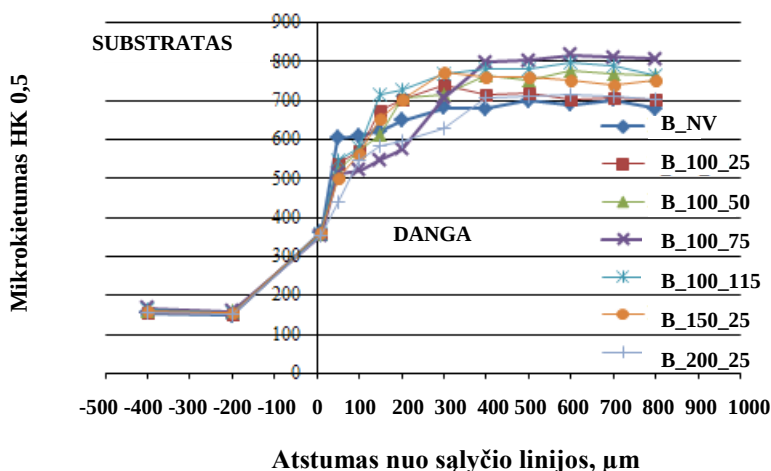
Nagrinėjant perlydytų B dangų mikrostruktūrą sluoksniuose arti dangų paviršiaus taip pat pastebėta, kad nevibruotose dangose kietųjų tarpų ir jų sandarų yra ir arti paviršiaus (3.29 pav., a), tuo tarpu vibruotuose dangose prie paviršiaus susiformuoja plonas apie 10–20 μm metalinės matricos sluoksnis, kuriame beveik nėra kietųjų tarpų (3.29 pav., b).

3.2.4. Vibracijų poveikis perlydytų B dangų mikrokietumui

Siekiant įvertinti susidarančios sluoksninės struktūros mechanines savybes atlikti perlydytų B dangų mikrokietumo bandymai ir nustatytas skirtingų sluoksnių mikrokietumas ir mikrokietumo pasiskirstymas dangos skerspjūvyje. Rezultatai pateikiami 3.30, 3.31 paveiksluose ir 3.6 lentelėje.

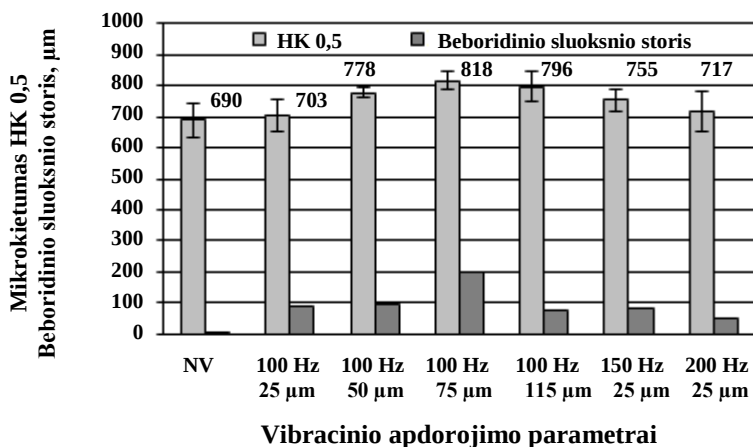
Nevibruotose B dangose mikrokietumas pasiskirsto pakankamai tolygiai nuo plokštuminės kristalizacijos sluoksnio iki dangos paviršiaus (3.30 pav., B_NV) ir sudaro ~700 HK. Vibruotose dangose mikrokietumo pasiskirstymą

lemia sluoksninės struktūros susidarymas taikant vibracinį apdorojimą lygiagrečiai substratui. Nevibruotame bandinyje kertant minkštesnio substrato (~150 HK) ir dangos sąlyčio liniją nustatytas staigus mikrokietumo reikšmių šuolis (iki ~600 HK) iš karto už plokštuminės kristalizacijos sluoksnio. Beboridinė sritis vibruotose dangose yra minkštesnė (apie 500–570 HK) negu pagrindinis dangos sluoksnis (700–800 HK), todėl vibruotose dangose susiformuoja laipsninis perėjimas nuo minkšto substrato per tarpinį beboridinį sluoksnį į pagrindinę dangos dalį. Tokio minkštesnio sluoksnio susidarymas gali turėti teigiamą poveikį liekamųjų įtempių pasiskirstymui tarp substrato ir gaunamų dangų.



3.30 pav. Mikrokietumo pasiskirstymas B tipo dangose
Fig. 3.30. The distribution of microhardness in B-type coatings

Iš 3.30 paveiksle pateiktų duomenų taip pat matyti, kad vibruotų dangų pagrindiniuose sluoksniuose susidaro iki 20 % kietesnė struktūra. Šiam efektui detaliau ištirti atlikti papildomi mikrokietumo matavimai tik dangų pagrindiniuose darbinuose sluoksniuose (400–800 μm nuo sąlyčio linijos). Rezultatai pateikiami 3.31 paveiksle. Iš pateiktų duomenų matyti, kad vidutinis nevibruotų dangų pagrindinės dalies mikrokietumas sudarė apie 690 HK. Žemiausių parametrų (100 Hz ir 25 μm) vibracijos neturėjo stipraus poveikio. Mikrokietumas padidėjo iki 755 HK tik pritaikius 150 Hz dažnį, tačiau su tolimesniu dažnio didinimu efektas pradėjo mažėti. Amplitudės poveikis šiuo atveju buvo stipresnis. Didinant amplitudę, mikrokietumas pirmą padidėjo iki 778 HK esant 50 μm amplitudei, pasiekė 818 HK maksimumą esant 75 μm, ir sumažėjo padidinus amplitudę iki 115 μm.



3.31 pav. Perlydytų B tipo dangų mikrokietaumas ir beboridinių sluoksnių storiai
Fig. 3.31. The microhardness of refused B-type coatings and thickness of borides-free layers

Lyginant pateiktas reikšmes matyti, kad didesnis mikrokietaumas nustatytas dangose su storesniu beboridiniu sluoksniu. Toks ryšys tarp šių dviejų efektų rodo, kad vibracijų energija perlydymo metu galėjo sukelti ne tik aušimo sąlygų pokyčius sluoksniuose arti substrato, bet ir kitus reiškinius, dėl kurių dangoje susiformuoja kietesnė struktūra. Literatūroje nurodoma, kad vibracija gali tiek didinti struktūrinį ir cheminį homogeniškumą, tiek turėti priešingą poveikį, todėl visai tikėtina, kad vibracijos bangoms sklindant perlydomos dangos skystame sluoksnyje galėjo įvykti dalinis kryptingas cheminių elementų persiskirstymas, pavyzdžiui lengvesnių elementų, tokių kaip boras, perslinka link dangos paviršiaus. Boro perslinka galėtų paaiškinti boridų nebuvimą dangos apatiniuose sluoksniuose. Tuo pačiu metu boro kiekio padidėjimas išoriniuose sluoksniuose sukeltų papildomų boro junginių su kitais elementais – boridų – susidarymą, kuriuo galima būtų paaiškinti mikrokietaumo padidėjimą šioje srityje.

Struktūrinių dedamųjų mikrokietaumas

Perlydytų B tipo dangų mikrostruktūros elementų mikrokietaumo matavimų rezultatai pateikiami 3.7 lentelėje. Mikrokietaumas buvo nustatomas Vikerso metodu taikant 10 g ir 25 g apkrovas bei Knopo metodu su 10 g apkrova.

Kaip ir A tipo dangose (3.4 lentelė), B dangose mažiausias mikrokietaumas nustatytas plokštuminės kristalizacijos sluoksnyje (~300 HV) ir metalinės matricos γ -Ni dendrituose (apie 400–500 HV). Nors šias fazes sudaro ta pati γ -Ni fazė, tačiau γ -Ni dendritai pagrindiniame dangose sluoksnyje yra apie 200 HV kietesni palyginti su γ -Ni sluoksniu prie sąlyčio linijos. Tai, greičiausia, galima

paišškinti tuo, kad susidarant šiam sluoksniui kristalizacijos frontas išstumia dalį priemaišinių elementų ir suformuoja minkštesnę struktūrą. Tuo tarpu γ -Ni dendrituose gausu Si, Fe, Cr ir C, todėl susidaręs kietasis tirpalas pasižymi didesniu kiečiu.

Ni–B fazėje nustatytas nuo 618 HV iki 1235 HV mikrokietumas. Kaip ir A dangose, mažesnės reikšmės atitinka γ -Ni/ Ni_3B eutektikos fazę, o didesnės – Ni_3B boridą.

Kietųjų intarpų mikrokietumo reikšmės B tipo dangose suskirstyti į du intervalus. Mažesnių reikšmių intervalas (1095–1876 HV) greičiausia atitinka M_{23}C_6 ir M_7C_3 tipų karbidus, didesnių (2461–2544 HV) – boridus. Visiems B tipo dangos mikrostruktūros elementams būdingas 100–300 HV didesnis, palyginti su A tipo danga, mikrokietumas. Bendrą dangos stiprumą užtikrina ne tik didesnis kietųjų intarpų kiekis, bet ir legiravimu sustiprinta metalinė matrica.

3.7 lentelė. Perlydytų B dangų mikrostruktūros elementų mikrokietumas

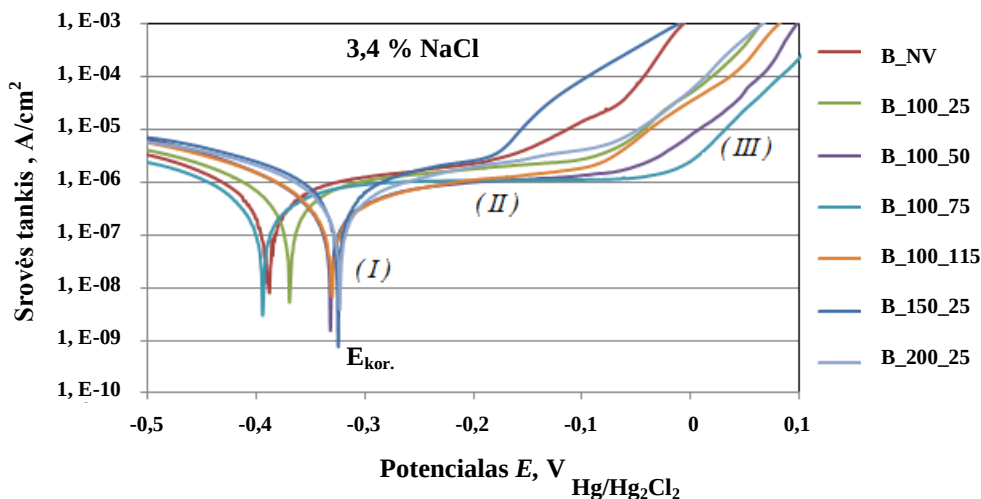
Table 3.7. Microhardness of microstructural constituents of refused B-type coatings

Mikrostruktūros elementas	Mikrokietumas	
	HV 0,01 / HV 0,025	HK 0,01 (HV perskaičiuotas)
Plokštuminės kristalizacijos sluoksniš	249–292 / 277–325	336–380 (330–372)
γ -Ni	397–519 / 455–519	380–525 (372–497)
Ni-B (I) (II)	618–844 / 647–947	-
	1170–1235 / 1250	-
Kietieji intarpai	1095–1876 / 1735–1884	-
	2461–2544 / 2274–3597	-

3.2.5. Vibracijų poveikis perlydytų B dangų koroziniam atsparumui

Tyrimų metu nustatytas padidėjęs vibruotų B tipo dangų mikrokietumas, kurį savo ruožtu galėjo sukelti didesnio kietųjų intarpų kiekio formavimas pagrindiniame sluoksnyje. Siekiant ištirti, ar šis efektas neturi neigiamo poveikio dangų antikorozinėms savybėms, atlikti elektrocheminės korozijos bandymai. Šiuo atveju dangų termodinaminis polinkis elektrocheminei korozijai buvo vertinamas lyginant korozijos potencialus $E_{kor.}$, gautus potenciodinaminės poliarizacijos matavimais.

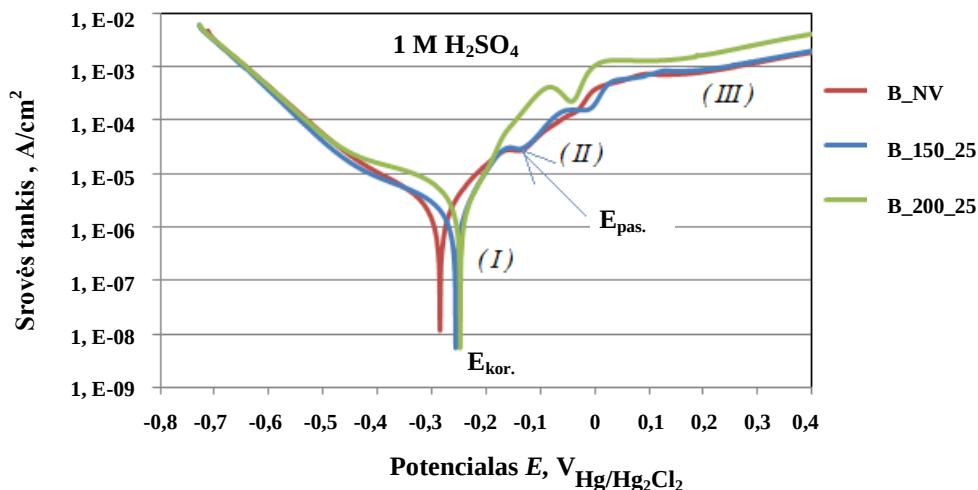
Perlydytų B dangų potenciodinaminės poliarizacijos kreivės 3,4% NaCl tirpale pateiktos 3.32 paveiksle. Nevibruotos dangos poliarizacijos kreivės smailė susidarė esant $-0,3877$ V potencialui. Jį pasiekus prasidėjo staigus anodinės srovės didėjimas – aktyvaus tirpimo stadija (I). Toliau didinant potencialą srovė nustoja didėti ir bandomasis paviršius pereina į pasyvią būseną (II). Kreivės forma šiuo atveju neleidžia tiksliai nustatyti pasyvacijos pradžios potencialo E_{pas} . Tolimesnis potencialo didinimas sukelia laipsninį anodinės srovės didėjimą, greičiausia susijusį su pitingų susidarymu. Visų bandinių poliarizacijos kreivės turi vienodą formą. Tai rodo, kad vibracinis apdorojimas neturėjo įtakos korozijos procesų pobūdžiui. Tačiau smailių perslinkimas į didesnių potencialų sritį parodo didesnę vibruotų dangų termodinaminį stabilumą šioje terpėje. Be to, didesni korozijos potencialai atitinka didesnes amplitudžių ir dažnių reikšmes (3.8 lentelė).



3.32 pav. B dangų potenciodinaminės poliarizacijos kreivės 3,4% NaCl tirpale
Fig. 3.32. Curves of B-type coatings potentiodynamic polarization in 3,4% NaCl solution

Tik vieno bandinio smailė susidarė esant mažesniai potencialui negu nevibruoto. Tai B_{100_75} bandinys, kuriame buvo aptiktas storiausias beboridinis sluoksnis ir nustatytas didžiausias mikrokietumas. Tačiau $E_{kor.}$ reikšmės abiem bandiniams (B_{100_75} ir B_{NV}) labai panašios. Be to B_{100_75} poliarizacijos kreivė 3,4% NaCl tirpale parodė ilgiausią iš visų pasyvios būsenos stadiją.

Potenciodinaminės poliarizacijos matavimai 1M H_2SO_4 tirpale atlikti su trimis bandiniais. Tai B_{150_25} ir B_{200_25} bandiniai, kurių atsparumas poliarizacijai NaCl tirpale buvo geriausias, ir nevibruotas etalonas B_{NV} . Rezultatai pateikti 3.33 paveiksle.



3.33 pav. B dangų potenciodinaminės poliarizacijos kreivės 1M H₂SO₄ tirpale
Fig. 3.33. Curves of B-type coatings potentiodynamic polarization in 1M H₂SO₄ solution

3.8 lentelė. B dangų korozijos potencialai $E_{kor.}$ skirtingose terpėse didėjimo tvarka
Table 3.8. Corrosion potentials E_{corr} of B-type coatings in different solution in order of increasing

3,4% NaCl tirpalas		0,1M H ₂ SO ₄ tirpalas	
Serija	$E_{kor.}, V$	Serija	$E_{kor.}, V$
B_100_75	-0,39413	B_100_75	-
B_NV	-0,3877	B_NV	-0,2850
B_100_25	-0,36942	B_100_25	-
B_100_50	-0,33173	B_100_50	-
B_100_115	-0,3299	B_100_115	-
B_150_25	-0,3244	B_150_25	-0,2560
B_200_25	-0,32318	B_200_25	-0,24771

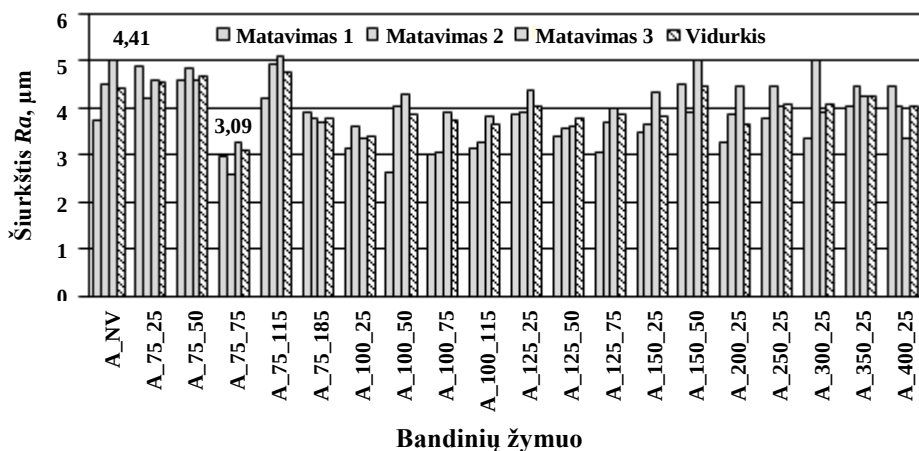
Iš kreivių matyti, kad šiuo atveju pasyvacijos stadija (II) turi laikiną pobūdį ir pasiekus tam tikrą pasyvacijos potencialą $E_{pas.}$ vėl prasideda intensyvus anodinės srovės didėjimas, susijęs su pitingų susidarymu. *B_200_25* kreivė šiek tiek skiriasi nuo dviejų kitų. Šiuo atveju laikina pasyvacija prasideda esant didesnei srovei ir potencialui. Priežastis šiuo atvejų galėtų atskleisti tik detalesni korozijos procesų tyrimai. Kreivių smailių išsidėstymas rodo, kad vibruotų dan-

gų korozinis stabilumas šioje terpėje taip pat yra ne blogesnis negu nevibruoto etalono. Be to, išsilaiko panaši tendencija: didesnė E_{kor} reikšmė taip pat atitinka didesnę vibracinio apdorojimo parametą – šiuo atveju dažnį.

3.3. Vibracijų poveikis perlydytų A ir B dangų paviršiaus šiurkščiui

Dangų paviršiaus būklė po perlydymo įvertinta šiurkščio parametro Ra matavimais. Rezultatai pateikti 3.34 ir 3.35 paveiksluose.

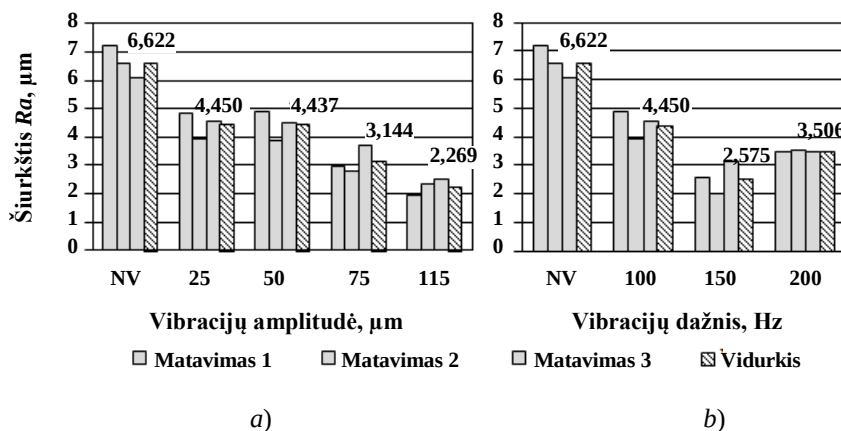
A tipo nevibruotų dangų paviršiuose išmatuotos parametro Ra reikšmės išsidėstė 4–5 μm intervale ir vidurkis sudarė 4,41 μm . Nevibruotose B dangose nustatytas didesnis šiurkštumas (~6,6 μm), kurį, greičiausia, lėmė sunkiai lydžių kietųjų intarpų sanaujos prie pat paviršiaus.



3.34 pav. A dangų paviršiaus šiurkštis Ra
Fig. 3.34. Roughness Ra of A-type coatings surface

Iš 3.34 paveiksle pateiktų duomenų matyti, kad A tipo vibruotų dangų šiurkščio reikšmės svyruoja tiek toje pačioje dangoje, tiek keičiantis vibracinio apdorojimo parametrams. Šiuo atveju galima apibrėžti tik bendrą tendenciją, kad vibruotų dangų Ra reikšmės yra panašaus lygio su nevibruotu etalonu arba šiek tiek mažesnės. Tiriant tik vieną bandinių seriją ($A_{75_{75}}$) buvo nustatytas ženklus šiurkščio sumažėjimas iki 3,1 μm .

B dangose vibracinio apdorojimo poveikis paviršiaus būsenai pasireiškė stipriau. Tam galėjo turėti įtakos platesnis *solidus–liquidus* temperatūrų intervalas, nustatytas šių dangų lydiniui DTA metu (2.4 lentelė), ir žemesnė kristalizacijos pabaigos temperatūra.



3.35 pav. B dangų šiurkščio R_a priklausomybės nuo amplitudės (a) esant pastoviam 100 Hz dažniui, nuo dažnio (b) esant pastoviai amplitudei 25 μm

Fig. 3.35. B-type coatings roughness R_a dependences on the amplitude (a) under constant frequency of 100 Hz and on the frequency (b) under constant amplitude of 25 μm

3.35 paveiksle pateiktos reikšmės rodo, kad, keičiant dažnį, šiurkščio minimumas (2,575 μm) pasiekiamas esant 150 Hz dažniui. Ir tai 2,6 karto mažiau lyginant su nevibruotu paviršiumi. Toliau padidinus dažnį iki 200 Hz šiurkštis padidėjo. Geresni rezultatai nustatyti keičiant amplitudę: šiuo atveju visų matavimų sekoje išsilaikė šiurkštumo laipsninio mažėjimo tendencija didinant amplitudę nuo 0 μm iki 115 μm . Mažiausia 2,269 μm R_a reikšmė nustatyta dangoje, vibruotoje su didžiausia 115 μm amplitude. Ir tai 2,9 karto mažesnis šiurkštis negu nevibruoto etalono.

3.4. Trečiojo skyriaus išvados

1. Ni pagrindo perlydomosios dangos, pagamintos taikant dviejų pakopų liepsninio purškimo perlydymo technologinį procesą, sudaro substrato paviršiuje vientisą sluoksnį su tolygiu perėjimu į substratą ir žemu aktyvumo lygiu. Mikrostruktūros tyrimais nustatyta, kad pradinės medžiagos (purškimo miltelių) forma ir dydis turi didelę įtaką perlydytų dangų struktūros susidarymui. Mažiau legiruoto (~82 % Ni) lydinio dangose šis poveikis išreikštas silpnai. Gausiai legiruotose (~67 % Ni) boridų turinčiose dangose susidaro zoninė struktūra, stambesnėms dalelėms tik apsilydant, o smulkesnėms – išsilydant ir užpildant poras ir tuštumas aplink stambesnes.

2. Perlydymo metu veikiant vibracijomis mažiau legiruotas perlydomąsias Ni pagrindo dangas su vyraujančia γ -Ni kietojo tirpalo kristalizacija susidaro iki 2,4 karto smulkesnė mikrostruktūra. Struktūros susmulkėjimo poveikis pasireiškia taikant mechaninius virpesius tiek statmenai, tiek lygiagrečiai substratui.
3. Lyginamąja analize nustatyta, kad vibruojant mažiau legiruotas Ni dangas lygiagrečiai substratui stiprus struktūros susmulkėjimo efektas (2,1–2,4 karto) susidaro 75–200 Hz dažnių diapazone, šis efektas priklauso tiek nuo dažnio, tiek nuo amplitudės ir gali būti pasiektas taikant skirtingus dažnio ir amplitudės derinius. Iš to taip pat galima teigti, kad stipriam struktūros susmulkėjimo efektui pasiekti pakanka parinkti tinkamą amplitudę taikant tik vieno dažnio vibracijas iš nurodyto dažnių intervalo.
4. Mažiau legiruotų dangų mechaninių savybių tyrimai kietumo, mikrokietumo ir dilimo bandymais parodė, kad vibruotos smulkesnės struktūros dangos, kaip ir buvo laukiama, yra kietesnės ir atsparesnės dilimui. Taikant vibracinį apdorojimą statmenai substratui kietumas padidėjo iki ~10 % ir tai leido pagerinti atsparumą dilimui iki 9–15 %. Įvedant vibracijas lygiagrečiai substratui kietumas padidėjo iki ~19 %. Tai leidžia teigti, kad taikomų parametrų diapazone vibravimas lygiagrečiai substratui yra efektyvesnis. Atsižvelgiant į kietumo bandymų rezultatus efektyviausių dažnių intervalas gali būti sumažintas iki 100–200 Hz.
5. Kadangi mažiau legiruotų dangų fazinė sudėtis po vibravimo nepasikeitė, galima teigti, kad struktūros sustiprinimo efektas šiuo atveju pasiekiamas dėl struktūros darinių susmulkėjimo.
6. Gausiai legiruotose boridus sudarančiose Ni dangose vibracinis apdorojimas suformavo papildomą minkštesnį beboridinį sluoksnį tarp substrato ir pagrindinės dangos dalies. Nustatyta, kad didėjant beboridinio sluoksnio storii, didėja dangos pagrindinio darbinio sluoksnio kietumas (iki ~19 %) ir amplitudės kitimas turi stipresnį poveikį šiam efektui negu dažnio kitimas. Stambesnės struktūros elementų vyravimas beboridiniame sluoksnyje ir nustatytas ryšis tarp šio sluoksnio storio ir išorinių dangos sluoksnių mikrokietumo parodo, kad vibracijos veikia struktūrą mažiausiai dviem mechanizmais.
7. Potenciodinaminės poliarizacijos matavimais nustatyta, kad gausiai legiruotų vibruotų dangų padidėjusio kietumo darbinių sluoksnių korozinis stabilumas 3,4% NaCl ir 1 M H₂SO₄ tirpaluose ne blogesnis negu nevibruoto etalono.

8. Beborodinio sluoksnio storiui ir didesnio mikrokietumo susidarymui gausiai legiruotų Ni dangų išoriniuose sluoksniuose stipresnę poveikį taikytų vibracinio apdorojimo parametrų intervale turėjo vibracijų amplitudė.
9. Paviršiaus šiurkščio matavimais nustatyta, kad vibracinis apdorojimas lygiagrečiai substratui teigiamai veikia perlydomųjų dangų paviršiaus būseną mažindamas paviršiaus nelygumus. Mažiau legiruotose Ni dangose šis poveikis išreikštas silpnai. Gausiai legiruotose dangose nustatytos iki 3 kartų mažesnės Ra parametro reikšmės palyginti su nevibruotu etalonu. Taip pat nustatyta, kad amplitudės pokytis turi tam stipresnę poveikį negu dažnio ir didėjant amplitudei perlydytų dangų šiurkštis Ra mažėja. Tam, kad gausiai legiruotose dangose šiurkščio sumažėjimo efektas pasireiškia stipriau, gali turėti įtakos šių dangų lydinio platesnis *solidus-liquidus* temperatūrų intervalas ir žemesnė kristalizacijos pabaigos temperatūra.
10. Nustačius, kad amplitudė turi stipresnę poveikį gausiai legiruotų Ni dangų sluoksninės struktūros susidarymui, mažiau legiruotų Ni dangų struktūros susmulkėjimui ir dangų šiurkščio mažėjimui, galima teigti, kad mechaninių virpesių amplitudė yra efektyvesnis vibracinio apdorojimo parametras.

Bendrosios išvados

1. Žemo dažnio vibracinis apdorojimas, taikomas perlydymo metu, turi įtakos purkštųjų perlydomųjų Ni pagrindo dangų kokybinėms charakteristikoms (mikrostruktūrai, kietumui, šiurkščiui, atsparumui dilimui) ir leidžia jas pagerinti.
2. Žemo dažnio vibracinis apdorojimas skirtingai veikia skirtingos cheminės sudėties Ni pagrindo dangas:
 - mažiau legiruotose (~82 % Ni) perlydomosiose Ni pagrindo dangose su vyraujančia γ -Ni kietojo tirpalo kristalizacija vibracijos lygiagrečiai ir statmenai substratui sukelia struktūros grūdo smulkėjimo (iki 2,4 karto) efektą, tuo pačiu didina dangos kietumą (iki 19 %) ir jos atsparumą dilimui (iki 9–15 %); stipriausias poveikis nustatytas 100–200 Hz dažnių intervale;
 - gausiai legiruotose ir boridų turinčiose Ni pagrindo (~67 % Ni) perlydomosiose dangose 100–200 Hz dažnio vibracinis apdorojimas lygiagrečiai substratui sukuria sluoksninę struktūrą, kurioje kietumas, nuo sulydymo linijos link paviršiaus, laipsniškai didėja. Tuo pačiu dangoje susidaro iki 19 % kietesnis pagrindinis darbinis sluoksnis, kurio atsparumas korozijai padidėja arba išlieka nepakitęs, o dangų paviršiaus šiurkštis sumažėja iki 3 kartų.

3. Vibracinio apdorojimo efektyvumas daugiausia priklauso nuo mechaninių virpesių amplitudės. Amplitudės pokytis turi stipresnį poveikį mažiau legiruotų Ni dangų struktūros darinių smulkėjimui, o gausiai legiruotų Ni dangų – sluoksninės struktūros susidarymui ir dangų paviršiaus šiurkščio sumažėjimui.
4. Tiriant vibracinio apdorojimo poveikį gaunamų dangų struktūros fazinei sudėčiai esminių pokyčių nenustatyta.

Literatūra ir šaltiniai

ASM International. 2000. *ASM Specialty Handbook: Nickel, Cobalt, and Their Alloys*. ASM International. 442 p. ISBN 0-87170-685-7.

ASM International. 2004. *Handbook of Thermal Spray Technology*. ASM International. 338 p. ISBN 0-87170-795-0.

Ajao, J., Hamar-Thibault, S. 1988. Influence of additions on the solidification behaviour of Ni-B alloys – crystallography of Ni–Ni₃B eutectic, *Journal of Materials Science* 23: 1112–1125 .

Babiak, Z., Wenz, T., Engl, L. 2006. Fundamentals of thermal spraying, flame and arc spraying, chapter in a book *Modern Surface Technology* (edited by Bach, F.W., Laarmann, A., Wenz, T.).

Balic, E., Hadad, M., Bandyopadhyay, P., Michler, J. 2009. Fundamentals of adhesion of thermal spray coatings: Adhesion of single splats, *Acta Materialia* 57: 5921–5926.

Cai, B., Tan, Y., He, L., Tan, H., Gao, L. 2013. Tribological properties of TiC particles reinforced Ni-based alloy composite coatings, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* 23: 1681–1688.

Chen, H., Xu, C., Chen, J., Zhao, H., Zhang, L., Wang, Z. 2008. Microstructure and phase transformation of WC/Ni60B laser cladding coatings during dry sliding wear, *Wear* 264: 487–493.

- Chirita, G., Stefanescu, I., Soares, D., Silva, F. S. 2009. Influence of vibration on the solidification behavior and tensile properties of an Al-18 wt% Si alloy, *Materials and Design* 30: 1575–1580.
- Cho, S., Takagi, K., Kwon, H., Seo, D., Ogawa, K., Kikuchi, K., Kawasaki, A. 2012. Multi-walled carbon nanotube-reinforced copper nanocomposite coating fabricated by low-pressure cold spray process, *Surface and Coatings Technology* 206: 3488–3494.
- Conde, A., Zubiri, F., Damborenea, J. 2002. Cladding of Ni–Cr–B–Si coatings with a high power diode laser, *Materials Science and Engineering A* 334: 233–238.
- Dorfman, M. R. 2012. Thermal spray coatings, *Handbook of Environmental Degradation of Materials* 2nd ed.: 569–596.
- Fauchais, P. 2004. Understanding plasma spraying, *Journal of Physics* 37: 86–108.
- Foroozmehr, E., Lin, D., Kovacevic, R. 2009. Application of vibration in the laser powder deposition process, *Journal of Manufacturing Process* 11: pp. 38–44.
- Gang, J., Morniroli, J. P., Grosdidier, T. 2003. Nanostructures in thermal spray coatings, *Scripta Materialia* 48: 1599–1604.
- GEDŽEVIČIUS, I. 2005. *Metaliųjų purkštųjų dangų struktūros ir savybių priklausomybės nuo technologinių parametrų tyrimas*. Daktaro disertacija. Vilnius: Technika. 119 p.
- Gomez-del Rio, T., Garrido, M. A., Fernandez, J. E., Cadenas, M., Rodriguez, J. 2008. Influence of the deposition techniques on the mechanical properties and microstructure of NiCrBSi coatings, *Journal of Materials Processing Technology* 204: 304–312.
- Gonzalez, R., Garcia, M. A., Penuelas, I., Cadenas, M., del Rocio Fernandez, Ma., Hernandez Battez, A., Felgueroso, D. 2007. Microstructural study of NiCrBSi coatings obtained by different processes, *Wear* 263: 619–624.
- Grainger, S., Blunt, J. 1998. *Engineering coatings – design and application*. 2nd ed. Cambridge: Abington. ISBN: 1-85573-369-2.
- Grigorescu, I. C., Rauso, C. Di., Drira-Halouani, R., Lavelle, B., Di Giampaolo, R., Lira, J. 1995. Phase characterization in Ni alloy-hard carbide composites for fused coatings, *Surface and Coatings Technology* 76–77: 494–498.
- Hemmati, I., Ocelik, V., De Hosson, J. T. M. 2011. Evolution of microstructure and properties in laser cladding of a Ni-Cr-B-Si hardfacing alloy, *Contact Mechanics and Surface Treatments* X: 287–296.
- Hemmati, I., Ocelik, V., De Hosson, J. T. M. 2013a. Effects of the alloy composition on phase constitution and properties of laser deposited Ni-Cr-B-Si coatings, *Physics Procedia* 41: 302–311.
- Hemmati, I., Ocelik, V., De Hosson, J. T. M. 2013b. Electron Microscopy Characterization of Ni-Cr-B-Si-C Laser Deposited Coatings, *Microscopy and Microanalysis* 19 (1): 120–131.

- Hou, Q. Y., Huang, Z. Y., Shi, N., Gao, J. S. 2009. Effect of molybdenum on the microstructure and wear resistance of nickel-based hardfacing alloys investigated using Rietveld method, *Journal of Materials Processing Technology* 209: 2767–2772.
- Jiang, B., Weng, G. J. 2004. A theory of compressive yield strength of nano-grained ceramics, *International Journal of Plasticity* 20: 2007–2026.
- Jiang, X. I., Liu, Ch. B., Liu, M., Zhu, H. Z. 2010. Influence of heat treatment on nanocrystalline zirconia powder and plasma-sprayed thermal barrier coatings, *Transactions of Nonferrous Materials Society of China* 20: 2272–2280.
- Jurčius, A., Valiulis, A. V., Černašėjus, O. 2011. Influence of vibratory stress relief on residual stresses in bridge structural members weldments, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* 4 (6): pp. 243–248.
- Kim, H. J., Hwang, S. Y., Lee, C. H., Juvanon, P. 2003. Assessment of wear performance of flame sprayed and fused Ni-based coatings, *Surface and Coatings Technology* 172: 262–269.
- Kim, H. G., Jang, H. J. 2011. Electrochemical Corrosion Behaviors of Amorphous Co69Fe4.5Ni1.5Si10B15 Alloy, *Metals and Materials International* 17 (5): 783–787.
- Kocatepe, K. 2007. Effect of low frequency vibration on porosity of LM25 and LM6 alloys, *Materials and Design* 28: pp. 1767–1775.
- Kurz, W., Triverdi, R. 1994. Rapid solidification processing and microstructure formation, *Materials Science and Engineering* 179–180: 46–51.
- Lebaili, S., Durand-Charre, M., Hamar-Thibault, S. 1988. The Metallurgical structure of as-solidified NiCrBSiC hardfacing alloys, *Journal of Materials Science* 23: 3603–3611.
- Lee, K., Son, Ch. Y., Kim, J., Lee, S., Kim, K., Kim, Ch. 2006. Corrosion resistance of steel-based surface alloyed materials fabricated with Fe-based metamorphic powders by high-energy electron beam irradiation, *Materials Science and Engineering A* 441: 291–298.
- Li, Q., Lei, T. C., Chen, W. Z. 1999. Microstructural characterization of laser-clad TiCp-reinforced Ni–Cr–B–Si–C composite coatings on steel, *Surface and Coatings Technology* 114: 278–284.
- Li, Q., Zhang, D., Lei, T., Chen, Ch., Chen, W. 2001. Comparison of laser-clad and furnace-melted Ni-based alloy microstructures, *Surface and Coatings Technology* 137: 122–135.
- Li, Q., Songb, G. M., Zhang, Y. Z., Lei, T. C., Chena, W. Z. 2003. Microstructure and dry sliding wear behavior of laser clad Ni-based alloy coating with the addition of SiC, *Wear* 254: 222–229.
- Liyanage, T., Fisher, G., Gerlich, A. P. 2010. Influence of alloy chemistry on microstructure and properties in NiCrBSi overlay coatings deposited by plasma transferred arc welding (PTAW), *Surface and Coatings Technology* 205: 759–765.

Limmaneevichitr, Ch., Pongananpanya, S., Kajornchaiyakul, J. 2009. Metallurgical structure of A356 aluminum alloy solidified under mechanical vibration: An investigation of alternative semi-solid casting routes, *Materials and Design* 30: 3925–3930.

LST EN 13507: 2010. *Terminis purškimas. Metalinių dalių ir komponentų, skirtų terminiam purškimui, paviršių parengiamasis apdorojimas.*

Liu, S. L., Zheng, X. P., Geng, G. Q. 2010. Influence of nano-WC–12Co powder addition in WC–10Co–4Cr AC-HVAF sprayed coatings on wear and erosion behaviour, *Wear* 269: 362–367.

Martin, A., Rodriguez, J., Fernandez, J. E., Vijande, R. 2001. Sliding wear behaviour of plasma sprayed WC–NiCrBSi coatings at different temperatures, *Wear* 251: 1017–1022.

Miao, S. M., Lei, M. K. 2006. Surface morphology of Cr₂O₃ coatings on steel irradiated by high-intensity pulsed ion beam, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* 243: 335–339.

Miguel, J. M., Guilemany, J. M., Vizcaino, S. 2003. Tribological study of NiCrBSi coating obtained by different processes, *Tribology International* 36: 181–187.

Navas, C., Colaco, R., de Damborenea, J., Vilar, R. 2006. Abrasive wear behaviour of laser clad and flame sprayed-melted NiCrBSi coatings, *Surface and Coatings Technology* 200: 6854–6862.

Niranatlumpong, P., Koiprasert, H. 2011. Phase transformation of NiCrBSi–WC and NiBSi–WC arc sprayed coatings, *Surface and Coatings Technology* 206: 440–445.

Nuradinov A. S. 2007. *Control of formation structure of metal billets by heatforce influences on solidifying alloys.* Thesis for competition for Doctor of Engineering Science. Physics-Technological Institute of Metals and Alloys of NAS of Ukraine, Kiev.

Ornitz, N. Metal casting. 1959. US patent No. 2897557.

Patton, A. Metal casting. 1962. US patent No. 3045302.

Pawlowski, L. 2008. Finely grained nanometric and submicrometric coatings by thermal spraying: A review, *Surface and Coatings Technology* 202: 4318–4328.

Przybyłowicz, J., Kusinski, J. 2001. Structure of laser clad tungsten carbide composite coatings, *Journal of Materials Processing Technology* 109: 154–160.

Qin, L., Lian, J. Sh., Jiang, Q. 2010. Effect of grain size on corrosion behavior of electrodeposited bulk nanocrystalline Ni, *Transactions of Nonferrous Materials Society of China* 20: 82–89.

Qinghua, L., Ligong, Ch., V, Chunzhen, N. 2008. Effect of vibratory weld conditioning on welded valve properties, *Mechanics of Materials* 40: 565–574.

Racek, O., Berndt, C. C., Guru, D. N., Heberlein, J. 2006. Nanostructured and conventional YSZ coatings deposited using APS and TTPR techniques, *Surface and Coatings Technology* 201: 338–346.

Saremi, M., Valefi, Z., Abaeian, N. 2013. Hot corrosion, high temperature oxidation and thermal shock behavior of nanoagglomerated YSZ–Alumina composite coatings produced by plasma spray method, *Surface and Coatings Technology* 221: 133–141.

Schneider, K. E., Belashchenko, V., Dratwinski, M., Siegmann, S., Zagorski, A. 2006. *Thermal Spraying for Power Generation Components*. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. ISBN: 3-527-31337-0.

Schoop, M. U. 1927. US Patent 1617166. *Device for coating articles with glass, enamel, quartz, and metals*.

Serres, N., Hlawka, F., Costil, S., Langlade, C., Machi, F. 2010. Microstructure and environmental assessment of metallic NiCrBSi coatings manufactured via hybrid plasma spray process, *Surface and Coatings Technology* 205: 1039–1046.

Sharma, S. 2012. Wear study of Ni–WC composite coating modified with CeO₂, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 61(9–12):889–900.

Sharma, S. P., Dwivedi, D. K., Jain, P. K. 2009. Effect of La₂O₃ addition on the microstructure, hardness and abrasive wear behavior of flame sprayed Ni based coatings, *Wear* 267: 853–859.

Shrestha, S., Hodgkiss, T., Neville, A. 2005. Erosion–corrosion behaviour of high-velocity oxy-fuel Ni–Cr–Mo–Si–B coatings under high-velocity seawater jet impingement, *Wear* 259: 208–218.

Sidhu, T. S., Prakash, S., Agrawal, R. D. 2006. Hot corrosion and performance of nickel-based coatings, *Current Science* 90(1): 41–47.

Simunovic, K. 2010. Thermal spraying, paper in a book *Welding Engineering and Technology*. Oxford: Eolss Publishers. ISBN: 978-1-905839.

Smith, G.H. 1958. US patent 2861900. *Jet plating of high melting point materials*.

Sudha, C., Shankar, P., Subba Rao, R. V., Thirumurugesan, R., Vijayalakshmi, M., Baldev Raj. 2008. Microchemical and microstructural studies in PTA weld overlay of Ni–Cr–Si–B alloy on AISI 304L stainless steel, *Surface and Coatings Technology* 202: 2103–2112.

Sulitsin, A. V., Mysik, R. K., Golodnov, A. I., Brusnitsin, S. V. 2010. Vibration influence on the inverted-V-shaped and dendritic segregation of cadmium in ingots of cadmium bronze, *Metallurgy and Materials Technology* IV–1 (4): 47–53.

Taghavi, F., Saghafian, H., Kharrazi, Y. H. K. 2009. Study on the effect of prolonged mechanical vibration on the grain refinement and density of A356 aluminum alloy, *Materials and Design* 30: 1604–1611.

Tao, Z., Xun, C., Shunxing, W., Shian, Z. 2000. Effect of CeO₂ on microstructure and corrosive wear behavior of laser-cladded Ni–WC coating, *Thin Solid Films* 379: 128–132.

Toma, F. L., Berger, L. M., Naumann, T., Langner, S. 2008. Microstructures of nanostructured ceramic coatings obtained by suspensijon thermal spraying, *Surface and Coatings Technology* 202: 4343–4348.

Tu, J. P., Liu, M. S., Mao, Z. Y. 1997. Erosion resistance of Ni–WC self-fluxing alloy coating at high temperature, *Wear* 209: 43–48.

Valiulis, A. V. 2005. *Naujos medžiagos: vadovėlis*. Vilnius: Technika. 280 p. ISBN 9986-05-827-9.

Vicent, M., Sánchez, E., Moreno, A., Moreno, R. 2012. Preparation of high solids content nano-titania suspensions to obtain spray-dried nanostructured powders for atmospheric plasma spraying, *Journal of the European Ceramic Society* 32: 185–194.

Wang, L. L., Chen, H. J., Hao, L., Lin, A., Gan, F. X. 2011. Electrochemical corrosion behavior of electroless Ni–P coating in NaCl and H₂SO₄ solutions, *Materials and Corrosion* 62 (11): 1003–1007.

Wu, P., Du, H. M., Chen, X. L., Li, Z. Q., Bai, H. L., Jiang, E. Y. 2004. Influence of WC particle behavior on the wear resistance properties of Ni–WC composite coatings, *Wear* 257: 142–147.

Wu, P., Zhou, C. Z., Tang, X. N. 1995. Laser alloying of a gradient metal-ceramic layer to enhance wear properties, *Surface and Coatings Technology* 73: 111–114

Wu, S., Xie, L., Zhao, J., Nakae, H. 2008. Formation of non-dendritic microstructure of semi-solid aluminum alloy under vibration, *Scripta Materialia* 58: 556–559.

Wu, Y. N., Wang, F. H., Hua, W. G., Gong, J., Sun, C., Wen, L. S. 2003. Oxidation behaviour of thermal barrier coatings obtained by detonation spraying, *Surface and Coatings Technology* 166: 189–194.

Wang, S., Li, H., Chen, X., Chi, J., Li, M., Chai, L., Xu, H. 2010. Improving microstructure and wear resistance of plasma clad Fe-based alloy coating by a mechanical vibration technique during cladding, *Materials Science and Engineering A* 528: pp. 397–401.

Wang, H., Xia, W., Jin, Y. 1996. A study on abrasive resistance of Ni-based coatings with a WC hard phase, *Wear* 195: 47–52.

Xu, G., Kutsuna, M., Liu, Z., Zhang, H. 2006. Characteristics of Ni-based coating layer formed by laser and plasma cladding processes, *Materials Science and Engineering A* 417: 63–72.

Yin, B., Liu, G., Zhou, H., Chen, J., Yan, F. 2010. Microstructures and properties of plasma sprayed FeAl/CeO₂/ZrO₂ nano-composite coating, *Applied Surface Science* 256: 4176–4184.

Yuan, J., Zhan, Q., Lei, Q., Ding, S., Li, H. 2012. Fabrication and characterization of hybrid micro/nano-structured hydrophilic titania coatings deposited by suspension flame spraying, *Applied Surface Science* 258: 6672–6678.

Zhang, Z., Wang, Z., Liang, B., Dong, H.B., Hainsworth, S. V. 2007. Effect of CeO₂ on the microstructure and behaviour of thermal spray welded NiCrWRe coatings, *Wear* 262: 562–567.

Zhang, Z., Wang, Z., Liang, B. 2006. Tribological properties of flame sprayed Fe–Ni–RE alloy coatings under reciprocating sliding, *Tribology International* 39: 1462–1468.

Zhang, Z., Lu, X., Han, B., Luo, J. 2007. Rare earth effect on the microstructure and wear resistance of Ni-based coatings, *Materials Science and Engineering A* 454–455: 194–202.

Zhou, Ch., Zhang, Q., Li, Y. 2013. Thermal shock behavior of nanostructured and microstructured thermal barrier coatings on a Fe-based alloy, *Surface and Coatings Technology* 217: 70–75.

Абрамов, О. В., Хорбенко, И. Г., Швегла, Ш. 1984. *Ультразвуковая обработка материалов*. Москва, Машиностроение = Братислава, Альфа. 280 с.

Аверин, А. С. 1985. *Разработка технологии вибрационной обработки металлических расплавов с целью повышения качества литых изделий*. Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук. Москва, 195 с.

Быховский, И. 1966. Прогресс вибрационной техники и задачи научных исследований, *Вибрационная техника: материалы научно-технической конференции: [1–5 июня 1965]*, Москва: 506 с.

Долматов, А. В. 2006. *Влияние обработки алюминиевых расплавов упругими низкочастотными колебаниями на структуру и свойства литого металла*. Диссертация на соискание учёной степени кандидата химических наук. Екатеринбург, 139 с.

Коровов, Ю. С. 2010. Международная выставка–конференция по термическому напылению ITSC 2010: обзор и анализ, *Термическое напыление – современное состояние, Материалы международного научно-практического семинара (28–29 сентября 2010 г., Екатеринбург)*: 4–24.

Кравцов, В. В. 1999. *Коррозия и защита конструкционных материалов. Принципы защиты от коррозии*. Учебное пособие. Уфа: Изд-во УГНТУ. 157 с.

Кудрин, В. А. 1992. *Внепечная обработка чугуна и стали*. Москва, Металлургия: 336 с.

Мамина, Л. 2009. *Теоретические основы литейного производства* (elektroninis resursas). Красноярск: IPK SFU. ISBN 978-5-7638-1783-6. Prieiga per internetą: http://files.lib.sfu-kras.ru/ebibl/umkd/1855/u_lecture.pdf

Пантелеенко, Ф. 2003. *Восстановление деталей машин*. Москва, Машиностроение: 672 с.

Плинер, Ю., Игнатенко, Г., Лаппо, С. 1965. *Металлургия хрома*. Москва, Металлургия: 186 с.

Погодин-Алексеев, Г. 1961. *Ультразвук и низкочастотная вибрация в производстве сплавов*. ЦПИТО Машпром: 83 с.

Ризванов, Р. Г., Файрушин, А. М., Каретников, Д. В. 2013. Исследование влияния вибрационной обработки на механические свойства и трещиностойкость сварных соединений труб из жаропрочной стали 15X5М, *Нефтегазовое дело*, 2013, № 1: 369–384.

Самсонов, Г. В., Серебрякова, Т. И., Неронов, В. А. 1975. *Бориды*. Москва, Атомиздат: 376 с.

Сайфуллин, Р. С. 1977. *Композиционные покрытия и материалы*. Москва, Химия: 272 с.

Соболев, А. С., Федоров, Т. Ф. 1967. *Диаграмма состояния системы никель – бор*. АН СССР, Неорганические материалы т. 3, № 4: 723 с.

Сокол, И. Я. и др. 1989. *Структура и коррозия металлов и сплавов. Атлас. Справочник*. Москва, Металлургия: 400 с.

Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema sąrašas

Straipsniai recenzuojamuose mokslo žurnaluose

Škamat, J., Valiulis, A. V., Černašėjus, O. 2010. The influence of mechanical vibrations on properties of Ni-based coatings, *Journal of Vibroengineering* 12 (4): 604–610, ISSN 1392-8716. (ISI Web of Science)

Škamat, J., Valiulis, A. V., Kurzydłowsky, K. J., Černašėjus, O., Lukauskaitė, R., Zwolinska, M. 2014. NiCrSiB thermal sprayed coatings refused under vibratory treatment, *Materials Science (Medžiagotyra)* 20: ISSN 1392-1320. (ISI Web of Science, printas spaudai)

Škamat, J., Valiulis, A. V. 2010. Apie galimybes ultragarsą naudoti terminio purškimo technologijose, *Mokslas – Lietuvos ateitis = Science – future of Lithuania: mechanika, medžiagų inžinerija, pramonės inžinerija ir vadyba* 2(4): 39–41, ISSN 2029-2341. (IndexCopernicus)

Valiulis, A. V., Škamat, J. 2010. Advanced materials research and technologies development: Lithuanian experience, *Solid State Phenomena* 165: 210–215, ISSN 1012-0394. (Scopus)

Straipsniai kituose leidiniuose

Škamat, J., Černašėjus, O., Valiulis, A.V. 2012. Исследование влияния механических колебаний на структуру и свойства термических покрытий на основе никеля, *Proceedings of the International scientific-practical conference "Science and education as a leading factor in strategy Kazakhstan – 2030" (Saginov's readings No. 4), June 28–29, 2012 Part 1: 77–79, ISBN 9786012960532.*

Priedai

A priedas. Fazės, susidarančios perlydomosiuose Ni pagrindo lydiniuose

A.1 lentelė. Fazės, susidarančios perlydomosiuose Ni pagrindo lydinuose

Table A.1. Phases in refusable Ni-based alloys

Nr.	Lydinio cheminė sudėtis (Ni pagrindas)							Procesas	Fazės	Šaltinis
	Cr	B	Si	C	Fe	Mo	Cu			
1.		10						DTA	$Ni(\alpha)$ Ni_3B	Lebaili <i>et al.</i> 1988
2.		15						— // —	$Ni(\alpha)$ Ni_3B	
3.			19					— // —	$Ni(\alpha)$ Ni_5Si_2	
4.		6	4,5					— // —	$Ni(\alpha)$ Ni_3B Ni_5Si_2	
5.		10	10					— // —	$Ni(\alpha)$ Ni_3B Ni_5Si_2	
6.	7,5	8	6,3	1				— // —	$Ni(\alpha)$ Ni_3B Ni_5Si_2	
7.		15	10					— // —	Ni Ni_3B Ni_6Si_2B	
8.	14	14	6,3	1,5				— // —	Ni Ni_3B Ni_5Si_2 M_7C_3 CrB	
9.	11	20	8	1,5				— // —	Ni Ni_3B Ni_5Si_2 M_7C_3 CrB	
10.	10	10	7	2				— // —	Ni Ni_3B Ni_5Si_2 M_7C_3	
11.	15	17	7	3,6				— // —	Ni Ni_3B Ni_5Si_2 M_7C_3	
12.	15,7	3,35	4,27	0,81	4,08			LD	γ -Ni Ni_3B $(Cr, Fe)_7C_3$ CrB	Navas <i>et al.</i> 2006
								Liepsna	γ -Ni Ni_3B $(Cr, Fe)_7C_3$ CrB	
13.	16	4	4	0,5	2,5	3	3	Krosnis	Ni Ni_3B Cr_7C_3 CrB	Kim <i>et al.</i> 2003
14.	11	2,5	2,5	0,5	2,5			— // —	Ni Ni_3B Cr_7C_3 CrB * WC W_2B Co_6W_6C	
15.	16,3	3,3	4,3	0,9	4,2			— // —	Ni Ni_3B Ni_5Si_2 Cr_7C_3 CrB	
16.	14,8	3,21	4,28	0,73	3,7			PP+Kr.	Ni Ni_3B Cr_7C_3 CrB	Miguel 2003

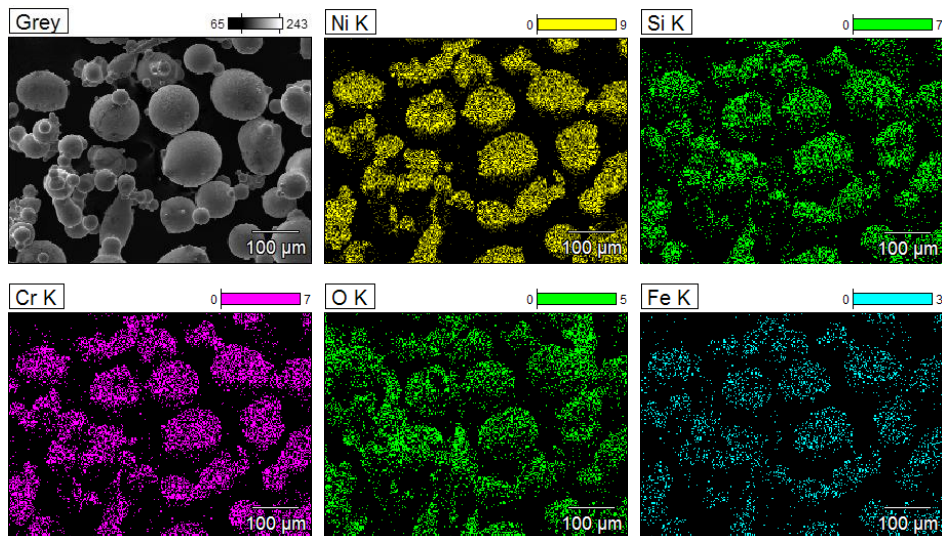
A.1 lentelės pabaiga

17.	14	3,5	3,5	0,8	14	0		TVP	γ -(Ni,Fe)	M_7C_3 $M_{23}C_6$ Cr_2B	Hou <i>et al.</i> 2009
18.	14	3,5	3,5	0,8	14	4		— // —	— // —		
19.	14	3,5	3,5	0,8	14	6		— // —	— // —		
20.	14	3	4,5	0,7	4	2	2	LD	γ -Ni Ni_3B Ni_2B Ni_3Si Cr_7C_3	CrB Cr_5B_3	Hemmati <i>et al.</i> 2013a
21.	6	1	4,3	0,2	1,8			— // —	γ -Ni Ni -Si eutektika	Cr boridai	
22.	20,5	1	6	0,3	7,5			— // —	γ -Ni Ni -Si eutektika	Cr boridai	
23.	15,7	3,35	4,27	0,81	4,08			LP+PL	γ -Ni Ni_3B	Cr karbidai Cr boridai	Gonzalez <i>et al.</i> 2007
								LP+PLz	γ -Ni Ni_3B	Cr karbidai Cr boridai	
								LD	γ -Ni Ni_3B	CrB	
24.	15,2	3,19	4,65	0,76	3,87			PPO	γ -Ni Ni_3B	$(Cr,Fe)_7C_3$ CrB	Serres <i>et al.</i> 2010
								PP+PLz	γ -Ni Ni_3B	$(Cr,Fe)_7C_3$ CrB	
25.	16	3,5	3,5	0,8	4	3	3	Krošnis	$NiCrFe$ Ni_3B	$Cr_{23}C_6$ Cr_3NiB_6 $FeMo_2B_2$ Fe_2MoB_2	Shrestha <i>et al.</i> 2005
26.	14	3,20	4,50	0,55	4,50	-	-	TVP	γ -Ni	Cr_3C_2 Cr_7C_3 CrB	Sudha 2008
27.	14,4	15,1	7,5	3,1	1,0			LD	γ -Ni Ni_3B Ni_2B	M_7C_3 $M_{23}C_6$ CrB	Li <i>et al.</i> 2001
								Krošnis	γ -Ni Ni_3B Ni_3Si	M_7C_3	
28.	10,5	1,8-2,3	4	0,45	3-4			ATVP	γ -Ni Ni_3B Ni_3Si Cr_3C_2 Cr_7C_3	CrB	Liyanage <i>et al.</i> 2010
30.	7,5	1,6	3,5	0,25	2,5			GPLL	γ -Ni Ni_3Si Ni_3Fe Cr_3Si B_4C	CrB	Conde 2002
31.	15	3,1	4,3	0,75	3,5			GPLL	γ -Ni Ni_3B Ni_3Si Ni_3Fe $Cr_{23}C_6$ $(Fe,Ni)_{23}C_6$		

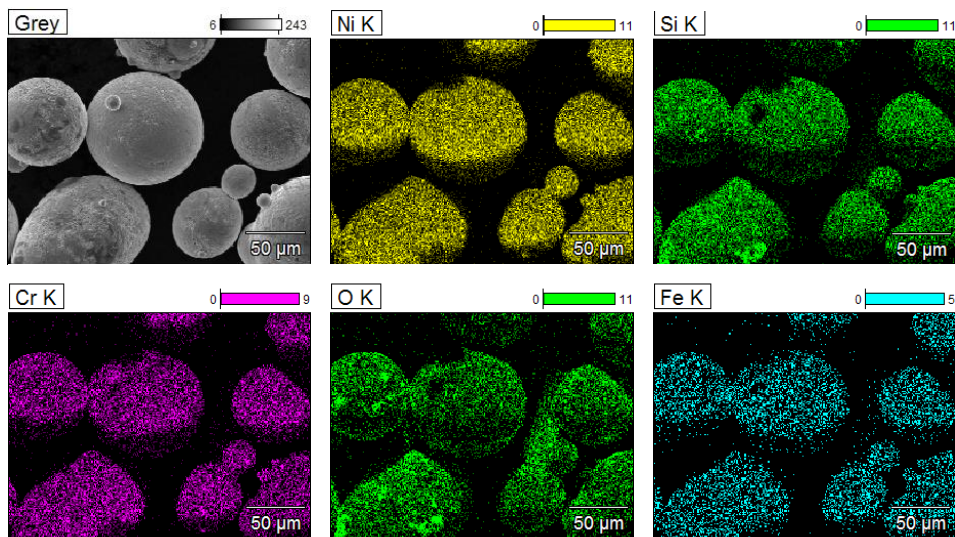
Pastabos:

- 1–11 ir 27 lydinų cheminė sudėtis nurodyta atomų kiekio procentais, visų kitų – masės procentais.
- * 14-as lydinys naudotas darbe sumaišytas su WC–Co (35 masės procentais).
- Kr. – krošnis; kitas santrumpas žiūrėti skyriuje “Žymėjimai”.

B priedas. Purškiamų miltelių rentgeno mikroanalizės rezultatai

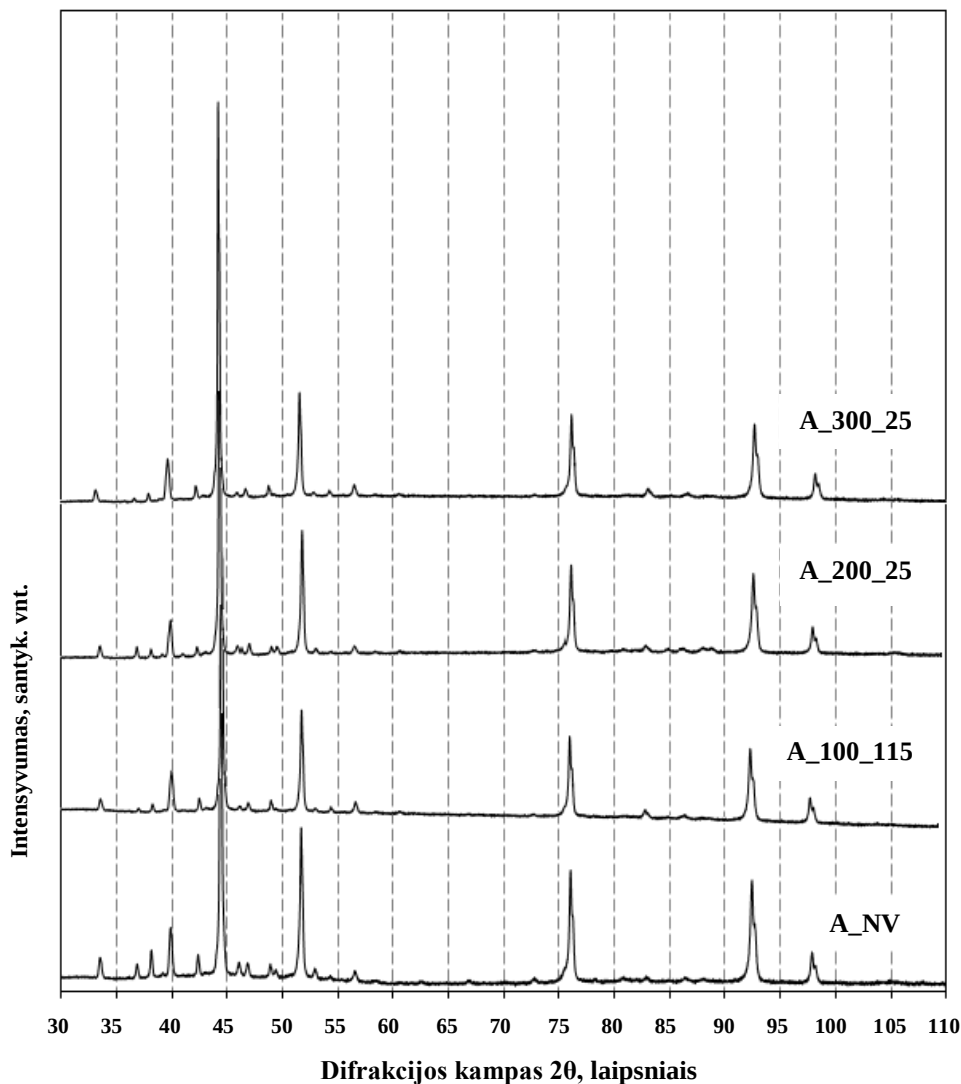


B.1 pav. A purškimo miltelių RMA: cheminių elementų pasiskirstymas
Fig. B1. X-ray microanalysis of A-type spraying powder: chemical mapping

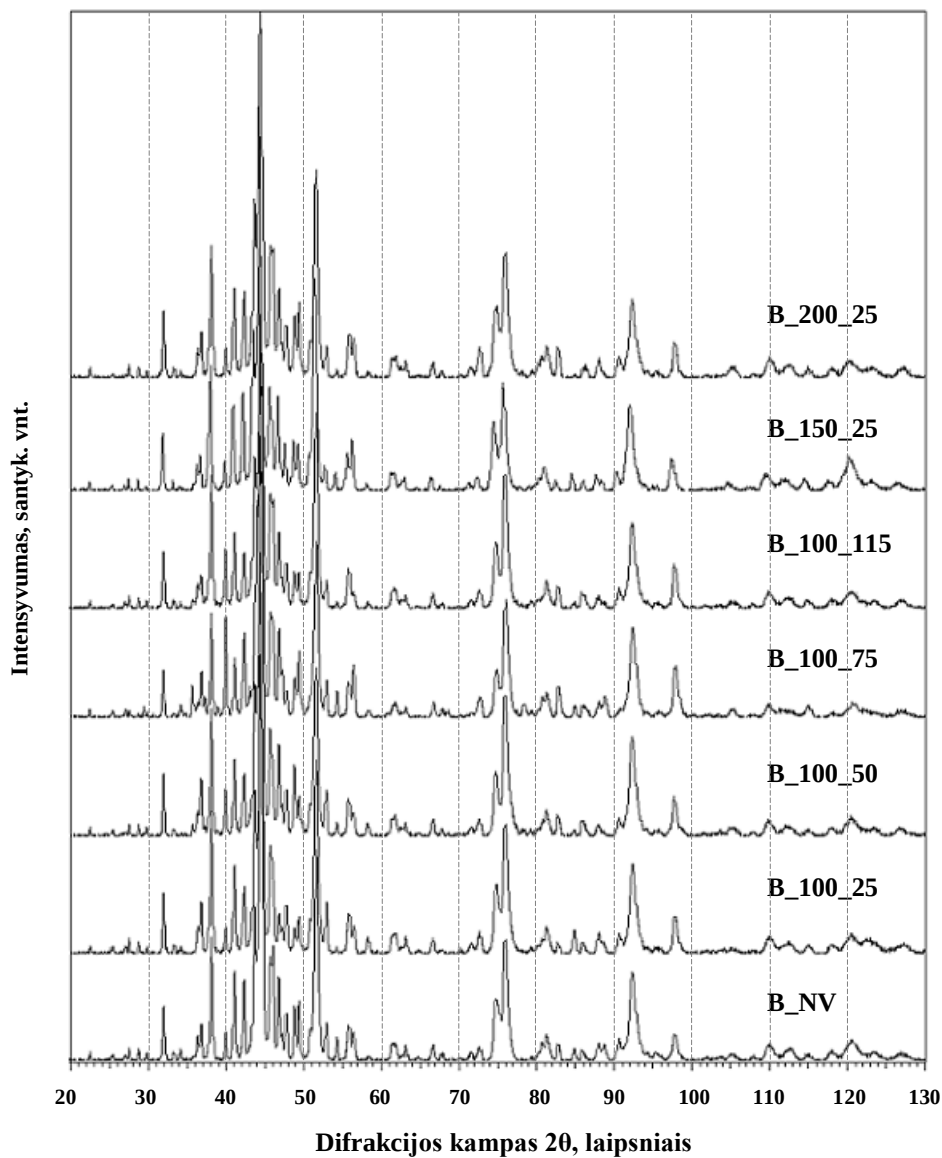


B.2 pav. B purškimo miltelių RMA: cheminių elementų pasiskirstymas
Fig. B2. X-ray microanalysis of B-type spraying powder: chemical mapping

C priedas. Perlydytų dangų difrakcinės kreivės lyginamajai analizei



C.1 pav. Perlydytų A dangų difrakcinės kreivės
Fig. C1. XRD patterns of remelted A-type coatings



C.2 pav. Perlydytų B dangų difrakcinės kreivės
Fig. C2. XRD patterns of remelted B-type coatings

Jelena ŠKAMAT

VIBRACINIO APDOROJIMO POVEIKIS PURKŠTŲJŲ
NIKELIO PAGRINDO DANGŲ STRUKTŪRAI IR SAVYBĖMS

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai,
medžiagų inžinerija (08T)

Jelena ŠKAMAT

EFFECT OF VIBRATORY TREATMENT ON THE STRUCTURE
AND PROPERTIES OF NICKEL BASED THERMALLY SPRAYED COATINGS

Doctoral Dissertation

Technological Sciences,
Materials Engineering (08T)

2013 11 08. 10,0 sp. I. 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